



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO (EMC)

Discentes: Iury Marques Oliveira  
Vitor Hugo Alves Macedo  
Orientador: Prof. Dr. Sérgio Pires Pimentel

**Proposta de Sistema Modular Automatizado para Drenagem e  
Reaproveitamento de Água de  
Afloramentos Subterrâneos e Pluviais em Canteiros de Obras**

Goiânia - GO  
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

## **TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

### **1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)**

Autores: Iury Marques Oliveira e Vitor Hugo Alves Macedo

Título do trabalho: "Proposta de Sistema Modular Automatizado para Drenagem e Reaproveitamento de Água de Afloramentos Subterrâneos e Pluviais em Canteiros de Obras"

### **2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [ X ] SIM [ ] NÃO<sup>1</sup>**

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

#### **Casos de embargo:**

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

**Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.**



Documento assinado eletronicamente por **Sergio Pires Pimentel, Professor do Magistério Superior**, em 11/12/2025, às 18:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Iury Marques Oliveira, Usuário Externo**, em 12/12/2025, às 12:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vitor Hugo Alves Macêdo, Discente**, em 12/12/2025, às 13:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5855167** e o código CRC **3790C8CC**.

---

Referência: Processo nº 23070.042987/2025-78

SEI nº 5855167

Discentes: Iury Marques Oliveira  
Vitor Hugo Alves Macedo

## **Proposta de Sistema Modular Automatizado para Drenagem e Reaproveitamento de Água de Afloramentos Subterrâneos e Pluviais em Canteiros de Obras**

Projeto Final de Curso de Graduação, apresentado  
à Escola de Engenharia Elétrica Mecânica e de  
Computação da Universidade Federal de Goiás  
como requisito parcial para obtenção do grau de  
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Pires Pimentel.

Goiânia - GO  
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do  
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Oliveira, Iury Marques

Proposta de Sistema Modular Automatizado para Drenagem e  
Reaproveitamento de Água de Afloramentos Subterrâneos e Pluviais  
em Canteiros de Obras [manuscrito] / Iury Marques Oliveira, Vitor  
Hugo Alves Macedo. - 2025.

LXXXVI, 86 f.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Pires Pimentel.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade  
Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de  
Computação (EMC), Engenharia Elétrica, Goiânia, 2025.

Bibliografia.

1. drenagem. 2. automação. 3. reaproveitamento de água. 4. CLP.  
5. construção civil. I. Macedo, Vitor Hugo Alves. II. Pimentel, Sérgio  
Pires, orient. III. Título.

CDU 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos doze dias do mês de dezembro do ano de 2025 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “**Proposta de Sistema Modular Automatizado para Drenagem e Reaproveitamento de Água de Afloramentos Subterrâneos e Pluviais em Canteiros de Obras**”, de autoria de **Iury Marques Oliveira** (201900272) e **Vitor Hugo Alves Macedo** (202004852), do curso de Engenharia Elétrica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo Prof. Dr. Sérgio Pires Pimentel - Orientador (EMC/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Eng. Civil José Almeida Lourenço - Membro Externo e Prof. Dr. João Paulo da Silva Fonseca (EMC/UFG). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição dos estudantes. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de **8,5 (oito vírgula cinco)**, tendo sido o TCC considerado **APROVADO**.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Sergio Pires Pimentel, Professor do Magistério Superior**, em 12/12/2025, às 12:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Joao Paulo Da Silva Fonseca, Professor do Magistério Superior**, em 12/12/2025, às 18:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Almeida Lourenço, Usuário Externo**, em 16/12/2025, às 12:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5855127** e o código CRC **F41CB234**.

## **AGRADECIMENTOS**

### **Iury Marques Oliveira**

Primeiramente, agradeço a Deus pela força, saúde, proteção e por abençoar cada um dos meus passos durante toda esta caminhada acadêmica.

Agradeço ao meu pai, Ailson, por toda a força, incentivo, puxões de orelha e por nunca permitir que eu desistisse nos momentos mais difíceis. Agradeço também à minha mãe, Ana Lúcia, por todo amor e carinho; à minha irmã, Iasmim, pelo companheirismo e presença em minha vida; e à minha namorada, Manuela, por todo amor, apoio e carinho, fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Sou profundamente grato ao nosso orientador, Professor Dr. Sérgio Pimentel, por sua disponibilidade, atenção e pela transmissão de conhecimento com dedicação, profissionalismo e paciência ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao meu colega de TCC e de estágio, Vitor Hugo, pela parceria, empenho, companheirismo e por toda a jornada compartilhada até a conclusão deste projeto.

Estendo meus agradecimentos à OM Incorporadora, em especial ao Engenheiro Eletricista Dhiego, pelos ensinamentos, orientação e pela oportunidade proporcionada. Agradeço ainda ao Wesley, encarregado de instalações, pelos conhecimentos transmitidos diariamente; aos engenheiros Cécile e Vitor, pela compreensão, ensinamentos e apoio durante este período desafiador. Registro, com carinho, meu agradecimento a todos os colaboradores da obra INFINITY, pela troca de experiências, pelo aprendizado constante e pelo crescimento profissional adquirido ao longo de meu estágio.

## **Vitor Hugo Alves Macedo**

Agradeço, primeiramente, ao Professor Sérgio Pimentel, por ter aceitado ser nosso orientador e por nos conduzir com competência, paciência e dedicação ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. Suas orientações precisas, disponibilidade constante e profundo conhecimento técnico foram fundamentais para a construção deste projeto e para o nosso crescimento acadêmico e profissional.

Estendo meus agradecimentos ao meu colega de dupla, Iury, pelo comprometimento, cooperação e parceria durante toda a realização do trabalho. Seu empenho e espírito colaborativo foram essenciais para superarmos cada etapa do processo.

Agradeço também a todos os docentes da Escola de Engenharia Elétrica, que contribuíram de maneira decisiva para minha formação. Cada disciplina, cada orientação e cada oportunidade oferecida ao longo do curso ampliaram minha visão técnica e pessoal.

De forma especial, registro minha gratidão à minha família: meu pai Uhio, minha mãe Adriana, minha irmã Jordana e minha namorada Maria Clara, que sempre me apoiaram incondicionalmente. O incentivo, o carinho e a compreensão de cada um deles foram fundamentais para que eu pudesse enfrentar os desafios da graduação e concluir esta etapa tão importante da minha vida.

Por fim, agradeço à empresa OM Incorporadora, em especial ao coordenador de instalações Dhiego Nunes, pela disposição em compartilhar experiências e conhecimentos técnicos que tiveram papel decisivo na elaboração deste trabalho. Sua contribuição prática e profissional agregou valor significativo ao projeto, aproximando-o da realidade das obras.

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema modular automatizado para drenagem, armazenamento e reaproveitamento de águas subterrâneas e pluviais em canteiros de obras. A pesquisa parte da análise dos problemas decorrentes do acúmulo hídrico em escavações e fundações, especialmente em ambientes urbanos com lençóis freáticos rasos, afloramentos e elevada incidência de chuvas. São discutidos os impactos operacionais, estruturais e ambientais que a presença excessiva de água causa, bem como o potencial de reaproveitamento desse recurso em atividades não potáveis da construção civil.

A fundamentação teórica aborda fontes de água em canteiros, drenagem temporária, tecnologias de tratamento simplificado, classificação e seleção de bombas, além de conceitos de modularidade e automação industrial. Com base nesses fundamentos, é proposta uma solução composta por quatro módulos principais: drenagem, armazenamento, reuso e descarte, todos integrados por um módulo central de controle baseado em Controlador Lógico Programável (CLP). O sistema utiliza sensores de nível, pressão e vazão, atuadores elétricos, válvulas solenoides e bombas submersíveis e centrífugas para operar de forma contínua e segura.

A lógica de controle foi implementada no ambiente Siemens TIA Portal, estruturada em funções e blocos funcionais, com monitoramento via supervisão. O sistema possibilita acionamentos automáticos, definição de permissões, detecção de falhas, controle em malha fechada e acompanhamento gráfico em tempo real. A arquitetura final demonstrou capacidade de reduzir intervenções manuais, otimizar o uso da água disponível e aumentar a eficiência operacional da obra, além de minimizar o descarte inadequado e o consumo de água potável.

Os resultados obtidos indicam que a abordagem modular oferece flexibilidade, escalabilidade e facilidade de manutenção, tornando o sistema aplicável a obras de diferentes portes e condições geológicas. Conclui-se que a integração entre automação industrial e gestão hídrica representa uma solução eficaz e sustentável para os desafios enfrentados pela construção civil, contribuindo tanto para a eficiência técnica quanto para a responsabilidade ambiental.

**Palavras-chave:** drenagem; automação; reaproveitamento de água; CLP; construção civil; modularidade.

## ABSTRACT

*This work presents the development of a modular automated system for drainage, storage, and reuse of groundwater and rainwater in construction sites. The research begins by analyzing the problems caused by water accumulation in excavations and foundations, especially in urban environments with shallow water tables, natural outcrops, and high rainfall incidence. The operational, structural, and environmental impacts resulting from excess water are discussed, as well as the potential for reusing this resource in non-potable applications within civil construction.*

*The theoretical foundation addresses water sources in construction sites, temporary drainage solutions, simplified treatment technologies, pump classification and selection, and concepts of modularity and industrial automation. Based on these principles, a solution composed of four main modules is proposed: drainage, storage, reuse, and disposal, all integrated by a central control module based on a Programmable Logic Controller (PLC). The system uses level, pressure, and flow sensors, electrical actuators, solenoid valves, and submersible and centrifugal pumps to ensure continuous and safe operation.*

*The control logic was implemented in the Siemens TIA Portal environment, structured into functions and functional blocks, with monitoring through a supervisory interface. The system enables automatic actuation, permission management, fault detection, closed-loop control, and real-time graphical monitoring. The final architecture demonstrated the ability to reduce manual interventions, optimize the use of available water, and increase the operational efficiency of the construction site, in addition to minimizing improper disposal and potable water consumption.*

*The results indicate that the modular approach offers flexibility, scalability, and ease of maintenance, making the system applicable to construction projects of different sizes and geological conditions. It is concluded that the integration of industrial automation and water management represents an effective and sustainable solution to the challenges faced in civil construction, contributing both to technical efficiency and environmental responsibility.*

**Keywords:** *drainage; automation; water reuse; PLC; civil construction; modularity.*

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Sistema de fluxo total .....                         | 23 |
| Figura 2 - Sistema com derivação .....                          | 24 |
| Figura 3 - Sistema com volume adicional de retenção .....       | 24 |
| Figura 4 - Sistema com Infiltração no Solo .....                | 24 |
| Figura 5 - Localização da obra .....                            | 38 |
| Figura 6 - Diagrama P&ID .....                                  | 40 |
| Figura 7 - CLP S7-1500.....                                     | 43 |
| Figura 8 - Bomba submersível.....                               | 45 |
| Figura 9- Bomba submersa.....                                   | 45 |
| Figura 10 - bomba centrífuga .....                              | 46 |
| Figura 11 - Arquitetura do sistema.....                         | 47 |
| Figura 12 – Módulo controle e monitoramento.....                | 48 |
| Figura 13 - Módulo drenagem.....                                | 49 |
| Figura 14 - Módulo de armazenamento.....                        | 50 |
| Figura 15 - Módulo de reuso .....                               | 51 |
| Figura 16 - Módulo de descarte.....                             | 52 |
| Figura 17 - OB1 .....                                           | 55 |
| Figura 18 - Bloco cura concreto .....                           | 57 |
| Figura 19 - Configuração horário .....                          | 58 |
| Figura 20 - Módulo PID .....                                    | 59 |
| Figura 21 - Banco de dados .....                                | 60 |
| Figura 22 - Atuadores PID.....                                  | 66 |
| Figura 23 - Tela visão geral.....                               | 68 |
| Figura 24 - Módulo drenagem.....                                | 69 |
| Figura 25 - Supervisório módulo de descarte.....                | 70 |
| Figura 26 - Supervisório módulo uso geral .....                 | 71 |
| Figura 27 - Supervisório PID.....                               | 72 |
| Figura 28 - Simulação Factory I/O .....                         | 74 |
| Figura 29 - Diagrama unifilar elétrico .....                    | 76 |
| Figura 30 - Esquema partida direta bomba poço caipira .....     | 77 |
| Figura 31- Esquema partida direta bomba poço rebaixamento ..... | 78 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                           |    |
|-------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Sintonia controlador PID ..... | 37 |
| Tabela 2 - Entradas Digitais .....        | 53 |
| Tabela 3 - Entradas Analógicas .....      | 54 |
| Tabela 4 - Saídas Digitais .....          | 54 |
| Tabela 5 - Saídas Analógicas.....         | 54 |

## SUMÁRIO

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO.....                                             | 16 |
| 1.1. Contextualização .....                                    | 16 |
| 1.2. Problema da Acumulação de Água em Canteiros de Obras..... | 16 |
| 1.3. Sustentabilidade e Reuso de Água na Construção Civil..... | 17 |
| 1.4. Justificativa.....                                        | 18 |
| 1.5. Objetivo Geral .....                                      | 18 |
| 1.6. Objetivos Específicos .....                               | 18 |
| 1.7. Estrutura do Trabalho .....                               | 19 |
| 2. FUNDAMENTOS PARA O SISTEMA DE DRENAGEM E REAPROVEITAMENTO   | 19 |
| 2.1. Fontes de Água Não Potável em Canteiros de Obras.....     | 20 |
| 2.1.1. Afloramento de água subterrânea .....                   | 20 |
| 2.1.2. Água Pluvial .....                                      | 21 |
| 2.2. Sistemas de Drenagem Temporária.....                      | 25 |
| 2.2.1. Poço Caipira .....                                      | 25 |
| 2.2.2. Poço de Rebaixamento .....                              | 26 |
| 2.3. Utilização de água não potável em canteiro de Obra .....  | 27 |
| 2.4. Tecnologias de Tratamento Simplificado de Água .....      | 28 |
| 2.4.1. Filtração .....                                         | 28 |
| 2.4.2. Decantação.....                                         | 28 |
| 2.4.3. Desinfecção com Cloro ou UV.....                        | 29 |
| 2.4.4. Outros métodos de desinfecção .....                     | 29 |
| 2.5. Bombas Hidráulicas.....                                   | 29 |
| 2.5.1. Classificação Geral das Bombas.....                     | 29 |
| 2.5.2. Bombas de Deslocamento Positivo .....                   | 30 |
| 2.5.3. Bombas dinâmicas.....                                   | 30 |
| 2.5.4. Critério de Seleção de Bombas.....                      | 31 |
| 2.5.5. Aplicação em Canteiro de Obras .....                    | 31 |
| 2.6. Conceitos de Modularidade Aplicado a Engenharia .....     | 32 |
| 2.6.1. Definições e Princípio de Modularidade .....            | 32 |
| 2.6.2. Aplicações da modularidade na Engenharia.....           | 33 |
| 2.6.3. Benefícios e Implicações .....                          | 33 |

|        |                                                                     |    |
|--------|---------------------------------------------------------------------|----|
| 2.7.   | Automação Aplicada ao Controle de Drenagem e Reaproveitamento ..... | 33 |
| 2.7.1. | Sensores .....                                                      | 33 |
| 2.7.2. | Atuadores.....                                                      | 34 |
| 2.8.   | CLP como Unidade de Controle.....                                   | 34 |
| 2.8.1. | Lógica de Controle e Programação .....                              | 35 |
| 2.9.   | Sistema de Controle em Malha Fechada .....                          | 36 |
| 2.9.1. | Controlador PID .....                                               | 36 |
| 2.9.2. | Método de Sintonia dos Parâmetros PID.....                          | 37 |
| 3.     | PROPOSTA DE SISTEMA AUTOMATIZADO.....                               | 38 |
| 3.1.   | Local e Condições de Instalação .....                               | 38 |
| 3.2.   | Etapas do projeto .....                                             | 39 |
| 3.2.1. | Levantamento de requisitos Técnicos.....                            | 39 |
| 3.2.2. | Projeto do Sistema de Drenagem e Armazenamento: .....               | 40 |
| 3.2.3. | Projeto do Sistema de Controle Automatizado.....                    | 41 |
| 3.2.4. | Montagem Conceitual do Sistema Modular: .....                       | 41 |
| 3.2.5. | Testes e Avaliação de Desempenho (Conceitual) .....                 | 42 |
| 3.3.   | Materiais e Equipamentos Utilizados .....                           | 42 |
| 3.3.1. | Controlador Lógico Programável (CLP) .....                          | 42 |
| 3.4.   | Instalações Elétricas .....                                         | 43 |
| 3.4.1. | Bombas .....                                                        | 44 |
| 4.     | FUNCIONAMENTO DO SISTEMA AUTOMATIZADO.....                          | 47 |
| 4.1.   | Arquitetura do Sistema .....                                        | 47 |
| 4.2.   | Programação CLP.....                                                | 52 |
| 4.2.1. | Entradas e Saídas .....                                             | 53 |
| 4.2.2. | OB1 – Ciclo principal de Varredura.....                             | 54 |
| 4.2.3. | FC de Acionamento das Bombas.....                                   | 55 |
| 4.2.4. | FC de Descarte.....                                                 | 55 |
| 4.2.5. | FB – Blocos Funcionais para Controle Avançado.....                  | 56 |
| 4.3.   | Funcionamento dos Sensores.....                                     | 61 |
| 4.3.1. | Funcionamento dos atuadores .....                                   | 63 |
| 4.4.   | Sistema Supervisório SCADA.....                                     | 66 |
| 4.5.   | Simulação Factory I/O.....                                          | 72 |
| 4.6.   | Funcionamento da Instalação Elétrica .....                          | 75 |

|       |                                                                                   |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.7.  | Avaliação da eficiência na drenagem e no reaproveitamento sistema automatizado... | 79 |
| 4.8.  | Eficiência no Armazenamento e Distribuição .....                                  | 79 |
| 4.9.  | Eficiência no Reaproveitamento da Água .....                                      | 79 |
| 4.10. | Conclusão da Avaliação .....                                                      | 80 |
| 5.    | CONCLUSÃO .....                                                                   | 81 |
|       | REFERÊNCIAS .....                                                                 | 83 |

## **1. INTRODUÇÃO**

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema modular automatizado voltado à gestão eficiente da água em canteiros de obras, integrando conceitos de engenharia hidráulica, automação e sustentabilidade. A proposta envolve a concepção, o dimensionamento e a implementação de uma solução capaz de operar de forma organizada, segura e adaptável às diferentes necessidades do ambiente construtivo.

Nos tópicos seguintes, são apresentados o contexto que motivou o estudo, o problema analisado, a fundamentação teórica, bem como os objetivos que orientam o projeto e a estrutura geral do trabalho.

### **1.1. Contextualização**

Canteiros de obras situados em ambientes urbanos complexos, como a região do Setor Bueno em Goiânia, são constantemente impactados pela presença simultânea de águas subterrâneas e pluviais. Em áreas caracterizadas por aquíferos rasos, afloramentos, solos altamente permeáveis e sistemas urbanos impermeabilizados, a infiltração e o escoamento tornam-se fatores críticos para a estabilidade e segurança da construção. A literatura analisada demonstra que a ocorrência de lençol freático elevado, somada aos episódios de chuvas intensas, gera condições adversas que demandam estratégias de drenagem contínua e monitoramento rigoroso para evitar paralisações ou danos estruturais.

Ao mesmo tempo, o consumo de água em obras de médio e grande porte é expressivo, abrangendo atividades como limpeza, cura do concreto, lavagem de equipamentos, supressão de poeira e abastecimento de prumadas provisórias. Com o avanço das práticas sustentáveis na engenharia civil e a intensificação das crises hídricas nas principais capitais brasileiras, cresce a necessidade de integrar soluções de drenagem, armazenamento e reaproveitamento da água. Esse cenário abre espaço para sistemas automatizados capazes de operar de forma inteligente, reduzindo desperdícios, otimizando recursos e promovendo maior eficiência técnica.

Assim, a construção civil contemporânea demanda soluções que unam engenharia hidráulica, automação industrial e conceitos de modularidade, criando sistemas adaptáveis e escaláveis para diferentes realidades.

### **1.2. Problema da Acumulação de Água em Canteiros de Obras**

A acumulação de água em obras constitui um dos problemas mais recorrentes e prejudiciais durante a fase de fundações e estrutura. Entre os impactos identificados na literatura e vivenciados no contexto analisado, destacam-se:

- **Instabilidade do solo**, reduzindo a capacidade de suporte e aumentando o risco de recalques diferenciais e rupturas em escavações.

- **Comprometimento da segurança operacional**, especialmente em atividades envolvendo escavação profunda, movimentação de máquinas pesadas e circulação de trabalhadores.
- **Atrasos significativos no cronograma**, uma vez que áreas alagadas impossibilitam a continuidade dos serviços.
- **Aumento de custos**, decorrente do bombeamento emergencial, danos a materiais, necessidade de reforço de contenções e interrupções frequentes.
- **Impactos ambientais**, como carreamento de sedimentos, alteração da qualidade da água e sobrecarga em galerias pluviais.

Obras localizadas próximas a nascentes soterradas, áreas de várzea ou zonas de recarga de aquíferos estão particularmente sujeitas à entrada constante de água, exigindo sistemas robustos e contínuos de drenagem. A inexistência de monitoramento automatizado leva ao acionamento tardio das bombas, ao desperdício de água potencialmente reaproveitável e ao aumento de riscos de falha humana.

Nesse contexto, a ausência de um sistema integrado de controle e gestão hídrica acentua o problema, reforçando a necessidade de soluções inteligentes e automatizadas.

### **1.3. Sustentabilidade e Reuso de Água na Construção Civil**

O setor da construção civil acompanha, nos últimos anos, um avanço expressivo na adoção de práticas sustentáveis e na busca por soluções que reduzam o impacto ambiental das obras. Entre elas, o reuso de água se destaca como uma alternativa viável para diminuir a pressão sobre os mananciais, reduzir custos e promover eficiência na operação.

A água captada de poços de rebaixamento e sistemas pluviais, tradicionalmente descartada, pode ser aproveitada em diversas atividades não potáveis, como:

- cura do concreto;
- limpeza do canteiro e equipamentos;
- supressão de poeira;
- abastecimento de áreas externas;
- irrigação temporária;
- enchimento de tambores e prumadas.

Além do benefício ambiental, a reutilização contribui para uma significativa redução dos custos operacionais, especialmente em obras de médio e grande porte, onde a demanda diária é elevada.

No entanto, para que esse reaproveitamento seja seguro e eficiente, é necessário implementar sistemas que garantam:

- separação de redes potáveis e não potáveis;

- controle de qualidade da água;
- armazenamento adequado;
- monitoramento automatizado.

A integração desses elementos fundamenta a proposta de automação desenvolvida no trabalho, alinhando engenharia hidráulica, automação e sustentabilidade.

#### **1.4. Justificativa**

A justificativa do estudo se baseia em três pilares centrais:

##### **a) Necessidade operacional**

Novas obras na cidade de Goiânia têm cada vez mais enfrentado desafios graves decorrentes da entrada constante de água subterrânea e do acúmulo de água pluvial. Métodos convencionais, baseados em drenagem manual ou sem controle inteligente, não oferecem eficiência ou confiabilidade suficientes para obras complexas.

##### **b) Oportunidade de inovação**

Poucos canteiros na cidade de Goiânia dispõem de sistemas automatizados capazes de integrar drenagem, armazenamento e reaproveitamento da água. A implementação de sensores de nível, pressão, turbidez e atuadores supervisionados por CLP ainda é pouco explorada, apesar de sua alta eficiência.

##### **c) Contribuição ambiental**

O reaproveitamento da água drenada reduz o consumo de água potável e diminui o impacto sobre redes urbanas e corpos hídricos. O sistema proposto promove economia, sustentabilidade e conformidade com práticas modernas de engenharia verde.

Dessa forma, o desenvolvimento de um sistema modular automatizado justifica-se pela necessidade técnica, eficiência operacional e contribuição sustentável.

#### **1.5. Objetivo Geral**

Desenvolver e avaliar um sistema modular e automatizado para drenagem, armazenamento, controle e reaproveitamento de águas subterrâneas e pluviais em canteiros de obras, integrando tecnologias hidráulicas e de automação para melhorar a eficiência operacional e promover sustentabilidade.

#### **1.6. Objetivos Específicos**

- I. Identificar as principais fontes de água não potável presentes em canteiros de obras e seus impactos operacionais.

- II. Estudar soluções de drenagem, direcionamento, armazenamento e reutilização adequadas ao ambiente de construção.
- III. Projetar um sistema modular contemplando poços, reservatórios, tubulações e bombas com diferentes capacidades.
- IV. Desenvolver a lógica de controle em CLP, incluindo sensores, atuadores, malha fechada e supervisão via sistema SCADA.
- V. Validar conceitualmente o sistema por meio de simulações e testes funcionais em ambiente supervísório.
- VI. Avaliar a eficiência do sistema considerando operação automática e benefícios ambientais.

### 1.7. Estrutura do Trabalho

O trabalho está organizado de modo a permitir uma compreensão progressiva do problema e da solução proposta:

- **Capítulo 1 – Introdução:** apresenta o contexto geral, o problema, a justificativa e os objetivos.
- **Capítulo 2 – Fundamentos:** discute fontes de água em canteiros, drenagem, poços, tratamento, bombas, modularidade e automação.
- **Capítulo 3 – Proposta do Sistema Automatizado:** detalha o local de instalação, requisitos, projeto hidráulico e elétrico, módulos e lógica de operação.
- **Capítulo 4 – Resultados:** apresenta a arquitetura do sistema, telas do supervísório, programação do CLP e operação simulada.
- **Capítulo 5 – Conclusões:** sintetiza os resultados, enfatizando viabilidade técnica, sustentabilidade e recomendações para melhorias futuras.

## 2. FUNDAMENTOS PARA O SISTEMA DE DRENAGEM E REAPROVEITAMENTO

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos fundamentais que sustentam o sistema modular de drenagem e reaproveitamento hídrico proposto neste trabalho. Para isso, inicia-se com a descrição das principais fontes de água não potável que podem estar presentes nos canteiros de obras, abordando desde os fenômenos hidrogeológicos responsáveis pelo afloramento de águas subterrâneas até os efeitos da água pluvial sobre o solo, a produtividade e a segurança do ambiente construtivo. Também são discutidas as soluções de drenagem temporária, com destaque para o poço caipira e o poço de rebaixamento, essenciais para o controle da umidade do solo e para a manutenção de condições adequadas de execução.

Na sequência, o capítulo explora as práticas de aproveitamento de água não potável e os métodos de tratamento físico e químico necessários para torná-la adequada ao uso operacional, considerando as demandas da construção civil. São apresentados ainda os tipos de bombas

hidráulicas, seus critérios de seleção e aplicações no canteiro, bem como os princípios de modularidade aplicados ao projeto de sistemas complexos. Por fim, detalha-se a automação do processo, contemplando sensores, atuadores, CLP, lógica de controle e sistemas em malha fechada, que garantem eficiência, segurança e confiabilidade ao funcionamento do conjunto.

## **2.1. Fontes de Água Não Potável em Canteiros de Obras**

### **2.1.1. Afloramento de água subterrânea**

Regiões com rochas solúveis, como calcário, dolomito e gipsita, são muito propícias a afloramentos subterrâneos. Nessas áreas ocorre o fenômeno do carste, no qual fissuras, cavernas e sumidouros facilitam tanto a infiltração quanto o surgimento de nascentes. A hidrogeologia cárstica (tipo de relevo formado pela dissolução química de rochas solúveis, como calcário, gesso e mármore) é altamente permeável, permitindo o rápido deslocamento da água até pontos de descarga, o que explica a abundância de nascentes em regiões cársticas [1].

Além disso, áreas de afloramento de aquíferos (*outcrops*), onde formações arenosas ou sedimentares permeáveis estão expostas na superfície, representam zonas de recarga e potenciais locais de afloramento. Nesses locais, a precipitação e a drenagem superficial penetram diretamente no aquífero [2].

No Brasil, o Sistema Aquífero Guarani (SAG) é um exemplo notável de região com áreas de afloramento que favorecem o recarregamento e a descarga das águas subterrâneas. Em Goiás, o SAG cobre cerca de 44.000 km<sup>2</sup>, sendo aproximadamente 9.580 km<sup>2</sup> de áreas de afloramento, principalmente em arenitos da Formação Botucatu [3], que permitem elevada infiltração. Além disso, estudos em Iporá-GO identificaram zonas de recarga sobre rochas cristalinas (granitos, gnaisses) e formações sedimentares como Furnas e Ponta Grossa [4], reforçando a importância de solos porosos e rochas fraturadas no favorecimento do afloramento.

A cidade de Goiânia está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte, cujo Alto Rio Meia Ponte envolve parte da região metropolitana da cidade. Essa área é importante porque sua topografia amena e solos menos compactados favorecem a infiltração de águas pluviais, o que contribui significativamente para recarga de aquíferos superficiais e para manter o lençol freático relativamente próximo da superfície em períodos chuvosos [5]. Entretanto, o crescimento urbano intenso e a impermeabilização do solo — por meio de construções, pavimentações e remoção da cobertura vegetal — prejudicam essa recarga natural, reduzindo a capacidade de afloramento, com consequente diminuição de nascentes e córregos que antes atuavam como pontos de descarga da água subterrânea [6]. Em Goiânia, há várias nascentes distribuídas pelos seus setores, como as do Córrego Água Branca (Setor Água Branca), do Córrego Areião (Setor Sul), do Córrego Sumidouro (Parque Flamboyant, Jardim Goiás), e outras — todas elas dependentes de água subterrânea que aflora, ou seja, de descarga do lençol freático [7]. Estudos e políticas municipais têm reconhecido que a recuperação dessas nascentes é vital para garantir o abastecimento de água, regularização do ciclo hidrológico urbano e mitigação da crise hídrica. Entre os principais fatores que afetam essas nascentes estão o

desmatamento da mata ciliar, o assoreamento, lançamentos de resíduos sólidos e escoamento superficial acelerado, que impedem infiltração [7].

Diante disso, o principal problema do excesso de águas subterrâneas aflorando em canteiros de obra é a instabilidade do solo, condição ainda mais crítica em construções próximas a nascentes. Quando o nível freático é elevado ou há surgimento de nascentes e infiltrações, ocorre o enfraquecimento da resistência mecânica do terreno, reduzindo sua capacidade de suportar cargas e aumentando o risco de recalques diferenciais (rebaixamento irregular de uma fundação), deslizamentos ou rupturas de escavações [8]. Esse processo é agravado em solos arenosos ou argilosos pouco coesivos, que sofrem perda de compacidade ao serem saturados [9].

Outro impacto importante é a dificuldade na execução de fundações e escavações profundas. A presença contínua de água subterrânea aflorando aumenta o risco de instabilidade de taludes, erosão interna e colapso de paredes de contenção. Além disso, o excesso de água exige técnicas de bombeamento e rebaixamento do lençol freático, como poços de alívio, encarecendo e atrasando as etapas da obra [10].

Em canteiros de obras localizados em regiões urbanas, como em Goiânia, esse problema é intensificado devido à presença de nascentes soterradas e lençóis freáticos rasos em áreas de várzea ou fundos de vale. Quando ignorados no planejamento geotécnico, esses pontos de descarga subterrânea provocam alagamentos constantes nos canteiros, que comprometem o cronograma, aumentam os custos com drenagem e podem até inviabilizar parte da obra [11].

Além disso, o excesso de águas subterrâneas pode comprometer a durabilidade das estruturas de concreto quando não há impermeabilização adequada. A percolação de água favorece processos de lixiviação (processo de remoção de nutrientes e sais minerais das camadas superficiais do solo para as camadas mais profundas, causada principalmente pela água), corrosão de armaduras e deterioração prematura dos elementos estruturais enterrados. Isso significa que a falta de controle do afloramento em fase de execução não só eleva os custos imediatos da construção, mas também pode comprometer a vida útil e a segurança da edificação [12].

### **2.1.2. Água Pluvial**

As águas pluviais em canteiros de obras podem causar alagamentos e acúmulo superficial de água, que dificultam a execução de serviços, atrasam cronogramas e aumentam custos de bombeamento e drenagem. Esse excesso hídrico também compromete a mobilidade de trabalhadores e maquinário, reduzindo a produtividade e ampliando riscos de acidentes. Em áreas com baixa declividade ou sistemas de drenagem insuficientes, o problema é ainda mais recorrente [13].

Outro efeito importante está relacionado à erosão do solo e ao carreamento de sedimentos. A água da chuva, ao escoar sobre superfícies expostas e desprovidas de cobertura

vegetal, pode remover camadas de solo, provocando ravinamentos (processo de erosão do solo causado pela ação concentrada da água), assoreamento de cursos d'água próximos e instabilidade de taludes. Esse processo não só compromete a segurança da obra como também gera impacto ambiental significativo, aumentando a turbidez e a contaminação de rios, lagos, aquíferos subterrâneos e reservatórios naturais ou artificiais [14].

Em canteiros de obras de grande porte, especialmente aqueles com extensas áreas impermeabilizadas ou edificações em altura, o volume de água pluvial gerado pode ser significativamente elevado, superando a capacidade de absorção natural do solo e até mesmo a infraestrutura provisória de drenagem instalada. Nesses casos, torna-se fundamental avaliar tecnicamente o reaproveitamento da água da chuva como estratégia complementar de gestão hídrica, não apenas com foco no uso não potável, mas também como forma de controlar volumes excessivos e reduzir a sobrecarga sobre os sistemas de drenagem urbana.

A adoção de medidas específicas para amenizar os impactos do excesso de águas pluviais inclui a implantação de reservatórios temporários, bacias de retenção, dispositivos de retardo do escoamento e sistemas de pré-tratamento da água coletada. Essas soluções permitem regular a vazão lançada na rede pública, minimizar alagamentos no entorno da obra e reduzir o carregamento de sedimentos e resíduos sólidos. Além disso, o reaproveitamento da água captada para atividades como lavagem de áreas, controle de poeira, cura do concreto e uso em descargas sanitárias contribui para a eficiência operacional do canteiro e para a redução do consumo de água potável.

É igualmente imprescindível que a obra esteja preparada para prevenir e mitigar possíveis impactos ambientais decorrentes do escoamento descontrolado das águas pluviais. Sem o devido planejamento, a água da chuva pode arrastar dejetos da construção — como restos de argamassa, solos contaminados e resíduos diversos — para as vias públicas e sistemas de drenagem, agravando problemas de poluição urbana e assoreamento. Dessa forma, a integração entre sistemas de captação, reaproveitamento e controle de efluentes pluviais torna-se uma prática essencial para assegurar a conformidade ambiental, a segurança do entorno e a sustentabilidade do empreendimento.

As águas pluviais também podem comprometer a qualidade de materiais e insumos estocados em áreas descobertas. Cimento, cal, gesso, tintas, madeiras e até aço podem sofrer deterioração quando expostos à umidade excessiva. Além disso, estruturas já concretadas, se não forem devidamente protegidas, podem apresentar lixiviação superficial, fissuras por variação térmica e até falhas no processo de cura do concreto, reduzindo a durabilidade da construção [15].

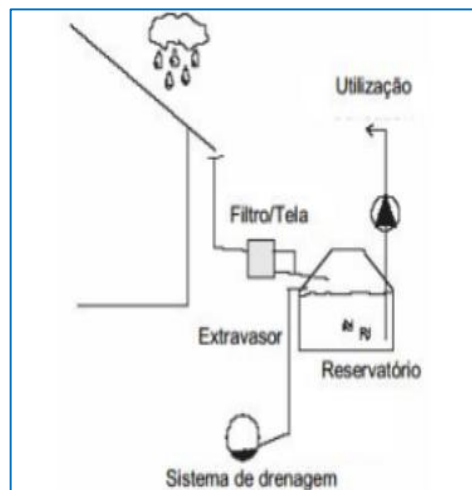
Por fim, a contaminação da água pluvial com resíduos de obra é outro efeito crítico. O contato da chuva com óleos de máquinas, restos de argamassa, solventes e materiais químicos pode gerar efluentes poluídos que, ao serem drenados, impactam solos e corpos receptores. Esse cenário exige a adoção de práticas de gestão de águas pluviais, como bacias de contenção, drenagem provisória e barreiras de contenção de sedimentos, conforme preveem as normas ambientais [16].

A escassez de água potável e a necessidade de gestão sustentável dos recursos hídricos têm incentivado o desenvolvimento de técnicas de aproveitamento de águas pluviais. Esses métodos permitem reduzir a pressão sobre os mananciais tradicionais, promover economia no consumo de água tratada e minimizar problemas relacionados à drenagem urbana. Nesse contexto, diversos sistemas de coleta de água foram estudados e aplicados em diferentes países, adaptados a condições específicas de clima, topografia e infraestrutura.

De acordo com Herrmann e Schmidt (1999) [18], destacam-se quatro principais modalidades de sistemas de captação: Sistema de Fluxo Total, Sistema com Derivação, Sistema com Volume Adicional de Retenção e Sistema com Infiltração no Solo. Esses modelos, embora possuam particularidades técnicas, compartilham a mesma finalidade: captar, armazenar e dar destino adequado à água da chuva, seja para o consumo não potável ou para reduzir impactos hidrológicos nas cidades.

O Sistema de Fluxo Total, apresentado na figura 1, é o mais simples e consiste em direcionar toda a água captada pelos telhados diretamente para o reservatório de armazenamento. Antes, a água passa por telas ou filtros que retêm materiais grosseiros, como folhas e galhos. O excedente do reservatório é conduzido ao sistema de drenagem convencional, evitando transbordamentos. Trata-se de um sistema de fácil implementação, mas que exige atenção quanto à manutenção das barreiras filtrantes para assegurar a qualidade da água armazenada.

Figura 1- Sistema de fluxo total



FONTE: Herrmann e Schmidt (1999)

Já o Sistema com Derivação, da figura 2, também chamado de sistema auto-limpante, tem como diferencial o descarte da primeira chuva captada. Essa porção inicial é considerada mais contaminada por carregar poeiras, partículas e resíduos acumulados nas superfícies de captação. Para isso, instala-se uma derivação na tubulação de descida, que desvia esse volume inicial para a drenagem, podendo ou não contar com filtros auxiliares. O restante da água segue para o reservatório, garantindo melhor qualidade do recurso armazenado.

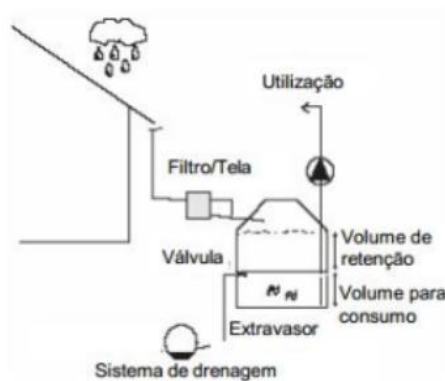
Figura 2 - Sistema com derivação



FONTE: Herrmann e Schmidt (1999)

O Sistema com Volume Adicional de Retenção, mostrado na figura 3, é voltado para situações em que se deseja, além do aproveitamento da água da chuva, contribuir para o controle de enchentes urbanas. Nesse caso, o reservatório é dimensionado para armazenar tanto a demanda necessária quanto um volume extra, destinado a reter picos de precipitação. Uma válvula reguladora libera esse excedente de forma controlada para o sistema de drenagem, reduzindo o risco de alagamentos e sobrecarga das galerias pluviais.

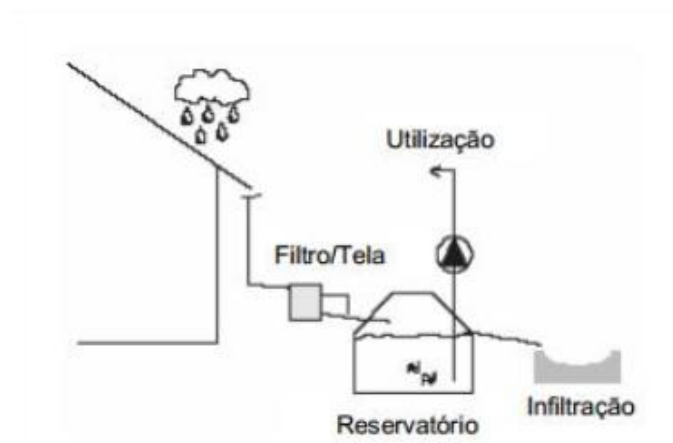
Figura 3 - Sistema com volume adicional de retenção



FONTE: Herrmann e Schmidt (1999)

Por fim, o Sistema com Infiltração no Solo, representado na figura 4, alia o armazenamento para uso não potável com a função de recarga do lençol freático. Após passar por filtros, a água captada é armazenada no reservatório, e o volume excedente é direcionado a estruturas de infiltração, como poços de infiltração ou valas drenantes. Essa prática, além de reduzir a sobrecarga do sistema de drenagem urbana, contribui para manter o equilíbrio hidrológico, especialmente em áreas densamente impermeabilizadas.

Figura 4 - Sistema com Infiltração no Solo



FONTE: Herrmann e Schmidt (1999)

Independentemente do tipo de sistema utilizado, é importante destacar que todos possuem componentes básicos semelhantes: a área de captação (geralmente coberturas), filtros ou telas para remoção de materiais grosseiros, tubulações de condução e reservatórios de armazenamento. A escolha do método mais adequado depende das condições locais, do objetivo do uso da água e das demandas de controle hidrológico urbano.

## 2.2. Sistemas de Drenagem Temporária

### 2.2.1. Poço Caipira

O poço caipira, também conhecido como poço escavado ou cisterna, é uma das formas mais antigas e acessíveis de captação de água subterrânea, sendo amplamente utilizado em áreas rurais e comunidades com restrições de infraestrutura hídrica. Sua principal aplicação está no abastecimento doméstico, irrigação de pequenas lavouras e dessedentação animal, destacando-se pela simplicidade construtiva e pelo baixo custo de execução em comparação com poços tubulares profundos. Dessa forma, ele se apresenta como uma solução prática para comunidades que necessitam de autonomia hídrica.

Além do uso no meio rural, o poço caipira também pode ser aplicado em contextos urbanos de baixa renda, onde a rede de abastecimento público é limitada ou inexistente [19]. A coleta de água subterrânea por meio desse sistema garante um suprimento constante, especialmente em regiões de estiagem prolongada, desde que haja recarga natural adequada do aquífero. Assim, trata-se de uma alternativa complementar para suprir necessidades básicas em locais carentes de infraestrutura de saneamento.

Outra aplicação relevante do poço caipira está ligada ao aproveitamento sustentável dos recursos hídricos locais [20]. Quando bem construído e protegido contra contaminações superficiais, ele pode reduzir a pressão sobre mananciais superficiais e contribuir para a

segurança hídrica regional. Entretanto, é essencial que sejam aplicadas técnicas de vedação e manutenção adequadas para evitar a infiltração de poluentes, garantindo que o recurso coletado esteja em condições seguras para o consumo humano e demais usos.

Nos canteiros de obra, o poço caipira funciona como uma fonte auxiliar de água destinada a atividades operacionais, como preparo de argamassa, cura do concreto, limpeza de ferramentas e até para irrigação de áreas verdes provisórias [21]. Sua utilização reduz a dependência da rede pública de abastecimento e minimiza custos, uma vez que a demanda de água em empreendimentos da construção civil é elevada e contínua. Dessa forma, o poço caipira representa uma alternativa prática e econômica.

O funcionamento ocorre a partir da escavação manual ou mecanizada de um poço de grande diâmetro, revestido com anéis de concreto ou tijolos, que alcança o lençol freático [22]. A água é captada por meio de baldes, bombas de sucção ou motobombas, dependendo da infraestrutura disponível no canteiro. Em obras de menor porte, o processo pode ser totalmente manual, enquanto em projetos de maior escala costuma-se empregar sistemas mecanizados para maior eficiência.

Além disso, é fundamental implementar medidas de proteção sanitária no entorno do poço caipira no canteiro, evitando a contaminação por resíduos de obra, óleos e produtos químicos [23]. Essa preocupação se justifica pela possibilidade de o mesmo manancial ser utilizado por comunidades vizinhas ou até para consumo humano, caso a qualidade da água seja verificada. Assim, o uso do poço caipira em canteiros de obra deve estar aliado a boas práticas de gestão ambiental e de segurança.

### **2.2.2. Poço de Rebaixamento**

O poço de rebaixamento é utilizado principalmente em obras de engenharia civil e mineração, com a finalidade de controlar o nível do lençol freático [24]. Sua aplicação é essencial em fundações profundas, escavações, túneis e outras estruturas que exigem a redução temporária da pressão hidrostática do solo para viabilizar a execução segura dos trabalhos. Ao promover o rebaixamento do aquífero, ele permite a manutenção de áreas secas e estáveis, indispensáveis para a estabilidade da obra.

Esse sistema é frequentemente empregado em locais onde o lençol freático se encontra próximo à superfície, dificultando a execução de atividades construtivas [25]. Além de possibilitar a escavação em solo seco, o poço de rebaixamento contribui para a segurança estrutural da obra, evitando desmoronamentos e a instabilidade do terreno causada pela saturação hídrica. Assim, sua aplicação está diretamente associada à viabilidade técnica e econômica de diversos empreendimentos de médio e grande porte.

Outro aspecto relevante de sua aplicação é a gestão da água bombeada [26]. Em muitos casos, essa água pode ser aproveitada para outros fins, como lavagem de equipamentos, controle de poeira e até para usos não potáveis dentro do próprio canteiro. Portanto, além de cumprir sua função técnica no controle do lençol freático, o poço de rebaixamento pode contribuir para práticas sustentáveis de gestão hídrica nas obras.

O funcionamento do poço de rebaixamento em canteiros de obra se baseia na instalação de poços profundos equipados com bombas submersíveis, que retiram a água do lençol freático e a conduzem para pontos de descarte ou reaproveitamento [27]. O sistema reduz o nível da água subterrânea ao redor da escavação, garantindo que o solo permaneça seco e seguro para a execução de fundações ou outras estruturas. Esse processo é contínuo e pode ser mantido durante toda a fase crítica da obra.

Na prática, o método exige um estudo hidrogeológico prévio, a fim de determinar a quantidade de poços e a potência das bombas necessárias para alcançar o rebaixamento desejado [28]. A água extraída é direcionada por meio de tubulações para reservatórios de sedimentação, valas de drenagem ou para reuso interno no canteiro. O funcionamento eficiente do sistema depende de um monitoramento constante, evitando o retorno do lençol freático ao nível inicial durante a execução dos serviços.

Além disso, a operação do poço de rebaixamento deve considerar aspectos ambientais e legais [29]. O descarte inadequado da água bombeada pode causar erosão, assoreamento de corpos d'água e até contaminação do solo. Portanto, é comum que sejam aplicados sistemas de tratamento ou de controle antes da disposição final da água. Assim, o funcionamento do poço de rebaixamento em canteiros de obra envolve não apenas a parte técnica de bombeamento, mas também práticas de sustentabilidade e conformidade com a legislação ambiental.

### **2.3. Utilização de água não potável em canteiro de Obra**

A utilização de água não potável em canteiros de obras é uma prática cada vez mais difundida no setor da construção civil, alinhada aos princípios de sustentabilidade e eficiência no uso dos recursos hídricos [30]. A água destinada a fins não potáveis pode ser proveniente de diferentes fontes, como águas pluviais, efluentes tratados, águas subterrâneas rasas ou até mesmo a água oriunda de poços de rebaixamento. Seu emprego reduz significativamente a pressão sobre os sistemas públicos de abastecimento e contribui para a redução de custos operacionais.

No contexto dos canteiros, essa água é utilizada em atividades que não exigem qualidade potável, como lavagem de ferramentas, umidificação de vias para controle de poeira, irrigação de áreas verdes temporárias, limpeza de equipamentos e até em processos de compactação do solo [31]. Essa prática evita o desperdício de água tratada de qualidade superior, que pode ser direcionada exclusivamente ao consumo humano. Assim, além de trazer benefícios econômicos, promove uma gestão mais racional dos recursos hídricos durante a execução das obras.

Contudo, para que o uso de água não potável seja viável e seguro, é necessário implementar um sistema de gestão e monitoramento adequado [32]. Isso inclui a separação das redes de distribuição de água potável e não potável, a sinalização correta para evitar usos indevidos, além de análises periódicas da qualidade da água utilizada, garantindo que ela esteja livre de contaminantes que possam comprometer a saúde dos trabalhadores ou prejudicar o desempenho das atividades construtivas. Dessa forma, o uso de água não potável nos canteiros

de obras se consolida como uma prática técnica, ambientalmente responsável e economicamente vantajosa.

## **2.4. Tecnologias de Tratamento Simplificado de Água**

### **2.4.1. Filtração**

A filtração é um processo físico de tratamento de água em que o líquido passa por meios porosos capazes de reter partículas sólidas suspensas [33]. Esse mecanismo é amplamente empregado tanto no abastecimento humano quanto em usos não potáveis, garantindo a remoção de sedimentos, poeira e resíduos que poderiam prejudicar a utilização da água em atividades da construção civil.

Nos canteiros de obra, a filtração é utilizada para melhorar a qualidade da água captada de poços ou da chuva, assegurando que ela não comprometa equipamentos, nem a resistência de materiais como concreto e argamassa [34]. A eficiência do processo depende da manutenção periódica dos filtros, evitando entupimentos e perda de desempenho.

Os filtros de areia são os mais comuns, devido à simplicidade construtiva e ao baixo custo, sendo eficazes na remoção de partículas em suspensão [35]. Já os filtros de carvão ativado são aplicados quando há necessidade de eliminar compostos orgânicos, odores e substâncias químicas que possam prejudicar a utilização da água no preparo de materiais de construção.

Por outro lado, os filtros de membrana, como ultrafiltração e osmose reversa, possuem tecnologia mais avançada, capazes de reter microrganismos e partículas extremamente pequenas [36]. Embora mais caros, podem ser empregados em obras de maior porte que adotam práticas rigorosas de sustentabilidade e reaproveitamento de água.

A água utilizada em canteiros de obra geralmente é armazenada em caixas d'água, cisternas ou reservatórios metálicos, dependendo da demanda e do porte do empreendimento [37]. A escolha do sistema deve considerar a vedação adequada, evitando contaminação por poeira, resíduos ou animais.

O posicionamento dos reservatórios também é fundamental: em locais elevados, para favorecer a distribuição por gravidade, ou próximos a sistemas de bombeamento quando necessário [38]. Além disso, deve-se garantir capacidade de armazenamento suficiente para atender aos períodos de maior consumo da obra.

### **2.4.2. Decantação**

A decantação é um processo físico de tratamento de água que consiste na separação de partículas sólidas em suspensão por meio da ação da gravidade [39]. Quando a água permanece em repouso em tanques ou bacias de decantação, os sólidos mais densos tendem a se depositar no fundo, formando lodo, enquanto a água mais clara permanece na parte superior, podendo seguir para etapas posteriores de tratamento.

Nos canteiros de obra, a decantação é utilizada principalmente para clarificação de águas captadas da chuva, de poços ou provenientes de reuso, reduzindo a turbidez antes de aplicações em processos construtivos [40]. Trata-se de um método simples, econômico e eficiente, que evita que impurezas em excesso prejudiquem o desempenho do concreto, da argamassa e de equipamentos utilizados na obra.

#### **2.4.3. Desinfecção com Cloro ou UV**

A desinfecção com cloro é um dos métodos mais tradicionais, sendo amplamente utilizada pelo baixo custo e pela capacidade de eliminar microrganismos patogênicos presentes na água [41]. Além disso, o cloro possui efeito residual, ou seja, continua agindo por certo período após a aplicação, protegendo a água contra contaminações durante o armazenamento e distribuição.

Já a desinfecção por radiação ultravioleta (UV) baseia-se na emissão de luz em comprimento de onda específico, capaz de inativar vírus, bactérias e protozoários sem adicionar produtos químicos [42]. Apesar de exigir maior investimento em equipamentos, essa tecnologia não altera o sabor ou odor da água e é considerada ambientalmente mais sustentável, sendo uma alternativa viável em canteiros de obras que buscam reduzir impactos ambientais.

#### **2.4.4. Outros métodos de desinfecção**

Além do cloro e da radiação UV, a ozonização é um método de desinfecção que pode ser aplicado em canteiros de obras [43]. O ozônio é um poderoso agente oxidante, capaz de eliminar bactérias, vírus e protozoários de forma muito eficaz. Sua principal vantagem é a rapidez na ação e a ausência de resíduos químicos, pois o ozônio se decompõe em oxigênio após o processo. Apesar disso, a tecnologia requer equipamentos específicos e maior controle operacional, o que pode limitar sua adoção em obras de menor porte.

Outro método alternativo é a desinfecção por radiação solar (SODIS), que utiliza garrafas transparentes expostas à luz solar por algumas horas [44]. Embora simples e de baixo custo, sua aplicação em canteiros é mais viável para pequenas quantidades de água ou em situações emergenciais, já que depende das condições climáticas. Além disso, tecnologias como a utilização de dióxido de cloro e peróxido de hidrogênio também têm sido estudadas como alternativas em projetos de engenharia, principalmente quando se busca eficiência na eliminação de microrganismos sem comprometer a sustentabilidade ambiental.

### **2.5. Bombas Hidráulicas**

#### **2.5.1. Classificação Geral das Bombas**

Segundo White (2011), existem dois tipos básicos de bombas: bombas de deslocamento positivo (*Positive-Displacement Pumps – PDPs*) e bombas dinâmicas (*Dynamic ou Momentum-*

*Change Pumps*) [45]. Estima-se que existam bilhões de unidades de ambos os tipos em uso no mundo atualmente.

### **2.5.2. Bombas de Deslocamento Positivo**

As bombas de deslocamento positivo movimentam o fluido por meio de variações no volume de uma cavidade. Essa cavidade se abre para admitir o fluido pela entrada, em seguida se fecha e comprime o fluido, forçando-o a sair pela saída. Um exemplo natural é o coração humano, e diversas aplicações mecânicas seguem esse princípio [45].

Conforme apresentado em [45], as bombas de deslocamento positivo podem ser classificadas da seguinte forma:

- 1. Recíprocas (Reciprocating)**
  - a. Pistão ou êmbolo (*piston or plunger*)
  - b. Diafragma
- 2. Rotativas (Rotary)**
  - a. Rotor único
  - b. Múltiplos rotores

Todas as bombas de deslocamento positivo fornecem um escoamento pulsante ou periódico, devido ao ciclo de abertura, aprisionamento e compressão do fluido. Sua grande vantagem é a capacidade de bombear praticamente qualquer fluido, independentemente da viscosidade. Contudo, como comprimem mecanicamente o fluido em uma cavidade, podem desenvolver altas pressões em caso de bloqueio na saída, exigindo construção robusta e o uso de válvulas de alívio para evitar danos [45].

### **2.5.3. Bombas dinâmicas**

Já as bombas dinâmicas operam de forma distinta: em vez de comprimir volumes fechados, elas adicionam momento ao fluido por meio de pás ou rotores em alta velocidade. O fluido adquire maior velocidade ao passar pelas passagens abertas e, na saída, essa energia cinética é convertida em aumento de pressão em um difusor [45,46].

Conforme apresentado em [45], a classificação das bombas dinâmicas pode ser feita como segue:

- 1. Rotativas (Rotary / Rotodinâmicas)**
  - a. Centrífuga (fluxo radial)
  - b. Axial
  - c. Misto (entre radial e axial)
- 2. Projetos especiais**
  - a. Bomba a jato ou ejetor
  - b. Bombas eletromagnéticas para metais líquidos
  - c. Bombas fluidicamente acionadas, como *gas-lift* ou aríete hidráulico

Dentre as bombas dinâmicas, o enfoque principal está nas **bombas centrífugas**, que são as mais utilizadas em aplicações de Engenharia. O *Centrifugal Pump Handbook* (Sulzer, 2010) detalha que a popularidade das centrífugas se deve à sua simplicidade construtiva, capacidade de operação contínua e bom rendimento em aplicações de abastecimento de água, saneamento e processos industriais [45,46].

Por outro lado, estudos recentes também destacam as inovações em bombas de deslocamento positivo, principalmente em sistemas de **deslocamento variável**. Pesquisas de Kärnell et al. (2021) mostram que a adoção de sistemas de controle de deslocamento e soluções voltadas para eficiência energética em máquinas móveis pode reduzir o consumo de energia em até 50–60% em comparação a sistemas convencionais de controle por válvula [47].

#### 2.5.4. Critério de Seleção de Bombas

A seleção de bombas hidráulicas deve considerar não apenas as condições de operação do sistema, mas também aspectos econômicos e de manutenção. Os dois parâmetros fundamentais para a escolha são:

- **Vazão (Q):** corresponde ao volume de fluido que deve ser transportado em determinado intervalo de tempo. É calculada a partir do consumo diário previsto, do tempo de operação da bomba e do número de unidades em funcionamento em paralelo [45].
- **Altura Manométrica Total (Hm):** representa a soma do desnível geométrico com as perdas de carga distribuídas e localizadas ao longo da tubulação. Esse valor define a pressão mínima que a bomba precisa vencer para garantir o escoamento adequado [45,46].

Além desses parâmetros principais, também são consideradas as seguintes características ou condições:

- **Características do fluido:** presença de sólidos, viscosidade, temperatura e agressividade química.
- **Condições de sucção:** nível positivo ou negativo, que influenciam diretamente a ocorrência de cavitação.
- **Eficiência energética:** impacto no consumo de energia elétrica ou combustível, considerando o custo do ciclo de vida do equipamento.
- **Manutenção e confiabilidade:** disponibilidade de peças, robustez construtiva e facilidade de reparo.

Segundo Sulzer (2010), a seleção inadequada dos parâmetros citados pode levar a operação fora do ponto de melhor eficiência (*Best Efficiency Point – BEP*), resultando em aumento de vibração, cavitação, desgaste prematuro e consumo excessivo de energia [46]. Dessa forma, critérios técnicos e econômicos devem ser avaliados de forma integrada.

#### 2.5.5. Aplicação em Canteiro de Obras

A seleção de bombas em canteiros de obras deve considerar condições operacionais severas, grande variabilidade de fluidos, necessidade de mobilidade e confiabilidade em ambientes adversos. Segundo Karassik, aplicações típicas demandam escolhas adequadas entre bombas centrífugas, axiais, de fluxo misto ou de deslocamento positivo, conforme a necessidade hidráulica e operacional [48].

- **Drenagem de águas subterrâneas e controle de lençol freático:**

Conforme Karassik, bombas axiais e de fluxo misto são amplamente empregadas em drenagem e irrigação, especialmente em situações de altas vazões e baixas alturas manométricas, características comuns em escavações e fundações. São recomendadas pela capacidade de operar com eficiência em baixas alturas manométricas e manter escoamento contínuo [48].

- **Reaproveitamento de água em reservatórios elevados:**

Bombas centrífugas radiais são indicadas para médias vazões e maiores alturas manométricas, típicas de sistemas que elevam água para reservatórios e redes pressurizadas. Karassik descreve o uso de bombas do tipo *volute* e turbinas verticais para aplicações que exigem bombeamento para níveis superiores [48].

- **Dosagem de aditivos ou recalque de pequenos volumes sob alta pressão:**

Para aplicações que exigem altas alturas manométricas e baixas vazões, como dosagem química, injeção de aditivos ou pressurização localizada, são empregadas bombas de deslocamento positivo. Esse tipo de bomba é indicado por fornecer vazão praticamente constante mesmo sob elevação significativa da pressão de descarga, característica descrita nas aplicações industriais apresentadas no *Pump Handbook* [48].

- **Uso de bombas portáteis em obras:**

Bombas portáteis submersíveis são amplamente utilizadas em operações de drenagem temporária, atendimento emergencial e remoção localizada de água em canteiros de obras. Sua popularidade se deve à facilidade de transporte, instalação rápida e capacidade de operação confiável em ambientes adversos, especialmente em situações em que é necessário esvaziamento imediato de áreas alagadas [48].

Assim, a escolha da bomba em canteiros de obras deve equilibrar demanda hidráulica, robustez mecânica e eficiência energética, considerando sempre a natureza variável e desafiadora do ambiente de construção.

## **2.6. Conceitos de Modularidade Aplicado a Engenharia**

### **2.6.1. Definições e Princípio de Modularidade**

A modularidade pode ser entendida como uma propriedade de projeto que organiza sistemas complexos em unidades menores, relativamente independentes, mas conectadas por interfaces bem definidas. Esses módulos funcionam como blocos de construção que podem ser

desenvolvidos, substituídos ou ampliados de forma isolada, sem comprometer o conjunto [49]. Essa abordagem tem como propósito central tornar a complexidade mais gerenciável, permitindo que diferentes partes do sistema sejam concebidas em paralelo e possam evoluir de maneira flexível [50].

Além de uma característica estrutural, a modularidade também envolve um processo de implementação, a modularização, que estabelece as estratégias de divisão e padronização, garantindo funções claras para cada subsistema e viabilizando integração segura e eficiente [51].

### **2.6.2. Aplicações da modularidade na Engenharia**

Nas áreas da engenharia, a modularidade é aplicada como uma estratégia de organização de sistemas complexos em unidades funcionais independentes, mas integradas. Esse conceito está presente em áreas como manufatura, automotivo, eletrônica, software e construção civil, permitindo estruturar projetos de forma escalável e organizada [49].

A modularidade possibilita que diferentes equipes trabalhem em paralelo no desenvolvimento de subsistemas, reduzindo o tempo de projeto e aumentando a eficiência no processo de engenharia [50]. Além disso, seu uso facilita a gestão de projetos de grande porte, uma vez que cada módulo possui funções bem definidas e pode ser tratado como uma unidade de trabalho independente [51].

### **2.6.3. Benefícios e Implicações**

A adoção da modularidade proporciona uma série de benefícios técnicos e organizacionais. Entre eles destaca-se a flexibilidade para adaptar o sistema a diferentes demandas, acompanhada da redução da complexidade por meio da divisão em subsistemas independentes [49]. O particionamento em módulos gera o que se denomina opções de *design*, permitindo substituições localizadas, experimentação em nível de módulo e evolução incremental, o que reduz riscos e amplia o valor do sistema [50].

Além disso, a modularização favorece a facilidade de manutenção, a padronização de processos, a redução de custos operacionais e a confiabilidade, já que falhas isoladas não comprometem o funcionamento completo [51].

## **2.7. Automação Aplicada ao Controle de Drenagem e Reaproveitamento**

### **2.7.1. Sensores**

Os sensores desempenham um papel essencial nos sistemas automatizados, uma vez que representam o elo entre os fenômenos físicos e os sinais elétricos processáveis por controladores lógicos programáveis (CLPs) e sistemas de supervisão. Um sensor é definido como um dispositivo capaz de converter grandezas físicas, tais como temperatura, pressão, nível, duração,

posição, presença ou ausência, em sinais elétricos como tensão, corrente, frequência ou pulsos [52]. Dessa forma, a utilização de sensores torna possível monitorar e controlar variáveis de processo de maneira contínua, garantindo maior confiabilidade as operações.

No projeto apresentado, destacam-se três categorias: sensores de nível, de vazão e pressão. Os sensores de nível são instalados em reservatórios e caixas de bombeamento, possibilitando o acionamento ou desligamento automático de bombas e evitando transbordamentos ou funcionamento a seco. Os sensores de vazão são utilizados em tubulações de recalque e redistribuição, permitindo acompanhar a vazão projetada e detectar obstruções ou falhas. Já os sensores de pressão são empregados para monitorar a pressão em diferentes trechos da rede, garantindo que o sistema opere dentro dos limites de segurança e possibilitando a identificação de perdas de carga, vazamentos ou anomalias operacionais.

### **2.7.2. Atuadores**

Os atuadores são elementos responsáveis por mover e controlar mecanismos, como no acionamento de válvulas. Para funcionar, necessitam de uma fonte externa de energia, elétrica, hidráulica ou pneumática, e de um sinal de controle, que pode ser enviado por um microcontrolador ou por sinais pneumáticos/hidráulicos auxiliares. A função principal é converter essa energia em movimento mecânico, seja linear ou rotativo [53].

O atuador hidráulico transforma a energia de óleo em movimento linear dentro de um cilindro. Sua principal vantagem é a elevada força de saída, já que o fluido não é compressível. Já o atuador pneumático opera de forma similar, mas utiliza ar comprimido. Apesar de ser limpo e aplicável em diversas indústrias, não atinge forças elevadas devido à compressibilidade do ar [53].

Os atuadores elétricos convertem a energia elétrica em torque rotacional mecânico. São os mais utilizados em aplicações industriais e domésticas, principalmente pelo baixo custo e disponibilidade. Além disso, também existem versões lineares que convertem diretamente a energia elétrica em movimento linear [53].

Por fim, há atuadores mecânicos que não dependem de energia elétrica, como engrenagens e sistemas de corrente e polias, capazes de transformar movimento rotativo em linear. Apesar de simples, continuam sendo empregados em mecanismos de transmissão e controle [53].

A escolha adequada do tipo de atuador depende da fonte de energia disponível, da força necessária para a operação e das características do processo a ser controlado. No sistema em estudo, esses dispositivos são fundamentais para integrar os sinais enviados pelo CLP às ações físicas sobre bombas, válvulas e outros elementos. Dessa forma, os atuadores asseguram a conversão eficiente do comando em movimento, garantindo confiabilidade e precisão na operação do conjunto.

## **2.8. CLP como Unidade de Controle**

O Controlador Lógico Programável (CLP) pode ser considerado como um computador projetado especificamente para o ambiente industrial, com características que permitem sua aplicação em processos de Automação e Controle [54]. De acordo com a definição da IEC (*International Electrotechnical Commission*) [54-55], trata-se de um sistema eletrônico operando digitalmente, projetado para ambientes industriais, que utiliza uma memória programável para armazenar instruções orientadas ao usuário, de modo a implementar funções de lógica, sequência, temporização, contagem e operações aritméticas, controlando diferentes tipos de máquinas e processos por meio de entradas e saídas digitais ou analógicas. A NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) reforça esse conceito, descrevendo o CLP como um equipamento eletrônico digital que utiliza memória programável para armazenar internamente instruções e executar funções de controle, empregando módulos de entrada e saída digitais ou analógicos para atuar sobre processos e sistemas industriais [54,56].

Na prática, o CLP pode ser compreendido como um equipamento de processamento robusto, com interface amigável e grande flexibilidade, capaz de atuar desde tarefas simples, como acionar um motor de ventilador, até processos de elevada complexidade, como o controle de reatores nucleares. Seu funcionamento envolve três elementos básicos: sensores, que convertem grandezas físicas em sinais elétricos; atuadores, que transformam os sinais de saída em ações físicas (como motores, válvulas ou bombas); e o controlador, que processa as entradas e determina as saídas de acordo com a lógica de programação [54].

O CLP possui ampla aplicação em setores industriais diversos, como plásticos, petroquímico, papel e celulose, mineração, alimentos, embalagens, açúcar e álcool, além de automação predial e sistemas de climatização [54]. No entanto, no presente trabalho, o foco de aplicação é direcionado à construção civil, especialmente em obras de edificações, onde o CLP pode atuar no gerenciamento do sistema modular de drenagem e reaproveitamento de água. Essa adaptação reforça sua relevância como solução robusta e confiável frente a microcontroladores, considerando as exigências de ambientes de obra.

No contexto deste projeto, o CLP será responsável por gerenciar os módulos do sistema de drenagem e reaproveitamento de água, realizando a leitura dos sensores, processando os sinais de acordo com a lógica implementada e atuando sobre válvulas e bombas. Além disso, o sistema contará com um supervisor, que permitirá a visualização em tempo real das variáveis de processo, o acompanhamento do desempenho do sistema e a geração de alarmes ou relatórios de operação. Essa integração garante não apenas a automação eficiente e confiável do processo, mas também maior monitoramento, rastreabilidade e capacidade de intervenção, alinhando-se às demandas de sustentabilidade e otimização de recursos na construção civil. Outros detalhes sobre a proposta de uso do CLP para drenagem e reaproveitamento hídrico são apresentados no capítulo seguinte.

### **2.8.1. Lógica de Controle e Programação**

A lógica de programação adotada neste projeto será baseada predominantemente na Linguagem Ladder, podendo ser complementada pelo uso de Texto Estruturado, implementado na forma de blocos de função, conforme estabelecido pela norma IEC 61131-3 [56].

A Linguagem Ladder apresenta diversas vantagens, como a rápida adaptação do pessoal técnico, em razão de sua semelhança com diagramas elétricos baseados em relés; a facilidade de recomposição do diagrama a partir do programa; a visualização clara dos estados das variáveis; além de documentação simplificada, simbologia padronizada e ampla aceitação na indústria.

Em contrapartida, essa linguagem apresenta limitações quando aplicada a programas extensos ou com lógicas mais complexas, bem como maior dificuldade de compreensão por programadores sem experiência prévia em sistemas a relés e menor agilidade na edição, quando comparada a outras linguagens [56]. Dessa forma, em determinadas situações, optou-se pelo uso do Texto Estruturado, a fim de facilitar a implementação da lógica, organizar o código em blocos funcionais e melhorar a compreensão do programa por parte dos desenvolvedores.

## 2.9. Sistema de Controle em Malha Fechada

Sistemas de controle em malha fechada representam uma das estruturas fundamentais da teoria de Controle Moderno. Nessa configuração, a variável controlada é continuamente medida e comparada com um valor de referência, produzindo o sinal de erro que orienta a ação do controlador [57]. Segundo Dorf e Bishop, a característica central desse tipo de sistema é justamente o uso da realimentação para comparar funções das variáveis de saída e utilizar a diferença como meio de controle, permitindo correção automática diante de perturbações e incertezas [57].

A representação matemática básica de um sistema em malha fechada é definida pela função de transferência:

$$T(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

obtida pela redução de diagramas de blocos envolvendo o caminho direto e o laço de realimentação [57]. Essa relação estabelece como a dinâmica do sistema resulta da interação entre o processo, o sensor e o controlador, evidenciando a importância da realimentação negativa para estabilidade e precisão.

### 2.9.1. Controlador PID

Entre as estruturas mais empregadas em sistemas realimentados está o controlador proporcional–integral–derivativo (PID). Dorf e Bishop apresentam o controlador PID na forma:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

No entanto, o controlador PID também pode ser expresso em sua forma **tempo–baseada**, na qual os parâmetros integral e derivativo são representados pelos tempos  $T_i$  (tempo integral) e  $T_d$  (tempo derivativo). Essa formulação é apresentada de maneira explícita por Åström e Hägglund no Capítulo 3.4, onde o controlador é escrito como:

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Onde:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}$$

$$K_d = K_p \cdot T_d$$

Assim, o controlador PID pode ser convenientemente representado tanto nos parâmetros ( $K_p, K_i, K_d$ ) usados por Dorf e Bishop, quanto nos parâmetros ( $K_p, T_i, T_d$ ) utilizados extensivamente no projeto e análise de controladores conforme Åström & Hägglund [58]. Essa representação evidencia que:

- A ação proporcional ajusta a rapidez da resposta;
- A ação integral elimina o erro em regime permanente;
- A ação derivativa aumenta o amortecimento e melhora o comportamento transitório.

### 2.9.2. Método de Sintonia dos Parâmetros PID

Dentre os métodos clássicos de sintonia de controladores PID, destaca-se o método de Ziegler–Nichols baseado no ganho crítico. O procedimento consiste em anular as ações integral e derivativa ( $K_i=0$ ,  $K_d=0$ ) e elevar o ganho proporcional até que o sistema atinja oscilações sustentadas. O ganho correspondente é denominado ganho último ( $K_u$ ), enquanto o período das oscilações é chamado período último ( $T_u$ ) [57].

A partir desses valores, são aplicadas regras empíricas para determinar parâmetros adequados para controladores P, PI ou PID, conforme tabela apresentada pelos autores [57]. Considerando ainda a formulação tempo–baseada discutida por Åström e Hägglund no Capítulo 3.4, os tempos integral e derivativo podem ser obtidos diretamente a partir das relações clássicas de Ziegler–Nichols:

Tabela 1 - Sintonia controlador PID

| <i>Tipo do Controlador</i>                   | <i>K<sub>p</sub></i> | <i>K<sub>i</sub></i>   | <i>K<sub>d</sub></i>    |
|----------------------------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|
| <i>Proporcional(P)</i>                       | $0,5 \cdot K_u$      | -                      | -                       |
| <i>Proporcional-Integral(PI)</i>             | $0,45 \cdot K_u$     | $\frac{0,54 K_u}{T_u}$ | -                       |
| <i>Proporcional-Integral-Derivativo(PID)</i> | $0,6 \cdot K_u$      | $\frac{1,2 K_u}{T_u}$  | $\frac{0,6 K_u T_u}{8}$ |

Fonte: Ziegler-Nichols PID Controller Gain Tuning Using Closed-loop Concepts

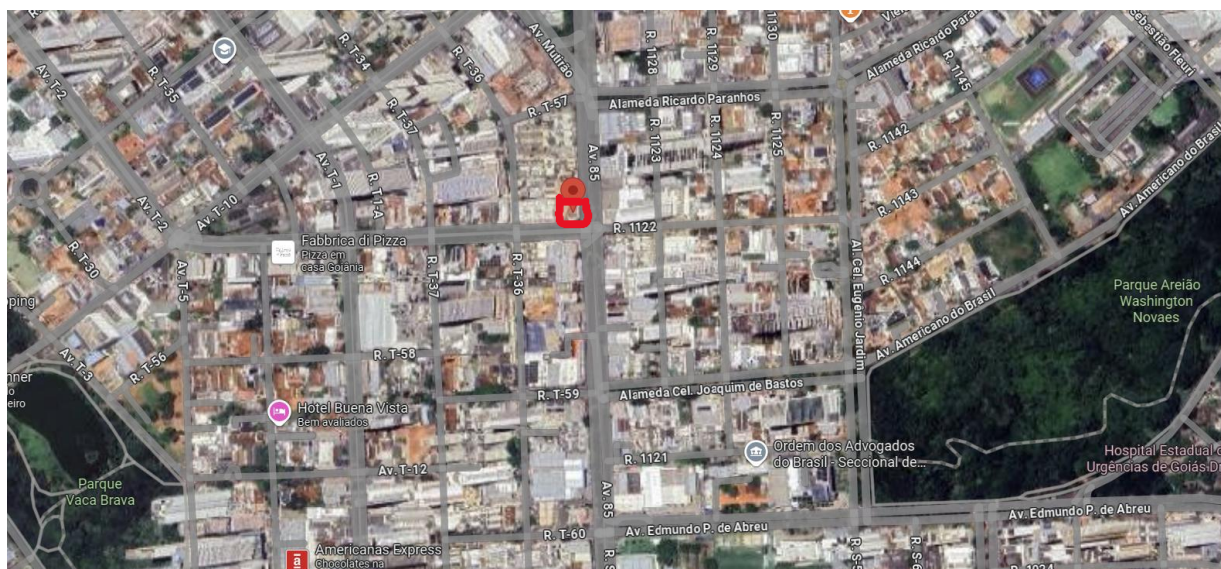
Essas relações permitem converter diretamente o método do ganho crítico para a forma tempo-baseada do controlador PID apresentada em Åström & Hägglund [58], garantindo coerência entre as formas de sintonia e o modelo algébrico do controlador.

### 3. PROPOSTA DE SISTEMA AUTOMATIZADO

#### 3.1. Local e Condições de Instalação

O sistema foi concebido para aplicação em uma obra comercial de grande porte, localizada na região do Setor Bueno em Goiânia (GO), nas proximidades de dois parques urbanos com lagos e cursos d'água naturais, mostrado na figura 5. A área também está situada próxima a uma das avenidas mais movimentadas da cidade, caracterizada por intenso tráfego de veículos, edificações verticais e infraestrutura urbana consolidada.

Figura 5 - Localização da obra



Fonte: Google Maps

Esse contexto impõe desafios específicos ao projeto, principalmente no que se refere à gestão de águas subterrâneas e pluviais, ao controle de impactos ambientais e à segurança operacional durante a execução da obra. A proximidade com córregos e corpos d'água exige atenção especial ao rebaixamento do lençol freático e ao descarte controlado das águas drenadas, de modo a evitar contaminações ou sobrecarga do sistema público de drenagem.

O ambiente urbano também demanda soluções compactas, modulares e de fácil manutenção, capazes de operar em espaços restritos e sob condições ambientais variáveis — como períodos de chuva intensa e altas temperaturas típicas da região. Por isso, o sistema proposto adota uma configuração automatizada e flexível, permitindo o armazenamento temporário da água para posterior reuso e o descarte seguro quando necessário.

Os equipamentos elétricos e hidráulicos devem possuir grau de proteção IP adequado e resistência à umidade e poeira, além de instalação em locais de fácil acesso para inspeção. A automação via CLP garante a operação estável e o monitoramento constante das condições do sistema, reduzindo riscos de falha humana e aumentando a eficiência energética.

Em termos de sustentabilidade, a implantação do sistema nesta obra contribui diretamente para:

- Redução do consumo de água potável, por meio do reuso em atividades não potáveis da construção;
- Diminuição do impacto hídrico local, evitando o descarte excessivo de águas drenadas nos córregos próximos;
- Melhoria da eficiência operacional da obra, com menor dependência de abastecimento externo e menor interferência nas redes públicas.

Esses fatores demonstram a viabilidade técnica e ambiental do sistema automatizado proposto, alinhando-se às boas práticas de engenharia sustentável e à responsabilidade socioambiental em áreas urbanas sensíveis.

### **3.2. Etapas do projeto**

#### **3.2.1. Levantamento de requisitos Técnicos**

O projeto tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema automatizado de drenagem, armazenamento e reuso de águas provenientes do rebaixamento do lençol freático e da captação pluvial em canteiros de obras.

Nesta etapa, foram levantadas as necessidades funcionais do sistema, considerando as seguintes funções principais: drenagem subterrânea, armazenamento temporário, controle de nível, reuso em atividades de obra (como cura de concreto, descarga em banheiros e lavagem de equipamentos) e descarte controlado.

Foram definidas as variáveis a monitorar, incluindo:

- Nível de reservatórios e poços de rebaixamento;
- Vazão de entrada e saída dos módulos de bombeamento;
- Pressão de entrada e saída;
- Estado de operação das bombas e válvulas.

Nos requisitos de automação, propõe-se o uso de Controlador Lógico Programável (CLP) integrado a sensores de nível, sensores de vazão e pressão, válvulas solenoides e bombas centrífugas. A automação permitirá o controle em malha fechada, otimizando o consumo energético e garantindo a operação segura e contínua.

Os critérios de desempenho e sustentabilidade incluem alta eficiência hidráulica, baixo consumo de energia, menor possibilidade de falhas, manutenção simplificada e possibilidade de reuso da água.

As instalações elétricas e de potência das bombas foram dimensionadas considerando a operação de um edifício de 30 pavimentos, com uma altura manométrica total aproximada de 90 metros de coluna d'água (m.c.a.), incluindo as perdas de carga distribuídas e localizadas nas

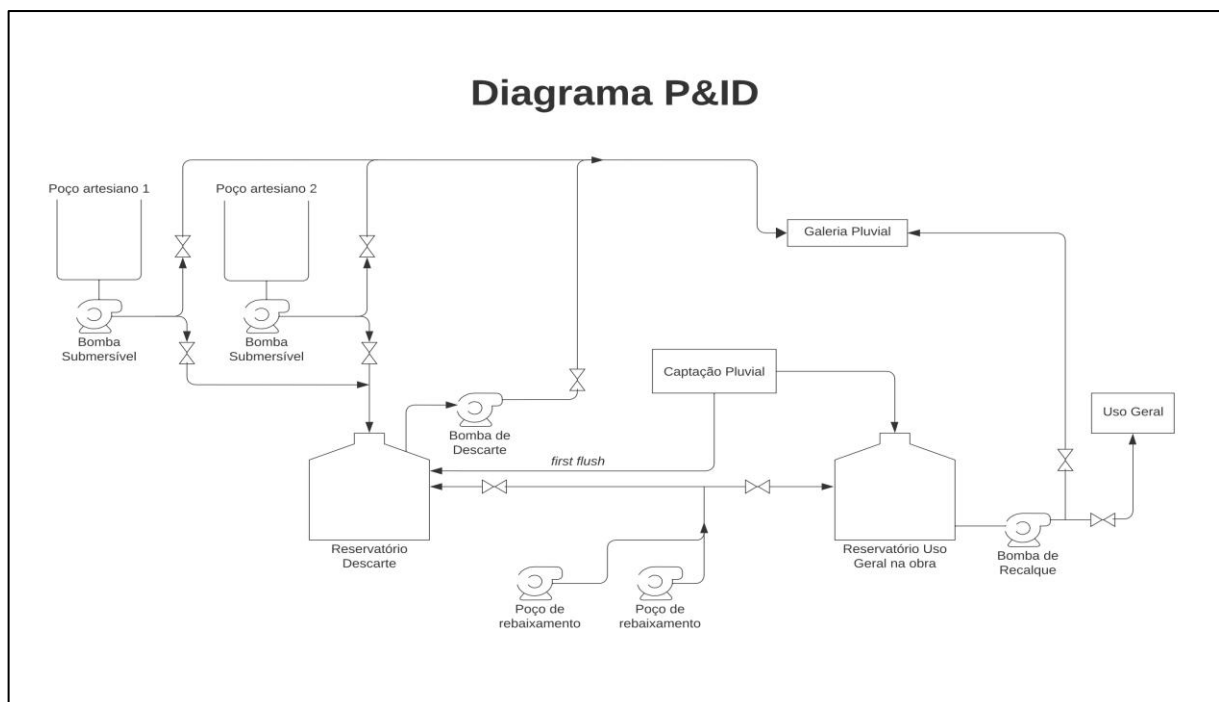
tubulações, válvulas e conexões. Esse dimensionamento garante que o sistema seja capaz de atender adequadamente todas as demandas hidráulicas da obra, desde a fase inicial de fundação até a conclusão da estrutura e acabamentos. As proteções elétricas, seccionamentos e comandos foram projetados de forma a suportar o acionamento simultâneo de múltiplas bombas, assegurando a seletividade e a confiabilidade do sistema em condições de operação contínua.

Além disso, o projeto contempla o uso de diferentes tipos de bombas, selecionadas conforme a função e o estágio da obra. Para o rebaixamento do lençol freático, foram especificadas bombas submersas, para os poços caipiras, foram utilizadas bombas submersíveis de alta resistência, adequadas para operação em ambientes saturados e com partículas em suspensão. Já para o recalque e distribuição entre reservatórios, optou-se por bombas centrífugas, capazes de fornecer maior pressão e vazão controlada, atendendo à elevação total do edifício. Em etapas intermediárias e de reuso, podem ser empregadas bombas periféricas e de superfície, otimizando o consumo energético e a manutenção do sistema. Dessa forma, o conjunto de soluções garante flexibilidade operacional, eficiência hidráulica e segurança elétrica ao longo de todas as fases da construção.

### 3.2.2. Projeto do Sistema de Drenagem e Armazenamento:

O sistema hidráulico proposto é composto por poços de rebaixamento e poços artesianos conectados por uma rede de tubulações até reservatórios intermediários e finais, conforme detalhado no P&ID básico da figura 6:

Figura 6 - Diagrama P&ID



Fonte: Autor próprio.

O sistema proposto tem como objetivo principal integrar a drenagem subterrânea e pluvial, permitindo que a água captada seja direcionada de acordo com as condições operacionais e as necessidades do processo. Dessa forma, o sistema é capaz de armazenar, reutilizar ou descartar a água de maneira automatizada e eficiente.

A lógica hidráulica prevê três etapas principais:

1. Captação – A água é coletada a partir de poços de rebaixamento e de captação pluvial, conectados por tubulações subterrâneas.
2. Direcionamento – De acordo com os parâmetros de nível e qualidade monitorados pelos sensores, o CLP define automaticamente o destino da água, podendo direcioná-la para o reservatório de armazenamento ou encaminhá-la diretamente para o descarte.
3. Armazenamento e reuso – Quando os níveis dos reservatórios estão dentro dos limites pré-estabelecidos, a água é conduzida ao reservatório de uso geral da obra, sendo reutilizada em atividades não potáveis, como cura do concreto, lavagem de equipamentos e umidificação de vias internas.
4. Descarte – Quando a qualidade da água não atende aos parâmetros estabelecidos ou o reservatório atinge o limite máximo de nível, o sistema realiza o descarte controlado para a galeria pluvial, garantindo segurança e conformidade ambiental.

### **3.2.3. Projeto do Sistema de Controle Automatizado**

O controle automatizado será realizado por um CLP, responsável por interpretar os sinais de sensores e atuar sobre válvulas e bombas. O fluxo de sinais segue a lógica de malha fechada, na qual o nível dos reservatórios é constantemente monitorado. Ao atingir limites predefinidos, o CLP aciona automaticamente as bombas ou válvulas correspondentes.

Um sistema supervisorio simplificado (SCADA) pode ser incorporado para monitoramento remoto, permitindo a visualização em tempo real de níveis, estados de válvulas e alertas de manutenção. Essa interface pode ser implementada via painel local ou conectividade via rede industrial.

### **3.2.4. Montagem Conceitual do Sistema Modular:**

O sistema é proposto de forma modular, dividido em:

- Módulo de Drenagem (poços artesianos e poços de rebaixamento);
- Módulo pluvial (direcionamento da água da chuva)
- Módulo de Armazenamento (reservatórios de descarte e uso geral);
- Módulo de Controle (CLP, sensores e sistema supervisorio).

Essa modularidade facilita a manutenção, a ampliação da capacidade e a adaptação a diferentes portes de obra. Os módulos são interligados por tubulações e sistemas de controle elétrico padronizados, garantindo escalabilidade e replicabilidade em diferentes locais de implantação.

### **3.2.5. Testes e Avaliação de Desempenho (Conceitual)**

Os testes de desempenho serão planejados de forma conceitual e simulada, por meio de softwares de automação.

Os parâmetros de avaliação incluem:

- Eficiência hidráulica (vazão x consumo energético);
- Monitoramento de variáveis;
- Os critérios de aceitação consideram a operação automática estável, com mínima intervenção manual, consumo energético otimizado e conformidade com normas ambientais e de segurança.

## **3.3. Materiais e Equipamentos Utilizados**

### **3.3.1. Controlador Lógico Programável (CLP)**

O Controlador Lógico Programável Siemens S7-1500 é um equipamento da linha SIMATIC produzida pela Siemens, projetado para aplicações que exigem alto desempenho, confiabilidade e precisão no processamento de sinais. Ele opera por meio de uma CPU de alta velocidade, capaz de executar instruções em ciclos extremamente reduzidos, garantindo respostas rápidas aos eventos do processo. Sua arquitetura modular permite a expansão por meio de diversos tipos de módulos, como entradas e saídas digitais, analógicas, módulos de comunicação e controladores de movimento, tornando-o adaptável a sistemas de diferentes complexidades. Além disso, o S7-1500 possui diagnóstico integrado, display frontal para monitoramento local, suporte nativo a protocolos industriais como Profinet e Profibus, recursos avançados de segurança, e compatibilidade com as linguagens definidas na norma IEC 61131-3, como Ladder, FBD e Texto Estruturado. Esses recursos tornam o S7-1500 uma solução robusta para ambientes agressivos e processos que demandam alta disponibilidade.

No projeto, o CLP S7-1500 atua como o elemento central da automação, responsável por receber sinais dos sensores instalados nos poços, reservatórios e tubulações, processar essas informações em tempo real e comandar os atuadores do sistema. Isso inclui o acionamento das bombas, a operação das válvulas motorizadas e o controle avançado da bomba de recalque por meio de uma malha PID implementada no inversor de frequência. O CLP interpreta variáveis como nível, pressão, vazão e qualidade da água, tomando decisões automáticas para direcionar o fluxo hídrico, prevenir transbordamentos, manter a pressão adequada no sistema e garantir o abastecimento contínuo das etapas da obra. Sua capacidade de comunicação permite ainda

integração direta com o supervisório, onde o operador visualiza o estado do sistema, recebe alarmes, consulta históricos e intervém quando necessário. Assim, o S7-1500 confere inteligência, confiabilidade e eficiência ao processo, garantindo que o sistema modular funcione de maneira segura e otimizada ao longo de toda a construção.

Figura 7 - CLP S7-1500



Fonte: Catálogo Simatic s7-1500 - jul21

### 3.4. Instalações Elétricas

Para o sistema elétrico do projeto foi adotada a instalação de um quadro individual para cada bomba, considerando que esses equipamentos geralmente se encontram distribuídos pelo canteiro e não centralizados em um único ponto físico. Essa estratégia permite facilitar a manutenção, reduzir o comprimento dos cabos de potência e garantir maior segurança operacional. Todos os quadros são alimentados a partir do QGBT, que fornece a tensão trifásica de 380 V responsável por suprir as bombas submersíveis dos poços caipiras e de rebaixamento, bem como a bomba de recalque. Cada quadro foi equipado com um conjunto padrão composto por disjuntor-motor, contator e bornes de sinalização, seguindo o conceito modular do sistema.

As bombas dos poços caipiras, com potência de 7,5 cv, e as bombas dos poços de rebaixamento, de 5 cv, utilizam partida direta, conforme as características hidráulicas e elétricas do sistema. Para essas unidades, foram instalados disjuntores-motor ajustados de acordo com as correntes nominais calculadas: aproximadamente 11,6 A para as bombas de 7,5 cv e 7,7 A para as bombas de 5 cv. Assim, foram especificados disjuntores-motor de 16 A e 10 A, respectivamente, garantindo proteção adequada contra sobrecarga e curto-circuito. Cada bomba conta também com uma contatora dimensionada segundo sua corrente de regime, permitindo o acionamento automático via CLP e assegurando seletividade entre os circuitos.

A bomba de recalque, responsável pelo transporte da água para o reservatório superior ou para redistribuição no canteiro, possui potência de 10 cv e requer maior controle operacional em função da variação de vazão e pressão. Por esse motivo, o seu acionamento não é realizado por partida direta, mas por meio de um inversor de frequência. Esse dispositivo permite o controle gradual da velocidade do motor, reduzindo correntes de partida, otimizando o consumo energético e possibilitando ajustes automáticos comandados pelo CLP conforme os níveis dos reservatórios. A corrente nominal calculada para essa bomba é de aproximadamente 15,5 A, resultando na escolha de um disjuntor-motor de 20 A.

O dimensionamento dos cabos de potência seguiu as correntes nominais dos motores e os critérios da NBR 5410, considerando queda de tensão, temperatura ambiente e condições de instalação. Para as bombas de 5 cv e 7,5 cv, foram cabos de 4 mm<sup>2</sup>; e para a bomba de recalque, cabos de 6 mm<sup>2</sup>. Nos poços caipiras e poços de rebaixamento foram utilizados cabos submersíveis apropriados, com isolamento reforçado e proteção contra entrada de água. Todo o sistema conta com aterramento adequado, identificação padronizada e dispositivos de proteção devidamente coordenados, garantindo segurança, eficiência e confiabilidade ao conjunto.

#### **3.4.1. Bombas**

As bombas submersíveis de 7,5 cv, mostradas na figura 8, foram instaladas nos poços caipiras para capturar a água proveniente do afloramento subterrâneo. Esse modelo de bomba é projetado para operar totalmente imerso, permitindo maior eficiência na sucção e reduzindo o risco de cavitação. Elas são responsáveis por elevar a água diretamente do poço para o reservatório intermediário, garantindo um fluxo contínuo mesmo em condições de grande volume de infiltração no solo.

Figura 8 - Bomba submersível



Fonte: [www.safrairrigacao.com.br](http://www.safrairrigacao.com.br)

Nos poços de rebaixamento do lençol freático, foram utilizadas bombas submersíveis de 5 cv (figura9), adequadas para operação contínua em ambientes saturados. Seu objetivo é manter o nível do lençol freático abaixo da cota de escavação, evitando instabilidade do solo e acúmulo de água durante a execução da obra. Esse tipo de bomba é robusto, possui alta durabilidade e consegue operar mesmo na presença de partículas finas em suspensão.

Figura 9- Bomba submersa



Fonte: [www.safrairrigacao.com.br](http://www.safrairrigacao.com.br)

A bomba de recalque, representada na figura 10, com potência de 10 cv, é responsável por transportar a água armazenada para o reservatório superior ou para redistribuição no canteiro. Diferente das demais, ela é acionada por um inversor de

frequência, permitindo controle preciso da vazão e da pressão conforme a demanda. Esse tipo de bomba garante maior eficiência energética, reduz desgaste mecânico e possibilita operação estável em diferentes condições de consumo.

Figura 10 - bomba centrífuga



Fonte: [www.safrairrigacao.com.br](http://www.safrairrigacao.com.br)

## 4. FUNCIONAMENTO DO SISTEMA AUTOMATIZADO

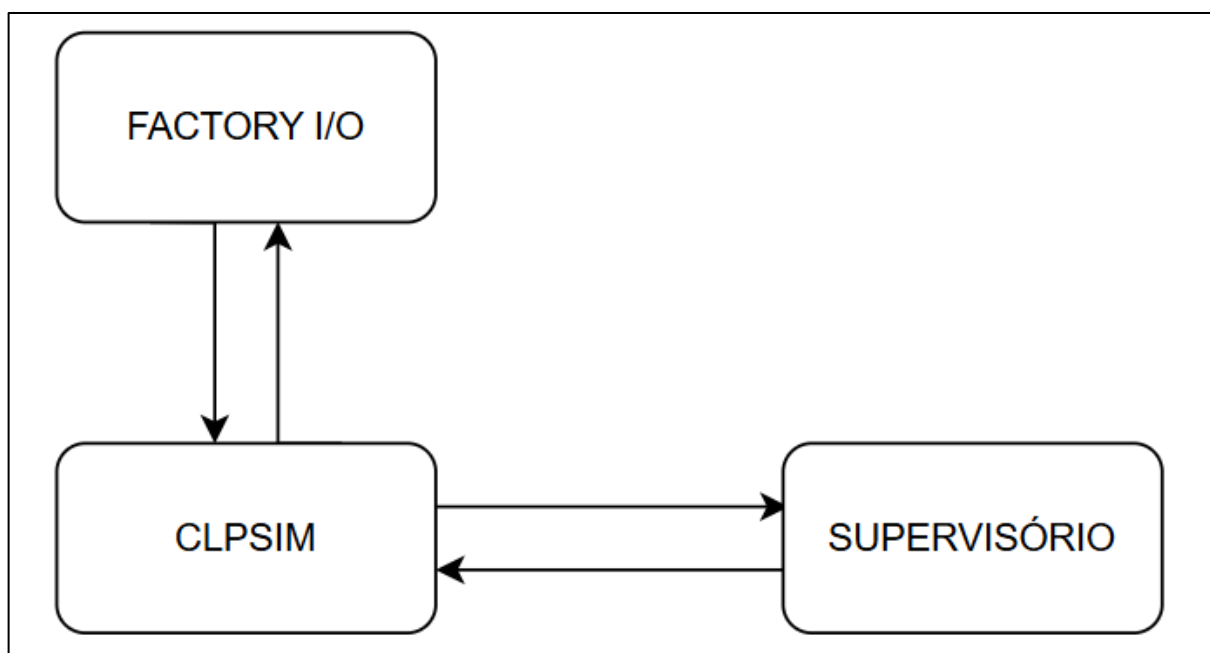
### 4.1. Arquitetura do Sistema

A arquitetura do sistema automatizado foi desenvolvida em formato modular, permitindo a integração entre diferentes subsistemas responsáveis pela drenagem, armazenamento, reuso e descarte de água no canteiro de obras. Cada módulo é representado graficamente no supervisório e é controlado pelo CLP por meio de uma lógica estruturada. A arquitetura foi planejada de forma a garantir confiabilidade operacional, escalabilidade e facilidade de manutenção. A conexão entre os equipamentos é realizada conforme apresentado na Figura 11, na qual o CLP se comunica com o Elipse por meio da rede Ethernet, enquanto a comunicação com o *Factory I/O* é estabelecida via comunicação serial.

O *Factory I/O* é um software comercial que dispõe de uma versão estudantil e é utilizado para a simulação de ambientes industriais. Sua principal vantagem é a capacidade de reproduzir, de forma fiel, situações próximas às encontradas em ambientes industriais reais, além de permitir a simulação de comunicação com CLPs, tanto físicos quanto simulados.

O sistema supervisório foi desenvolvido no software Elipse, que também é uma ferramenta comercial. Em sua versão demonstrativa, o software permite a utilização de todos os recursos por um período de até duas horas, sendo a principal limitação a disponibilidade de apenas 25 entradas na versão demo. O Elipse é destinado à criação de sistemas supervisórios, oferecendo suporte a diversos métodos e protocolos de comunicação. Neste trabalho, a comunicação foi realizada com o CLPsim por meio da rede Ethernet.

Figura 11 - Arquitetura do sistema



Fonte: Autor próprio.

#### a) Módulo de Controle e Supervisão

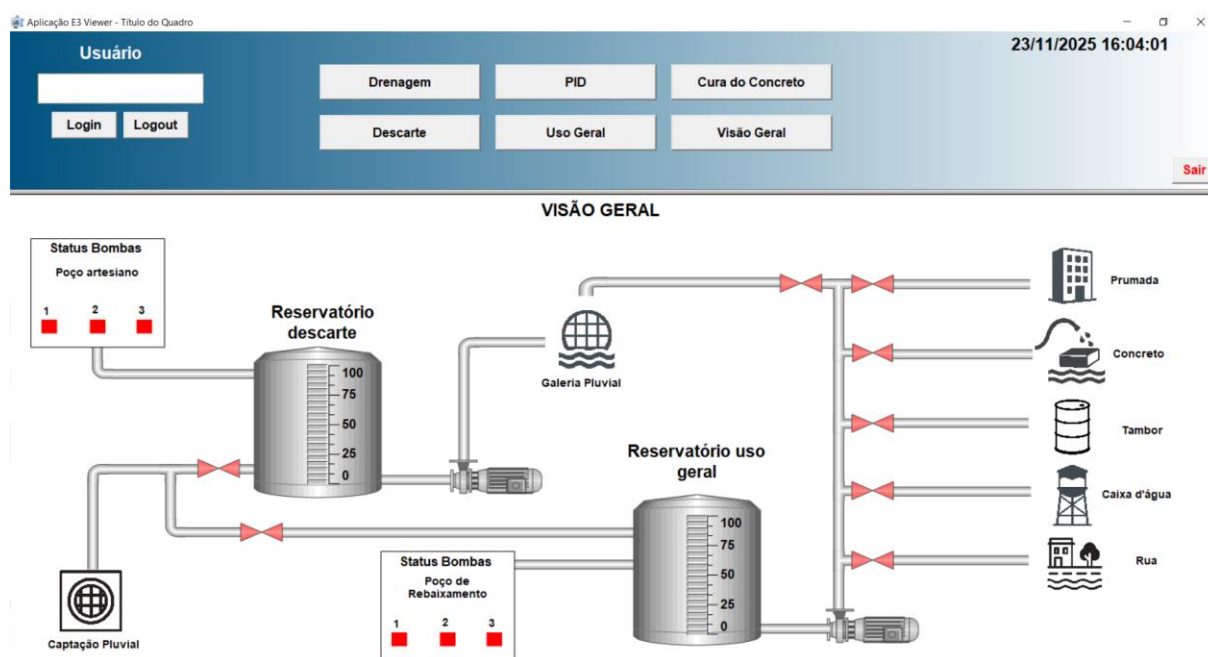
O CLP interliga todos os módulos por meio de:

- entradas analógicas (nível, pressão, vazão),
- entradas digitais (estados dos sensores),
- saídas digitais (acionamento de bombas e válvulas),
- saídas analógicas (controle PID).

O supervisor é responsável pela visualização completa do sistema, permitindo:

- monitoramento em tempo real dos níveis, fluxos e estados dos equipamentos;
- acionamento manual ou automático das rotinas;
- indicação de falhas ou alarmes;
- software de agendamento (timer);
- ajuste de parâmetros operacionais.

Figura 12 – Módulo controle e monitoramento



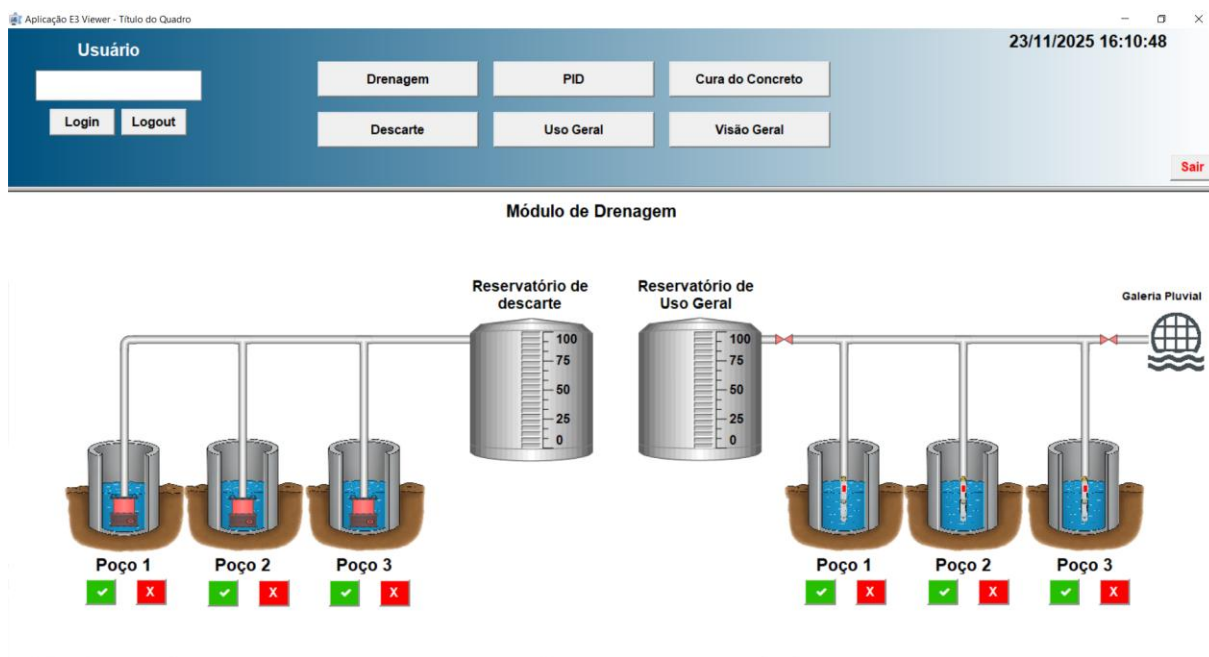
Fonte: autor próprio

#### b) Módulo de drenagem

O módulo de drenagem integra os poços de rebaixamento e poços artesianos, cada um contendo:

- bomba submersível dedicada,
- sensores de nível,
- tubulação individual conectada a um coletor hidráulico,
- indicação de habilitação/estado da bomba no supervisor.

Figura 13 - Módulo drenagem



Fonte: Autor próprio

As telas do sistema demonstram que cada poço é monitorado individualmente, permitindo que o CLP selecione automaticamente quais bombas devem operar em função do nível detectado. Esse módulo garante a retirada contínua da água subterrânea, prevenindo alagamentos e instabilidade do solo.

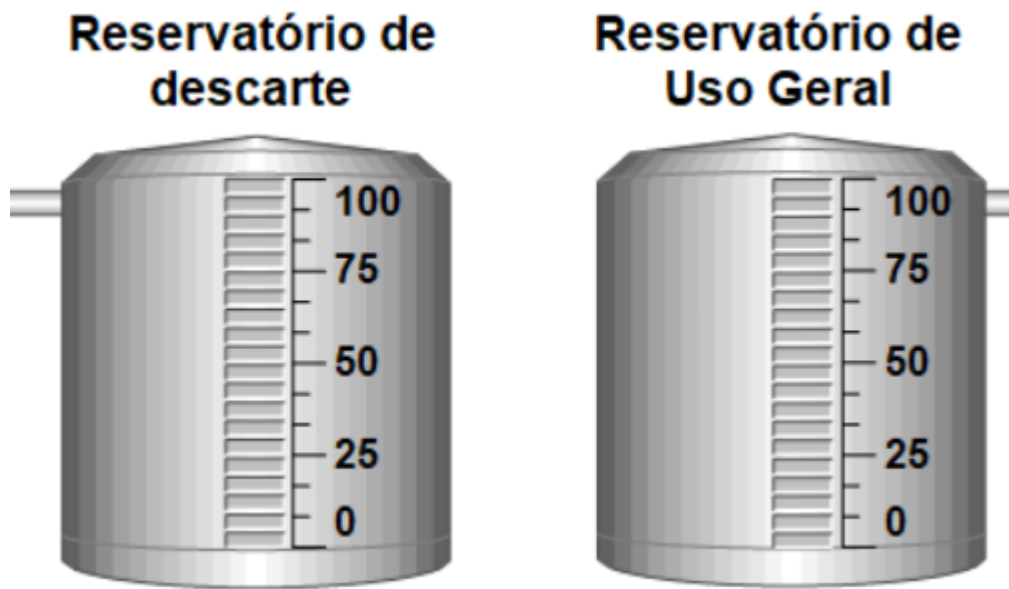
#### c) Módulo de armazenamento

A arquitetura conta com dois reservatórios principais:

1. Reservatório de descarte, destinado à água que não atende aos requisitos de qualidade ou excede a capacidade do sistema.
2. Reservatório de uso geral, que armazena a água reaproveitável utilizada nas atividades da obra (cura de concreto, limpeza, abastecimento de tambores, prumadas, entre outros).

Ambos os reservatórios são representados no supervisório com indicadores gráficos de nível, permitindo visualização precisa do volume armazenado. O CLP gerencia automaticamente o bombeamento entre os reservatórios com base nas rotinas de controle.

Figura 14 - Módulo de armazenamento



Fonte: Autor próprio

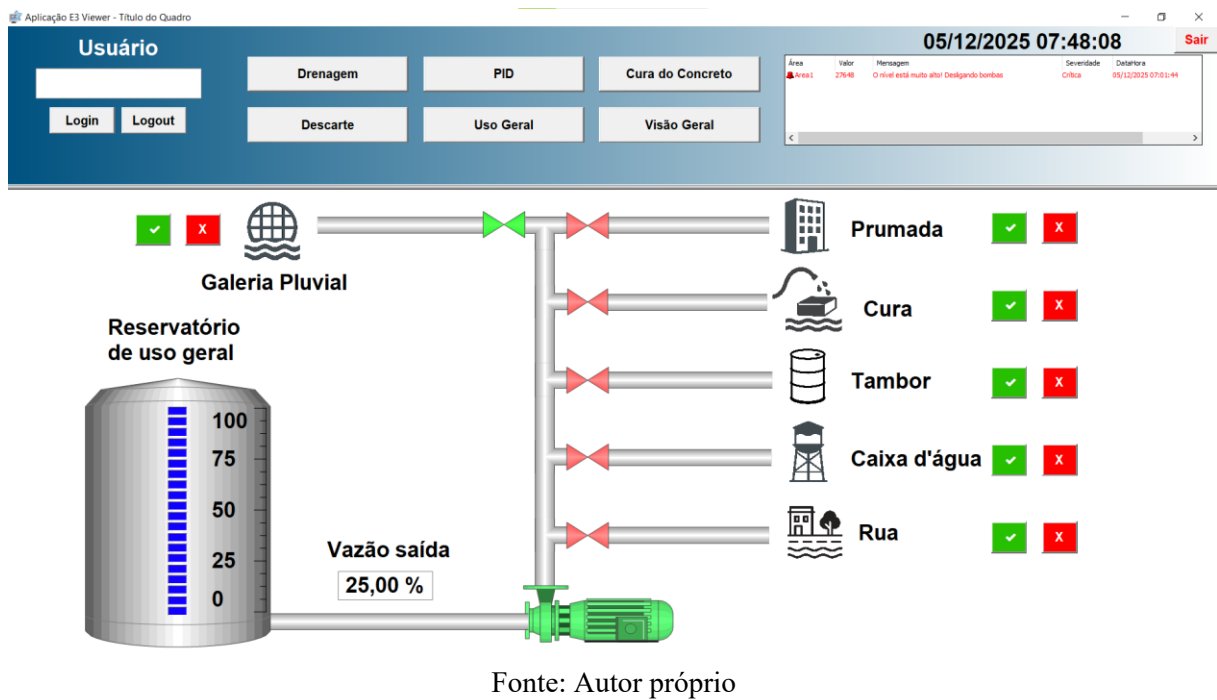
#### d) Módulo de reuso

A distribuição da água reaproveitada é realizada a partir do reservatório de uso geral. A arquitetura prevê múltiplos pontos de consumo:

- tubulação de prumada,
- sistema de cura de concreto,
- abastecimento de tambores,
- caixa d'água da obra,
- Lavagem de equipamentos e calçada (rua).

A interface gráfica contém válvulas solenoides individuais para cada destino, permitindo ao operador habilitar ou bloquear fluxos de forma seletiva. O CLP verifica a disponibilidade de água antes de liberar qualquer saída.

Figura 15 - Módulo de reuso



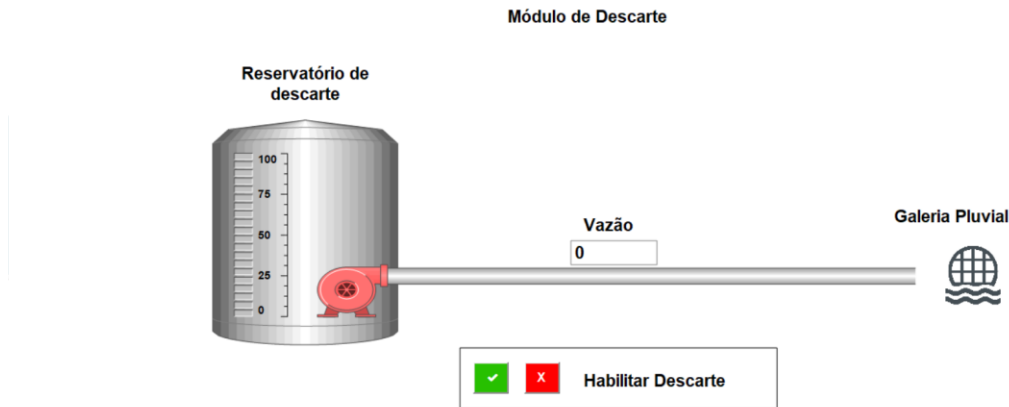
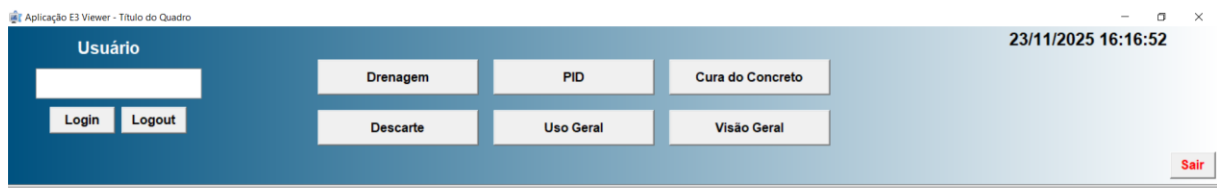
e) Módulo de descarte

Quando o sistema identifica excesso de água nos reservatórios, o módulo de descarte é ativado. Ele inclui:

- bomba exclusiva para descarga,
- tubulação de envio para a galeria pluvial,
- válvula de bloqueio,
- botão de habilitação do descarte no supervisão,
- indicador de vazão.

Esse módulo assegura que o descarte seja sempre controlado.

Figura 16 - Módulo de descarte



Fonte: Autor próprio

#### f) Fluxo geral da arquitetura

Com base nas telas apresentadas, o fluxo operacional da arquitetura pode ser resumido como:

1. **Captação** → Água entra pelos poços.
2. **Drenagem** → CLP aciona bombas conforme o nível.
3. **Direcionamento** → Água segue para reuso ou descarte segundo qualidade e níveis.
4. **Armazenamento** → Reservatórios monitorados em tempo real.
5. **Distribuição** → Válvulas solenoides liberam água para os pontos desejados.
6. **Descarte controlado** → Ativado automaticamente quando necessário.
7. **Supervisão completa** → Supervisório mostra o estado global do sistema.

Essa arquitetura garante um sistema robusto, escalável e com total autonomia operacional.

### 4.2. Programação CLP

A programação do CLP foi desenvolvida no ambiente Siemens TIA Portal, utilizando uma CPU S7-1500, a linguagem principal utilizada foi a linguagem ladder, porém em alguns casos mais complexos, onde a linguagem *ladder* se tornou excessivamente elaborada, optou-se pelo uso de Texto Estruturado em forma de bloco de função para maior facilidade na programação e maior clareza para manutenções futuras.

Toda a lógica foi dividida em funções, blocos funcionais e bancos de dados, permitindo que cada módulo da automação (drenagem, descarte, reuso, cura do concreto e simulação) fosse tratado de forma independente, porém integrado ao ciclo principal.

#### 4.2.1. Entradas e Saídas

Para a programação do sistema, foram definidas as I/O's mínimas necessárias para garantir o funcionamento adequado do projeto proposto. Ao todo, o sistema utiliza 14 entradas digitais (DI), 16 saídas digitais (DO), 6 entradas analógicas (AI) e 1 saída analógica (AO), possibilitando o monitoramento e o acionamento dos principais dispositivos de campo, tais como sensores, bombas e válvulas.

A quantidade de entradas e saídas digitais (DI e DO) apresentada contempla a operação de três poços de rebaixamento e três poços artesianos, considerando a instrumentação e os atuadores necessários para cada conjunto. Caso haja a necessidade de ampliação do sistema para atender a um número maior de poços, esse quantitativo poderá ser proporcionalmente aumentado, por meio da adição de novos dispositivos de campo e módulos de expansão de I/O.

Tabela 2 - Entradas Digitais

| Tag                                | Tipo | Endereço | Descrição                           |
|------------------------------------|------|----------|-------------------------------------|
| PocoRebaixamento_NivelBaixo1       | Bool | I0.0     | Ativo se o nível do poço está baixo |
| PocoRebaixamento_NivelAlto1        | Bool | I0.1     | Ativo se o nível do poço está alto  |
| PocoRebaixamento_NivelBaixo2       | Bool | I0.2     | Ativo se o nível do poço está baixo |
| PocoRebaixamento_NivelAlto2        | Bool | I0.3     | Ativo se o nível do poço está alto  |
| PocoRebaixamento_NivelBaixo3       | Bool | I0.4     | Ativo se o nível do poço está baixo |
| PocoRebaixamento_NivelAlto3        | Bool | I0.5     | Ativo se o nível do poço está alto  |
| PocoArtesiano_NivelBaixo1          | Bool | I0.6     | Ativo se o nível do poço está baixo |
| PocoArtesiano_NivelAlto1           | Bool | I0.7     | Ativo se o nível do poço está alto  |
| PocoArtesiano_NivelBaixo2          | Bool | I1.0     | Ativo se o nível do poço está baixo |
| PocoArtesiano_NivelAlto2           | Bool | I1.1     | Ativo se o nível do poço está alto  |
| PocoArtesiano_NivelBaixo3          | Bool | I1.2     | Ativo se o nível do poço está baixo |
| PocoArtesiano_NivelAlto3           | Bool | I1.3     | Ativo se o nível do poço está alto  |
| AcionamentoManual_PoçoRebaixamento | Bool | I1.4     | Acionamento manual do poço          |
| AcionamentoManual_PoçoArtesiano    | Bool | I1.5     | Acionamento manual do poço          |

Tabela 3 - Entradas Analógicas

| Tag                        | Tipo | Endereço | Descrição                                        |
|----------------------------|------|----------|--------------------------------------------------|
| Nivel_ReservatorioUsoGeral | Int  | IW64     | Medição do nível do reservatório de uso geral    |
| Nivel_ReservatorioDrenagem | Int  | IW66     | Medição do nível do reservatório de drenagem     |
| Pressao_Prumada            | Int  | IW68     | Medição da pressão no ponto mais alto do sistema |
| Pressao_Saida              | Int  | IW70     | Medição da pressão no ponto de saída             |
| Vazao_Saida_BombaRecalque  | Int  | IW72     | Vazão de saída da bomba de recalque              |
| Vazao_Saida_BombaDescarte  | Int  | IW74     | Vazão de saída da bomba de descarte              |

Tabela 4 - Saídas Digitais

| Tag                     | Tipo | Endereço | Descrição                                                          |
|-------------------------|------|----------|--------------------------------------------------------------------|
| Valvula_Prumada         | Bool | Q0.0     | Válvula                                                            |
| Valvula_Cura            | Bool | Q0.1     | Válvula                                                            |
| Valvula_Tambor          | Bool | Q0.2     | Válvula                                                            |
| Valvula_CaixaDagua      | Bool | Q0.3     | Válvula                                                            |
| Valvula_Rua             | Bool | Q0.4     | Válvula                                                            |
| Valvula_Galeria         | Bool | Q0.5     | Válvula                                                            |
| Valvula_FirstFlush      | Bool | Q0.6     | Válvula para direcionamento do <i>first flush</i>                  |
| Valvula_Chuva           | Bool | Q0.7     | Válvula para reaproveitamento da água da chuva                     |
| Bomba_PocoRebaixamento1 | Bool | Q1.0     | Alimenta contadora de acionamento da bomba do poço de rebaixamento |
| Bomba_PocoRebaixamento2 | Bool | Q1.1     | Alimenta contadora de acionamento da bomba do poço de rebaixamento |
| Bomba_PocoRebaixamento3 | Bool | Q1.2     | Alimenta contadora de acionamento da bomba do poço de rebaixamento |
| Bomba_PocoArtesiano1    | Bool | Q1.3     | Alimenta contadora de acionamento da bomba do poço artesiano       |
| Bomba_PocoArtesiano2    | Bool | Q1.4     | Alimenta contadora de acionamento da bomba do poço artesiano       |
| Bomba_PocoArtesiano3    | Bool | Q1.5     | Alimenta contadora de acionamento da bomba do poço artesiano       |
| Bomba_Recalque          | Bool | Q1.6     | Alimenta contadora de acionamento da bomba de recalque (Manual)    |
| Bomba_Descarte          | Bool | Q1.7     | Alimenta contadora de acionamento da bomba de descarte             |

Tabela 5 - Saídas Analógicas

| Tag            | Tipo | Endereço | Descrição                                    |
|----------------|------|----------|----------------------------------------------|
| Saida_Inversor | Int  | QW64     | Acionamento do Inversor da bomba de recalque |

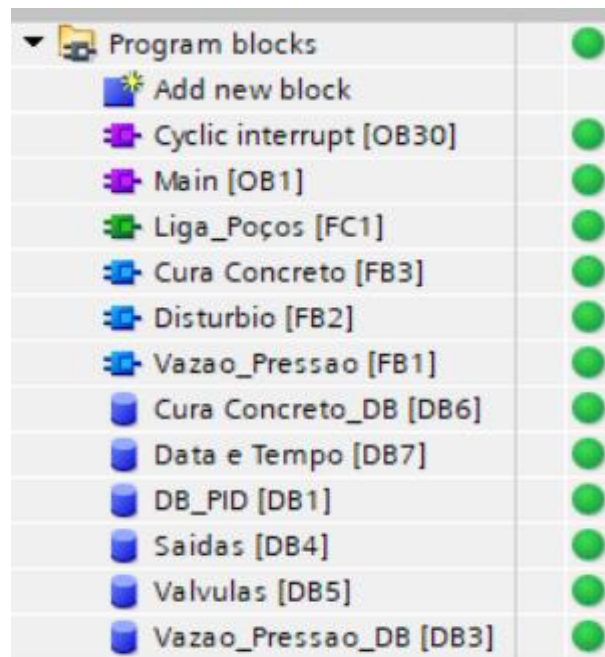
#### 4.2.2. OB1 – Ciclo principal de Varredura

O bloco OB1 (*Main*) executa a lógica cíclica do sistema e coordena todos os módulos. Nele ocorrem:

- leitura dos sensores digitais e analógicos;
- normalização dos sinais (nível, vazão e turbidez);
- tratamento de temporizações;
- chamada das funções de bombeamento, descarte, reuso e cura;
- atualização das variáveis exibidas no supervisório;

O OB1 funciona como o “cérebro” da automação, orquestrando a ordem e a lógica de execução de todas as rotinas.

Figura 17 - OB1



Fonte: Autor próprio

a) FC – Funções para Operações Críticas (Bombas e Descarte)

A programação possui funções dedicadas ao controle dos atuadores principais, sendo as mais relevantes:

**4.2.3. FC de Acionamento das Bombas**

Esta função deve conter:

- lógica de acionamento por nível mínimo, máximo e crítico;
- histerese para evitar acionamentos repetitivos;
- verificações de falha da bomba (sem variação de nível durante operação);
- bloqueios de segurança (funcionamento a seco).

Essa função padroniza o comportamento das bombas, garantindo operação segura e eficiente.

**4.2.4. FC de Descarte**

Responsável por:

- enviar água para a galeria pluvial quando o reservatório de descarte atinge níveis altos;
- permitir descarte manual através do supervisório;
- garantir descarte automático em emergências;
- acionar a bomba de descarte com base em permissões e verificações de nível.

#### **4.2.5. FB – Blocos Funcionais para Controle Avançado**

Os blocos funcionais implementam operações mais complexas que precisam manter memória interna.

##### **I) FB de Cura do Concreto (CICLO DE CURA)**

Controla:

- tempo total de cada ciclo;
- liga/desliga;
- contadores internos;
- habilitação por dia da semana e horários (via Timer semanal do Supervisório);
- supervisão de operação.

O código implementa uma lógica de controle baseada em dias da semana, horário inicial e pulsos periódicos. Ele funciona assim:

##### **1. Seleciona os dias válidos**

O usuário define um BYTE onde cada bit representa um dia da semana, selecionados por meio do sistema supervisório. O código verifica qual é o dia atual e confere se esse dia está habilitado.

##### **2. Calcula o horário em minutos do dia**

Isso permite medir tempo de forma contínua.

##### **3. Detecta o horário exato de início**

Quando chega no horário programado (hora/minuto), o código gera um pulso de início. Esse pulso aciona um temporizador que mantém a saída ativada por um tempo inicial (por exemplo, 15 minutos), para atingir a lâmina d'água de interesse.

##### **4. Após o início, gera pulsos por hora cheia**

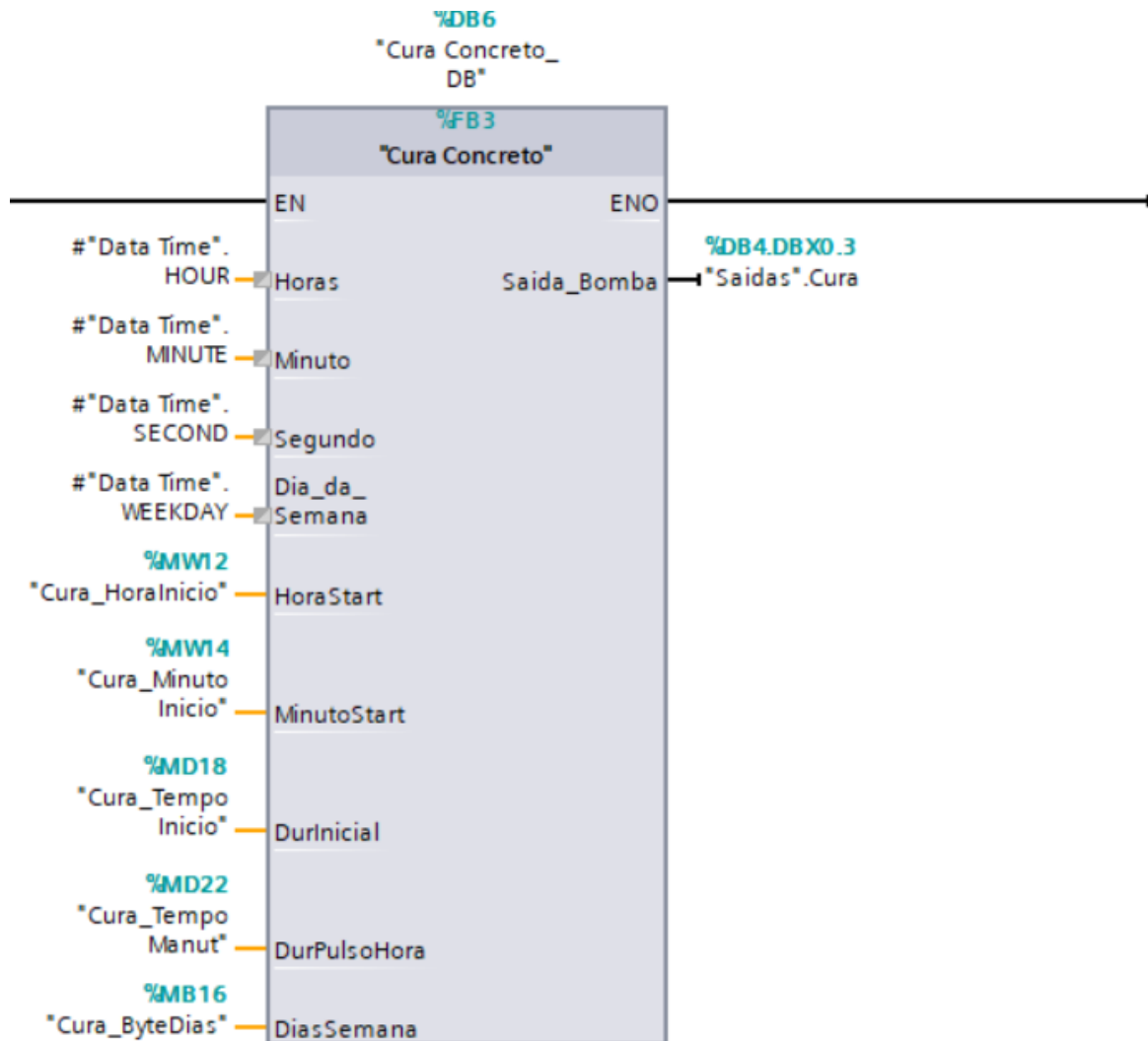
Depois de passar a fase inicial, o sistema libera pulsos rápidos (ex.: 20 s) toda vez que der uma hora cheia (00:00, 01:00, 02:00 etc.), para compensar a evaporação da água e manter a lâmina d'água constante na superfície do concreto.

##### **5. Controla a saída final**

A saída da bomba fica ligada enquanto durar:

- o tempo inicial configurado
  - ou um dos pulsos horários
6. O sistema deve desligar antes do início dos trabalhos no dia seguinte (normalmente a partir das 6:00).

Figura 18 - Bloco cura concreto



Fonte: Autor próprio

Na chamada do bloco, são fornecidos os valores de data e hora atuais, junto com as configurações desejadas: horário de início, duração do período inicial, duração dos pulsos horários e os dias da semana em que o sistema deve operar. Além disso, o supervisório conta com uma sessão própria para configuração do sistema, para tornar mais simples e rápido a configuração no dia a dia:

Figura 19 - Configuração horário

Aplicação E3 Viewer - Título do Quadro

23/11/2025 16:58:01

**Usuário**

Login Logout

Drenagem PID Cura do Concreto

Descarte Uso Geral Visão Geral

Sair

**CONFIGURAÇÃO CURA DO CONCRETO**

**Hora de Início** 18

**Minuto de Início** 0

**Tempo de início (min)** 15

**Tempo de manutenção(s)** 30

Dias da Semana

☐ Domingo

☒ Segunda-feira

☐ Terça-feira

☒ Quarta-feira

☐ Quinta-feira

☒ Sexta-feira

☐ Sábado

**Estado da Saída**

**Falso**

Fonte: Autor próprio

## II) FB de Simulação Hidráulica (Factory I/O)

Reproduz no ambiente virtual o comportamento dos poços, níveis e reservatórios, permitindo validar a lógica antes da execução real.

Inclui:

- Incremento/decremento simulado dos níveis;
- Resposta das bombas à simulação;
- Medição de pressão;
- Controle da bomba por botoeiras (simulando uma situação real);
- Comunicação com sensores virtuais.
- Simulação da variação de vazão a partir da quantidade de pontos de uso ligados.

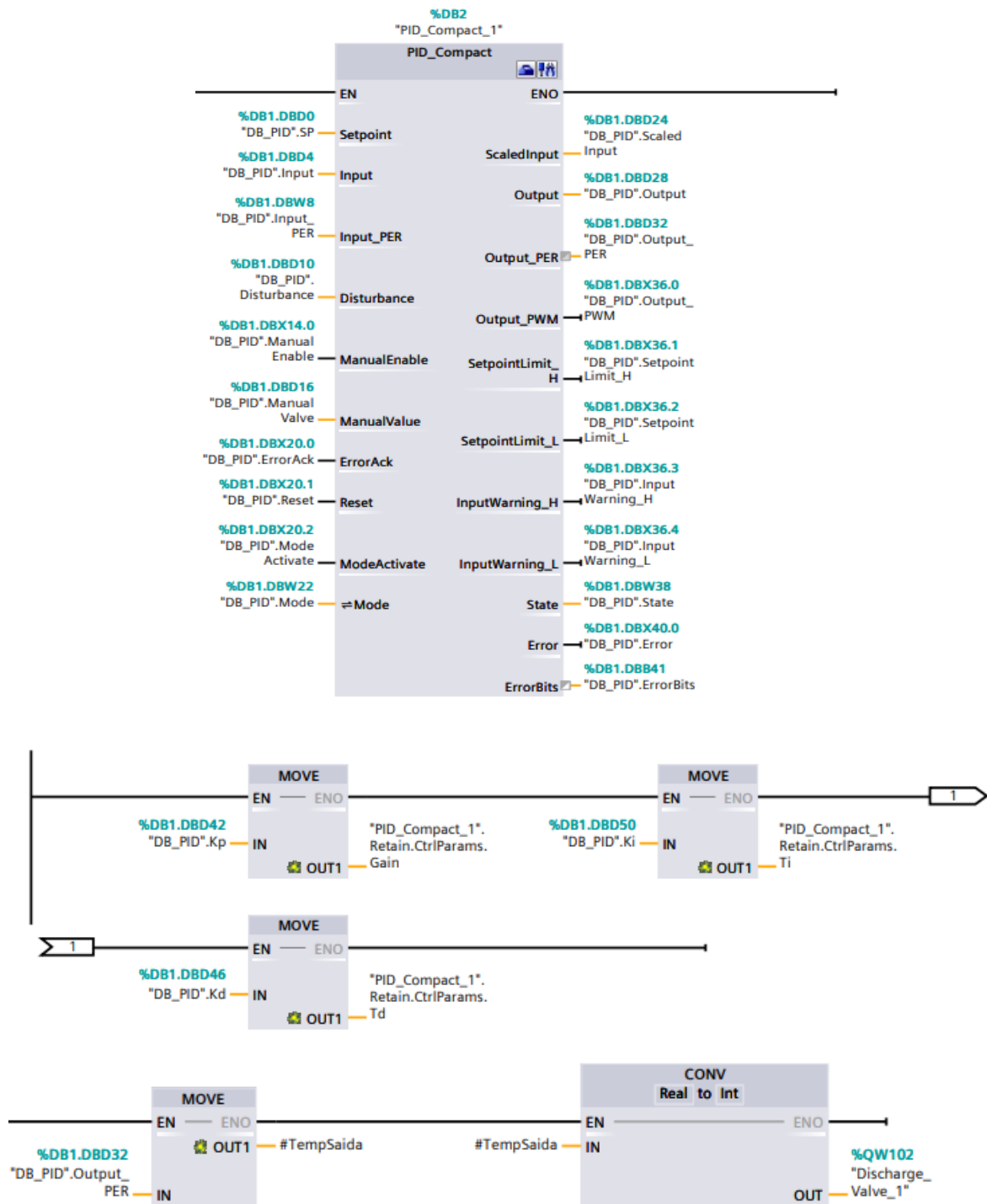
## III) FB de Simulação Hidráulica (Factory I/O)

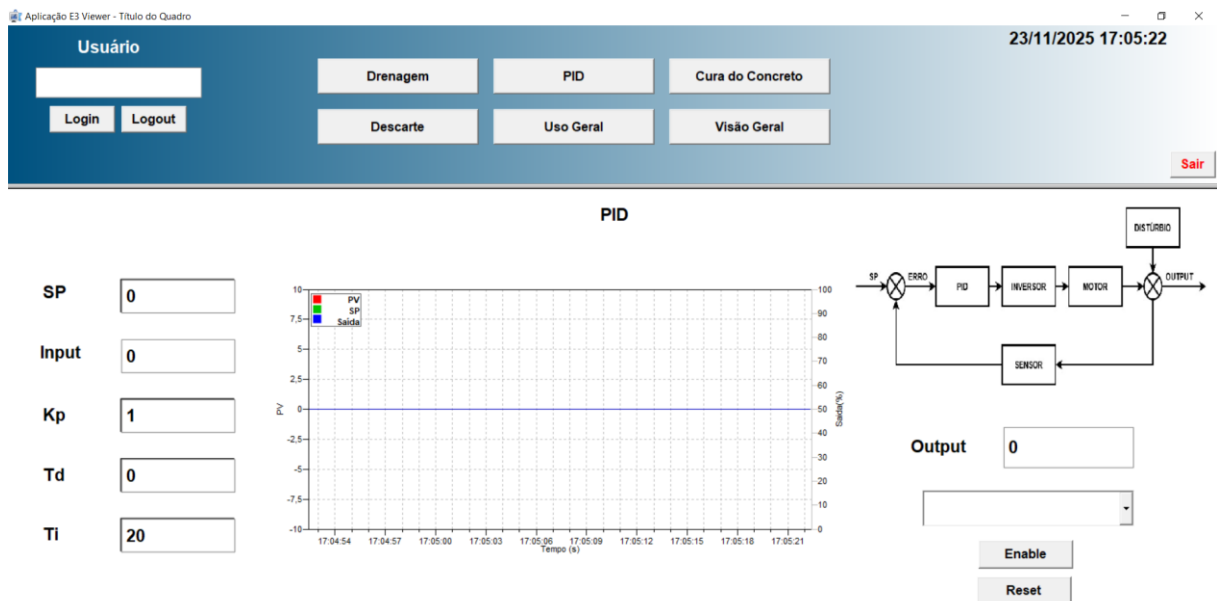
Controla pressão, nível ou vazão quando necessário.

Inclui:

- ajustes de Kp, Ti e Td via interface;
- operação em malha fechada;
- gráfico de resposta no supervisório.

Figura 20 - Módulo PID





Fonte: Autor próprio

#### b) DB - Banco de Dados do Sistema

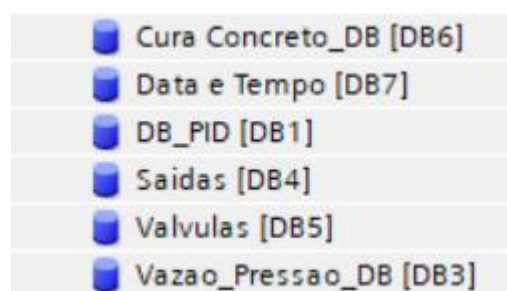
Os **DBs** armazenam variáveis importantes, garantindo organização durante o funcionamento.

Eles incluem:

- estado das bombas (ligada, falha, manual/automático);
- níveis atuais dos reservatórios;
- parâmetros ajustáveis pelo operador;
- estados das válvulas solenoides;
- temporizações e horários;
- variáveis internas da simulação.

Essa separação mantém o sistema organizado e facilita alterações futuras.

Figura 21 - Banco de dados



c) Temporizadores e agendamento

O sistema deve ser estruturado com uma lógica completa de programação semanal, permitindo:

- definir dias da semana;
- horários de início;
- tempos de manutenção e duração;
- repetição em ciclos automáticos.

Essa programação é essencial para rotinas diárias como:

- ciclos de cura;
- Abastecimento de reservatórios;
- Limpeza da caixa d'água.

Importante para manter a água sempre pronta para uso em qualquer situação em que a obra exija.

d) Intertravamento e Segurança

A lógica pode ser organizada de forma a incluir mecanismos de intertravamento e verificação, tais como:

- detecção de valores fora da faixa medida pelo sensor;
- supervisão do nível do reservatório;
- proteção contra funcionamento a seco;
- monitoramento da comunicação com a interface de operação (Supervisório).

#### **4.3. Funcionamento dos Sensores**

O sistema automatizado depende fortemente da leitura precisa de diversos sensores distribuídos entre os poços, reservatórios e pontos de monitoramento. Esses sensores fornecem ao CLP as informações necessárias para a tomada de decisão em tempo real, garantindo a operação segura, eficiente e automática do processo de drenagem e reaproveitamento da água no canteiro de obras.

Os sensores utilizados foram integrados ao CLP por meio de entradas analógicas e digitais, sendo tratados e normalizados dentro do programa conforme a necessidade de cada módulo da automação.

#### a) Sensores de Nível dos poços

Cada poço de rebaixamento e artesiano possui sensores de nível responsáveis por informar ao CLP a quantidade de água acumulada no interior do poço.

Esses sensores desempenham as seguintes funções:

- **Nível Baixo:** indica ausência de água, a bomba é desligada imediatamente para evitar funcionamento a seco.
- **Nível Operacional:** dentro da faixa ideal, a bomba pode ser acionada automaticamente quando habilitada.
- **Nível Alto:** representa aumento crítico da água, o CLP prioriza o acionamento da bomba para evitar transbordamento.

A variação do nível é tratada por algoritmos de histerese na lógica do CLP, evitando acionamentos repetitivos da bomba quando o nível oscila rapidamente.

#### b) Sensores de Nível dos reservatórios

Tanto o reservatório de descarte quanto o reservatório de uso geral possuem sensores de nível analógicos que enviam ao CLP o volume armazenado em tempo real.

O comportamento é interpretado da seguinte forma:

##### I. Reservatório de descarte

- **0–20%:** bomba de descarte permanece desligada.
- **20–80%:** nível monitorado e registrado no supervisão.
- **> 80%:** descarte automático para galeria pluvial.

##### II. Reservatório de uso geral

- **Nível Baixo:** bloqueio automático da bomba.
- **Nível Médio:** consumo normal liberado.
- **Nível Alto:** CLP desvia água excedente para o reservatório de descarte.

A medição contínua permite ao CLP controlar adequadamente o direcionamento da água entre reuso e descarte.

#### c) Sensor de Vazão

O sensor de vazão mede o fluxo de água em linhas críticas, principalmente:

- linha de saída para galeria pluvial (descarte),
- linha de saída do reservatório de uso geral (reuso),
- linhas de distribuição para prumada, tambores, caixa d'água e concreto.

O CLP utiliza a leitura de vazão para:

- verificar se a bomba está operando corretamente;
- detectar obstruções na tubulação;
- controlar rotinas do PID (quando habilitado);
- informar o operador sobre consumo em tempo real;
- detectar consumo excessivo ou anormal.

Em caso de bombeamento sem variação de vazão, o sistema registrará falha da bomba.

d) Sensor de Pressão

Para pontos de consumo que dependem de linha pressurizada, sensores de pressão auxiliam no controle do sistema PID. Eles permitem:

- manter vazão constante;
- ajustar pressão conforme demanda;
- proteger tubulações e válvulas.

e) Sensores digitais

O sistema também utiliza sensores digitais simples para:

- habilitação manual das rotinas (botões do supervisório);
- Boia de nível;

f) Integração com o sistema supervisório

Cada sensor possui uma representação gráfica no sistema SCADA:

- níveis são exibidos por barras graduadas;
- Vazão e pressão aparecem em campos numéricos;
- falhas geram mensagens visuais;
- estados de funcionamentos são mostrados com cores verde/vermelho.

O operador consegue visualizar em tempo real todo o comportamento do sistema, agilizando diagnósticos e decisões.

#### **4.3.1. Funcionamento dos atuadores**

Os atuadores representam a camada física responsável por executar as ações definidas pelo CLP, transformando as decisões lógicas em movimentos reais de bombeamento, abertura de válvulas e direcionamento dos fluxos hidráulicos. No sistema desenvolvido, os principais

atuadores são as bombas submersíveis, bombas de recalque, válvulas solenoides e acionamentos auxiliares presentes nos módulos de drenagem, descarte e reuso.

Todos os atuadores são controlados a partir de instruções digitais do CLP, sendo monitorados continuamente pelo supervisório para garantir operação segura e adequada.

a) Bombas Submersíveis dos poços

Cada poço de rebaixamento possui uma bomba submersível, responsável pela elevação da água captada no subsolo. O funcionamento destas bombas segue regras específicas definidas na programação do CLP:

- **Acionamento automático por nível:**  
A bomba é ligada quando o sensor de nível indica que a lâmina de água atingiu a faixa operacional.
- **Desligamento por nível baixo:**  
A bomba é desativada ao atingir nível mínimo, evitando funcionamento a seco.
- **Bloqueios de segurança:**  
Em caso de falha de sensor, ausência de variação de nível ou funcionamento prolongado, a bomba é automaticamente desativada.

Essas bombas são representadas no supervisório como motores acoplados no fundo de cada poço, com indicadores verde/vermelho mostrando seu estado.

b) Bombas de recalque dos reservatórios

Tanto o reservatório de uso geral quanto o reservatório de descarte possuem bombas responsáveis por deslocar água para outros pontos do sistema:

- I) Bomba do Reservatório de Descarte
  - Envia água para a galeria pluvial.
  - Opera de forma automática quando o nível do reservatório atinge limites superiores.
  - Pode ser habilitada manualmente pelo supervisório (botão verde/vermelho).
  - É protegida contra falhas por detecção de vazão.
- II) Bomba do Reservatório de Uso Geral
  - Responsável por alimentar a rede de reuso.
  - Atende destinos como: prumada, tambores, cura do concreto, caixa d'água e rua.
  - Atua em conjunto com o controle PID quando há demanda por vazão/pressão constante.

Ambas têm simbologia destacada no supervisório e são monitoradas em tempo real.

c) Válvulas solenoides

O sistema utiliza uma série de válvulas solenoides para direcionar o fluxo de água. Cada ponto de consumo possui sua própria válvula, representada visualmente no supervisório com o símbolo triangular vermelho.

Essas válvulas funcionam segundo a lógica:

**I) Abertura liberada somente se:**

- o ponto estiver habilitado no supervisório;
- não houver falha na bomba ou sensor;
- a prioridade de fluxo permitir.

**II) Fechamento automático quando:**

- o operador desabilita o ponto;
- outra linha prioritária exige fluxo.

As válvulas garantem que o sistema opere com eficiência e sem desperdícios, além de permitir seleção precisa dos pontos de reuso.

**d) Atuadores do PID**

Quando o controle PID está habilitado, o atuador correspondente (geralmente a bomba de recalque) passa a operar com:

- ajuste dinâmico de velocidade,
- resposta proporcional ao desvio,
- compensação integral para erros acumulados,
- suavização derivativa para transições de pressão/vazão.

Isso garante estabilidade na linha mesmo com variação de consumo

Primeiramente, aplicou-se o método de Ziegler–Nichols, conforme descrito na Seção 2.7.6.1, no qual foi determinado o ganho crítico a partir de testes experimentais. Em seguida, realizou-se o ajuste manual do ganho com o objetivo de obter o comportamento desejado do sistema.

Figura 22 - Atuadores PID



Fonte: Autor próprio

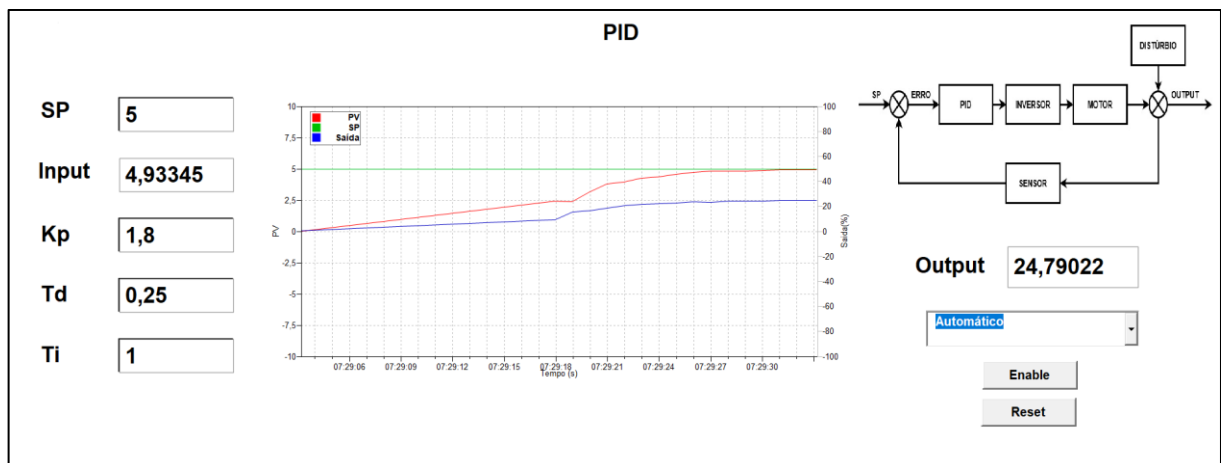
$$Ku = 16$$

$$Kp = 0,6 \cdot Ku = 9,6$$

$$Ti = \frac{Pu}{2} = \frac{2}{2} = 1s$$

$$Td = \frac{Pu}{8} = \frac{2}{8} = 0,25s$$

Com alguns ajustes adicionais foi possível alcançar a sintonização ideal do controlador PID, resultando em uma resposta rápida, com baixo erro estacionário e sem oscilações indesejadas.



Fonte: Autor próprio

Uma resposta rápida, com erro baixo e sem oscilações.

#### 4.4. Sistema Supervisório SCADA

O sistema supervisório desenvolvido para este projeto tem papel fundamental na operação, monitoramento e diagnóstico do sistema automatizado de drenagem, reuso e descarte. Ele foi implementado em ambiente SCADA, permitindo que todas as variáveis, estados dos equipamentos e rotinas de controle se tornem visíveis e acessíveis ao operador em tempo real.

O supervisório organiza as informações em diferentes telas funcionais, cada uma representando graficamente um módulo do sistema. Esse formato facilita a navegação, reduz erros operacionais e garante que decisões possam ser tomadas com base em informações precisas e atualizadas.

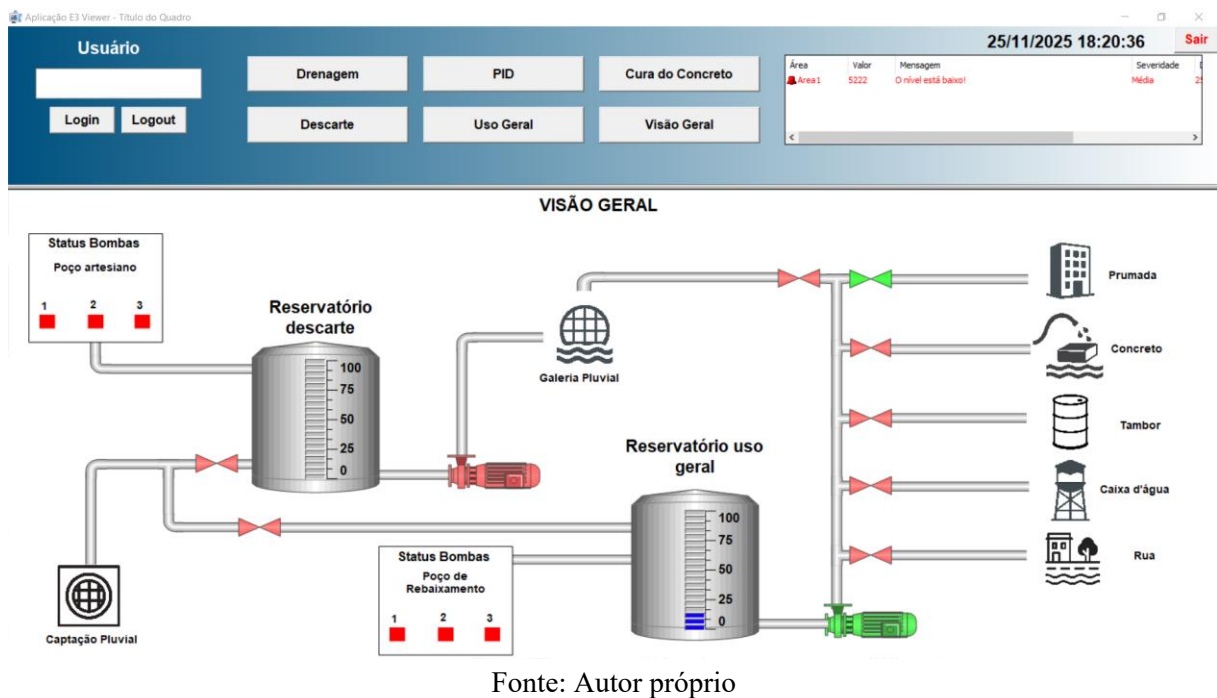
Além disso, o supervisório conta com sistema de login, para dar acessos próprios para cada usuário. Isso permite definir para cada pessoa com login, uma limitação de acesso, acionamento e visualização de informações na tela do supervisório.

#### a) Tela de Visão Geral

A tela “*VISÃO GERAL*” funciona como o painel principal do sistema, apresentando:

- O reservatório de descarte e o reservatório de uso geral,
- Barras gráficas de nível (0% a 100%),
- Bombas associadas a cada reservatório,
- Sensores principais,
- Rotas de distribuição,
- Status das bombas dos poços (artesianos e de rebaixamento),
- Acesso visual à galeria pluvial e aos destinos de reuso.
- Tabela de alarmes em tempo real;

Figura 23 - Tela visão geral



Essa tela não tem funções operacionais, mas com seu acesso liberado para todos, ela facilita a observação do sistema e consolida os módulos em um único diagrama hidráulico, permitindo que o operador visualize rapidamente o estado global do sistema.

#### b) Tela do Módulo de Drenagem

A tela do módulo de drenagem apresenta os poços individualmente, incluindo:

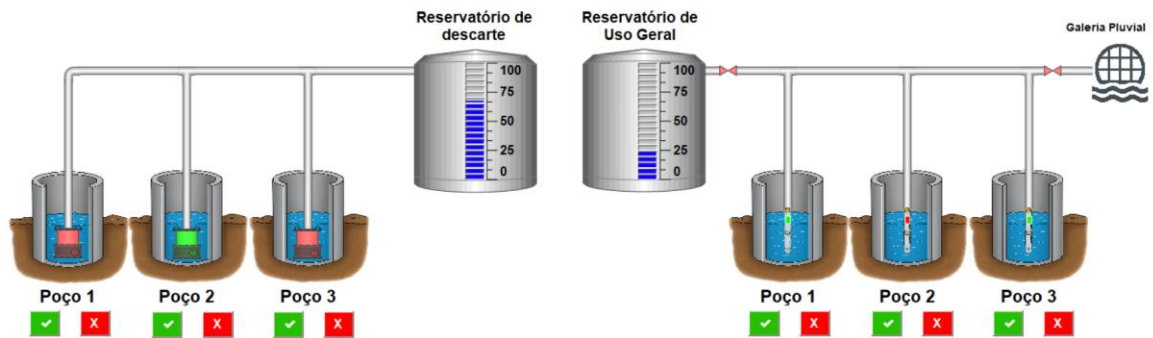
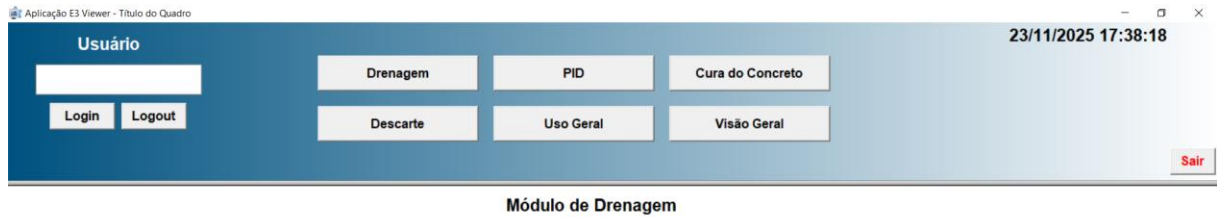
- representação gráfica dos poços de rebaixamento;
- bombas submersíveis ilustradas na parte inferior;
- barrinhas azuis indicando estado;
- botões de habilitação (✓ / ✗),
- tubulação interligando os poços ao reservatório.

O operador pode verificar:

- Quais poços estão ativos,
- Quais estão em alarme,
- Quais bombas estão ligadas,
- Se há necessidade de acionar manutenção.

Essa visualização é essencial para evitar transbordamento e garantir o funcionamento contínuo da drenagem.

Figura 24 - Módulo drenagem



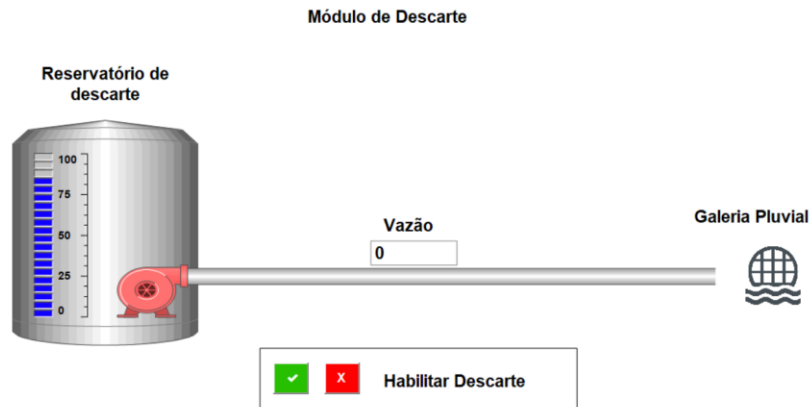
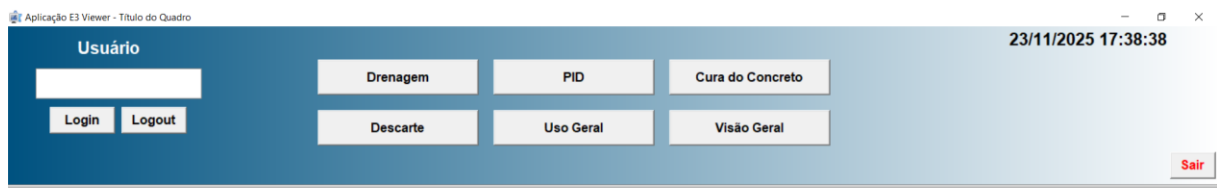
Fonte: Autor próprio

c) Tela do módulo de descarte

A tela “*Módulo de Descarte*” exibe:

- o reservatório de descarte com indicador vertical de nível,
- a bomba de descarte representada graficamente,
- a tubulação que direciona o fluxo à galeria pluvial,
- indicador de vazão de saída,
- comando para habilitar/desabilitar descarte.

Figura 25 - Supervisório módulo de descarte.



Fonte: Autor próprio

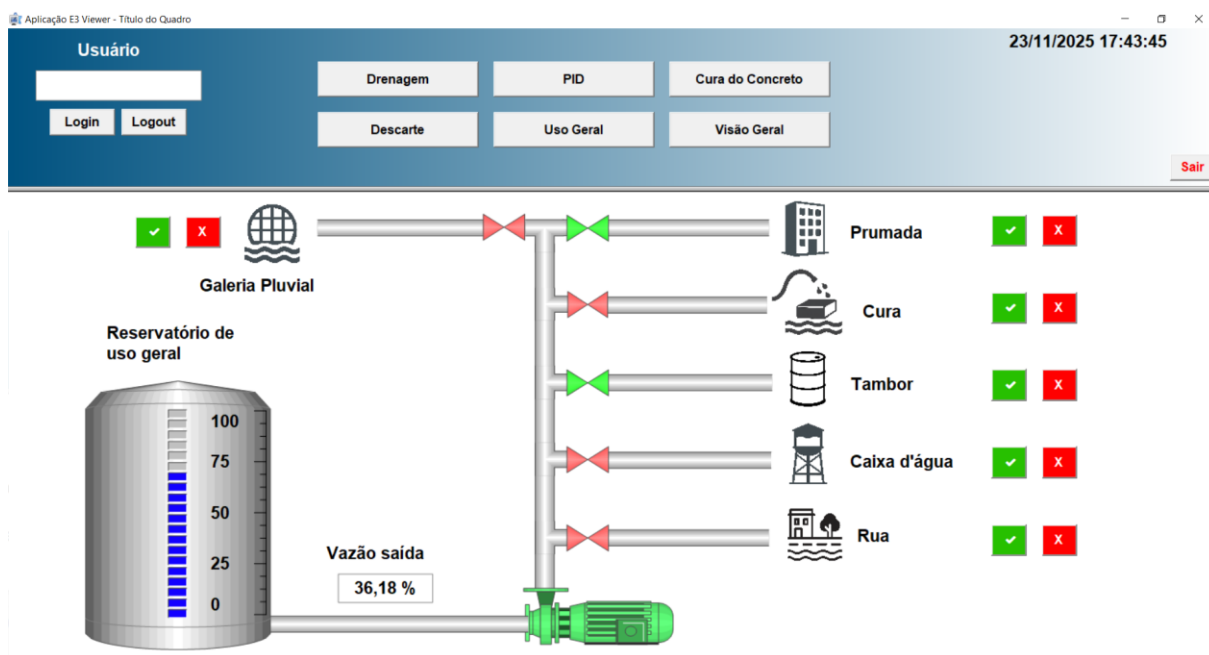
O botão verde (✓) habilita e o vermelho (✗) bloqueia o descarte. Essa tela permite que o operador controle manualmente o envio de água excedente para a galeria, além de visualizar o descarte automático acionado pelo CLP.

#### d) Telas de Reuso - Saídas para consumo

A tela dedicada ao reuso representa graficamente os destinos da água do reservatório de uso geral. O sistema mostra:

- válvulas solenoides individuais para cada rota:
  - prumada,
  - cura do concreto,
  - tambor,
  - caixa d'água,
  - rua;
- botões de habilitação (✓ / ✗) ao lado de cada destino,
- tubulação vertical com derivações,
- bomba de recalque associada ao reuso,
- indicador da vazão de saída.

Figura 26 - Supervisório módulo uso geral



Fonte: Autor próprio

Essas válvulas permitem que o operador selecione exatamente para onde enviar água, conforme demanda da obra.

#### E) Tela de cura do concreto

A tela de Cura do concreto apresenta:

- campos para hora e minuto de início,
- tempo de início e tempo de manutenção,
- seleção dos dias da semana,
- indicador do estado da saída,
- iluminação visual da cor verde quando ativo.

Essa interface facilita:

- programação de acionamentos periódicos,
- rotinas automatizadas de bombeamento,
- controle recorrente da cura do concreto.

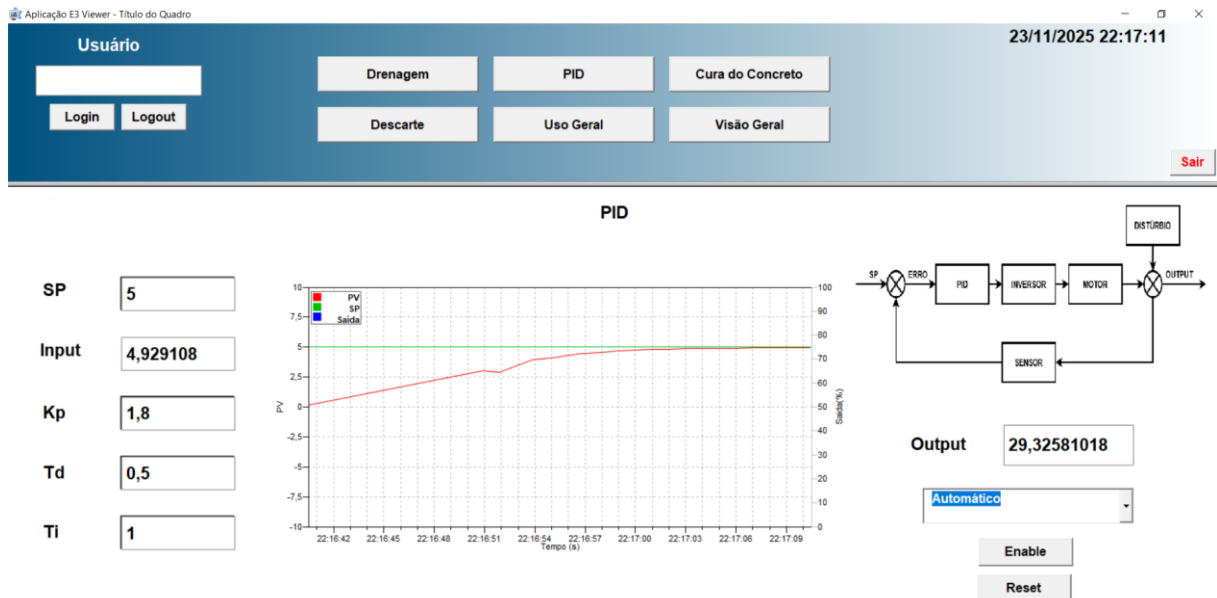
#### f) Tela de controle PID

A interface do PID contém:

- campos para inserir SP, Kp, Ti, Td,
- Informações do processo com Input e Output.

- representação gráfica da malha PID,
- botão de Enable e Reset,
- gráfico temporal da variável controlada,
- Campo de seleção do modo de operação.

Figura 27 - Supervisório PID



Fonte: Autor próprio

Essa tela permite ajustes finos para controle de vazão ou pressão, caso necessário, e auxilia na calibração do sistema.

#### g) Benefícios do Sistema supervisório

O sistema SCADA projetado oferece:

- alta visibilidade do processo hidráulico;
- diagnóstico rápido em caso de falhas;
- interface intuitiva para operadores sem conhecimento avançado;
- Facilidade de controle dos processos;
- registro de informações que auxiliam na gestão da obra;
- capacidade de expansão, caso novos poços ou linhas sejam adicionados.

## 4.5. Simulação Factory I/O

A simulação em Factory I/O desempenhou um papel fundamental no desenvolvimento e validação do sistema automatizado, permitindo reproduzir virtualmente o comportamento hidráulico dos poços, reservatórios, bombas e válvulas antes da aplicação real. A plataforma foi utilizada como ambiente de testes para verificar a resposta do CLP às condições operacionais, garantindo confiabilidade e segurança ao sistema.

A comunicação entre Factory I/O e o CLP foi realizada por meio de rede Ethernet Virtual, permitindo que todos os sensores e atuadores virtuais respondessem à lógica real do programa implementado no TIA Portal.

a)

No ambiente do *Factory I/O* foram criados:

- sensores virtuais de nível e vazão,
- reservatórios equivalentes aos reservatórios de uso geral e descarte,
- válvulas motorizadas,
- Quadros elétricos para acionamentos;

Esses elementos foram posicionados de forma a reproduzir o layout funcional do sistema real, garantindo que a simulação imitasse as principais dinâmicas operacionais.

Figura 28 - Simulação Factory I/O



Fonte: Autor próprio

#### b) Conexão com o CLP

A simulação foi conectada diretamente ao CLP virtual (PLC Sim), permitindo que:

- quando o nível dos poços aumentava no Factory I/O → o sensor analógico enviava o valor ao CLP;
- quando o CLP ligava a bomba → a bomba virtual drenava o poço no Factory I/O;
- quando o reservatório virtual atingia nível alto → a lógica do CLP acionava a bomba de descarte.

Na simulação realizada no Factory I/O, como o ambiente não possui um atuador do tipo *bomba*, a válvula foi utilizada como elemento equivalente, representando a ação da bomba no sistema real. Assim, a abertura da válvula simulou a velocidade de rotação da bomba, funcionando como variável de saída do controle PID. Nesse arranjo, o sensor de vazão atuou como variável de entrada (process variable – PV), enquanto a abertura simulada da válvula atuou como variável de saída (control variable – CV), reproduzindo o comportamento que, no sistema físico, seria executado pelo inversor da bomba. Essa metodologia permitiu analisar a resposta dinâmica da malha de controle, validar o PID e testar o sistema completo sem a necessidade de uma estrutura física real.

#### d) Validação da lógica de controle do CLP

A simulação comprovou que:

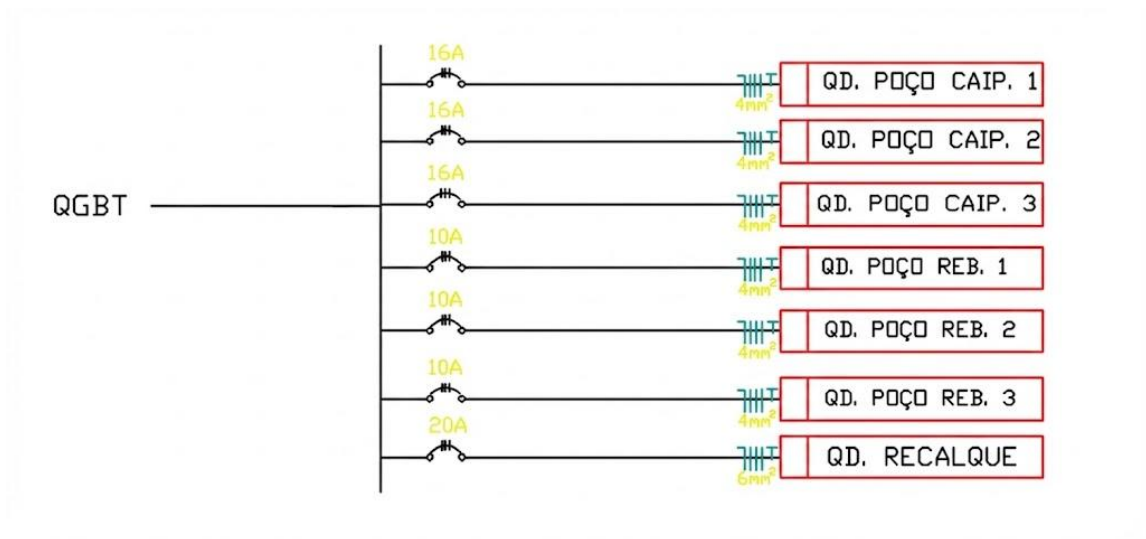
- a lógica programada estava funcionando conforme os requisitos do projeto;
- os tempos de resposta eram adequados;
- os níveis eram mantidos sob controle;
- havia coerência entre automações dos módulos;
- o sistema era capaz de operar de forma autônoma e segura.

A utilização do Factory I/O permitiu analisar, ajustar e otimizar o comportamento do sistema antes da implementação efetiva, reduzindo erros e aumentando a confiabilidade.

### **4.6. Funcionamento da Instalação Elétrica**

A instalação elétrica do sistema foi estruturada de forma modular, garantindo organização, segurança e facilidade de manutenção. Cada bomba possui seu próprio quadro elétrico dedicado, contendo dispositivos de proteção, comando e sinalização específicos para aquele equipamento. Esses quadros individuais são interligados ao QGBT (Quadro Geral de Baixa Tensão), responsável pela distribuição de energia em 380 V trifásico para todos os conjuntos de motobombas, assim como mostrado na figura 29. Essa abordagem descentralizada permite reduzir o comprimento dos cabos de potência, minimizar quedas de tensão, facilitar o diagnóstico de falhas e proporcionar uma operação mais confiável durante a execução da obra.

Figura 29 - Diagrama unifilar elétrico

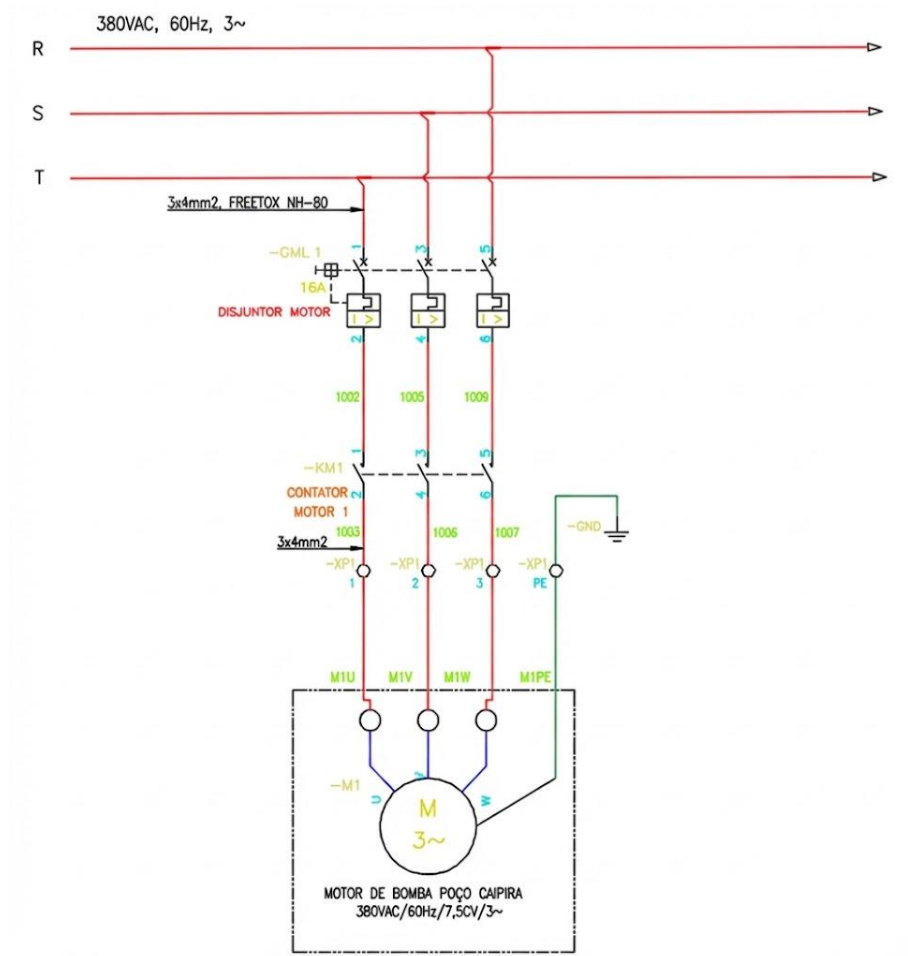


Fonte: Autor próprio

#### a) Partida direta dos poços caipiras e poços de rebaixamento

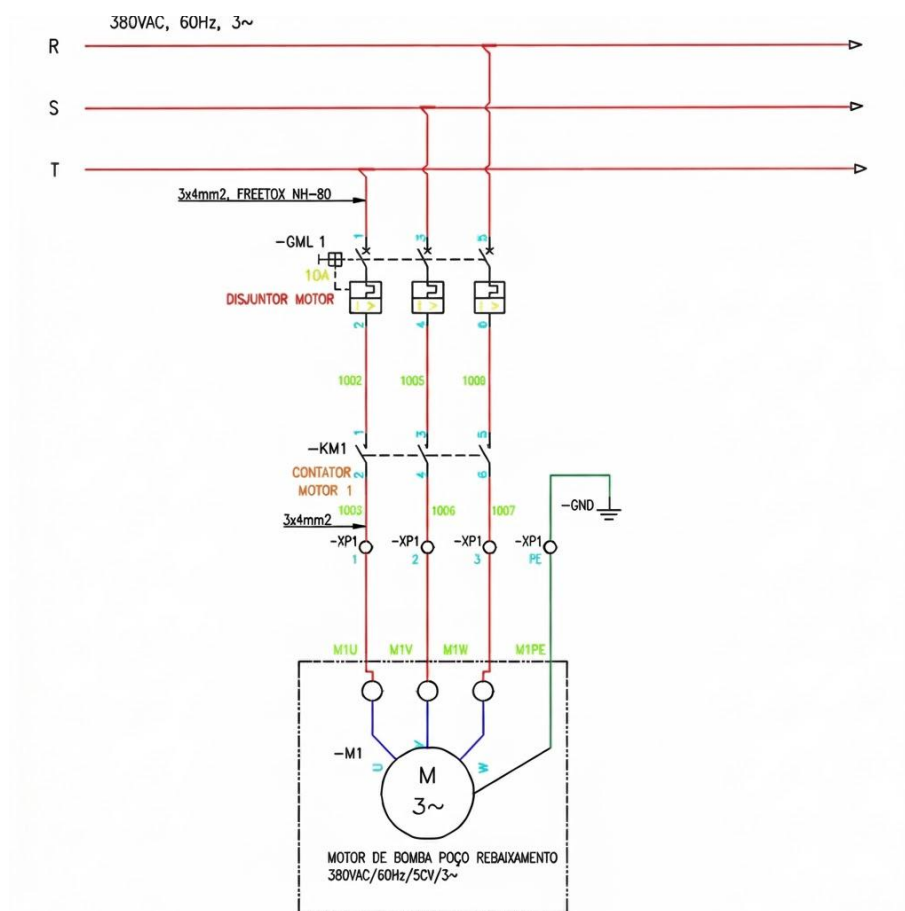
As bombas instaladas nos poços caipiras e de rebaixamento são acionadas por partida direta, método indicado para motores de pequena e média potência, como os utilizados neste sistema. A partida direta, detalhada nas figuras 30 e 31, consiste em alimentar o motor com a tensão nominal da rede assim que o circuito é fechado, proporcionando torque elevado e partida imediata do conjunto. Para isso, cada quadro conta com um disjuntor-motor, responsável por proteger o equipamento contra sobrecarga e curto-circuito, e uma contatora, que realiza a manobra elétrica de ligação e desligamento por meio de bobina eletromagnética. As botoeiras de Liga e Desliga instaladas no quadro permitem o acionamento manual quando necessário, enquanto as lâmpadas sinalizadoras indicam estados de “Ligado”, “Desligado” e “Falha”, facilitando a operação e a detecção de anomalias. Esse conjunto garante proteção adequada ao motor, simplicidade operacional e confiabilidade no funcionamento contínuo das bombas submersíveis.

Figura 30 - Esquema partida direta bomba poço caipira



Fonte: Autor próprio

Figura 31- Esquema partida direta bomba poço rebaixamento



Fonte: Autor próprio

## b) Quadro da bomba de recalque e acionamento por inversor de frequência

A bomba de recalque opera de maneira distinta das demais, sendo acionada por um inversor de frequência instalado em seu quadro elétrico. O inversor permite controlar a velocidade do motor conforme a demanda hidráulica, ajustando a frequência de alimentação e proporcionando um fluxo mais estável, eficiente e com menor desgaste mecânico. O controle desse inversor é realizado pelo CLP, que executa um algoritmo PID responsável por manter a pressão desejada no sistema, compensando automaticamente alterações de vazão ou abertura de válvulas. O quadro da bomba de recalque incorpora ainda dispositivos de proteção, seccionamento, sinalização e interface de comando, garantindo que o sistema opere de forma segura e com alta precisão. Essa estratégia de automação permite maior eficiência energética e oferece controle refinado da pressão da rede, fundamental para o funcionamento equilibrado de todo o sistema hidráulico.

#### **4.7. Avaliação da eficiência na drenagem e no reaproveitamento sistema automatizado**

A avaliação da eficiência do sistema automatizado foi realizada a partir dos testes de simulação, da análise da lógica implementada no CLP e da verificação do comportamento hidráulico representado no *Factory I/O*. O objetivo principal dessa etapa foi determinar se o sistema foi capaz de:

- drenar a água acumulada nos poços de forma contínua e segura,
- armazenar adequadamente a água aproveitável,
- descartar o excedente ou água inadequada,
- fornecer água de reuso aos pontos de consumo,
- operar de maneira autônoma e confiável,
- responder corretamente a situações de falha e emergência.

Os resultados demonstraram que a automação desenvolvida apresentou desempenho consistente e alinhado aos requisitos do projeto.

#### **4.8. Eficiência no Armazenamento e Distribuição**

A análise do comportamento dos reservatórios mostrou que:

- a. Reservatório de uso geral
  - foi reabastecido automaticamente conforme drenagem dos poços,
  - bloqueou reuso corretamente quando o nível atingiu valores mínimos,
  - Descartou a água excedente, quando o nível ultrapassou os limites definidos;
- b. Reservatório de descarte
  - alcançou nível crítico apenas quando simulado propositalmente,
  - descartou corretamente para a galeria pluvial quando necessário.

Essa operação indica que a lógica de armazenamento está coerente e funcional, garantindo que não ocorra falta ou excesso de água no sistema.

#### **4.9. Eficiência no Reaproveitamento da Água**

Os testes mostraram que o sistema de reuso operou de forma estável e eficiente, garantindo que a água disponível fosse utilizada da melhor maneira possível. A lógica implementada controlou todo o fluxo de reaproveitamento.

O comportamento observado foi o seguinte:

- A água de reuso foi utilizada sempre que o reservatório apresentava nível suficiente, evitando o desperdício de água potável.
- O sistema interrompeu automaticamente o fornecimento de reuso quando o nível ficou baixo, preservando a bomba e garantindo operação segura.
- A distribuição para vários pontos simultâneos ocorreu sem instabilidade, mantendo pressão e vazão compatíveis com a demanda.
- A simulação do controle PID no *Factory I/O* representou o ajuste automático de fluxo, demonstrando como o sistema pode regular a vazão de acordo com a necessidade real da obra.

Com isso, ficou evidente que a estratégia de reaproveitamento adotada contribui diretamente para a redução do consumo de água potável, além de oferecer uma operação confiável e sem interrupções para os processos que dependem desse recurso.

#### **4.10. Conclusão da Avaliação**

A análise geral evidencia que o sistema automatizado apresentou desempenho consistente em todas as etapas de operação. Durante os testes, o direcionamento da água, tanto para reuso quanto para descarte ocorreu de forma correta, de acordo com as condições de nível e disponibilidade. Os reservatórios mantiveram níveis estáveis ao longo de todo o ciclo, e o fornecimento de água de reuso se mostrou contínuo e homogêneo, sem oscilações perceptíveis.

O sistema foi capaz de operar de maneira autônoma durante todo o processo, reagindo de forma apropriada a falhas, situações emergenciais e mudanças nas condições de operação. As decisões tomadas pelo CLP demonstraram coerência, segurança e alinhamento com o comportamento esperado em sistemas reais de drenagem e reaproveitamento. A lógica aplicada apresentou robustez e confiabilidade, reforçando a aderência do protótipo aos requisitos funcionais.

Dessa forma, conclui-se que o sistema atendeu plenamente aos critérios de eficiência e qualidade definidos no projeto, mostrando-se tecnicamente viável para aplicações práticas em canteiros de obras que demandem controle automatizado de drenagem e reaproveitamento de água.

## 5. CONCLUSÃO

A implementação de um sistema modular automatizado para drenagem, armazenamento e reaproveitamento de águas subterrâneas e pluviais demonstra ser uma solução eficiente e alinhada às necessidades reais de canteiros de obras, especialmente em contextos urbanos onde o controle hídrico influencia diretamente a segurança, o cronograma e os custos operacionais. A análise técnica realizada ao longo do estudo evidenciou que a combinação de automação, modularidade e gestão hídrica integrada contribui para minimizar riscos e aprimorar o desempenho da obra em diferentes etapas da construção.

As condições presentes em canteiros, como afloramentos subterrâneos, chuvas intensas e instabilidades do solo, exigem soluções de engenharia capazes de responder de forma ágil e confiável. O sistema proposto demonstrou atender a essas demandas ao integrar sensores, bombas, reservatórios e um controlador lógico programável (CLP) configurado com lógica em malha fechada. Essa arquitetura possibilitou monitoramento contínuo, tomada de decisão automática e distribuição precisa da água captada, reduzindo a necessidade de intervenções manuais e aumentando a previsibilidade operacional.

Os resultados obtidos apontam que a modularidade adotada não apenas facilita a manutenção e a expansão do sistema, como também permite que ele seja replicado em obras de diferentes portes e características geotécnicas. Cada módulo pode ser adaptado ou reconfigurado sem comprometer o funcionamento global, reforçando a escalabilidade da solução.

Outro aspecto relevante é a eficiência no reaproveitamento da água. A integração entre captação, tratamento básico e distribuição automatizada tornou possível utilizar água não potável em diversas atividades da obra, como cura do concreto, lavagem de equipamentos, irrigação e abastecimento de prumadas. Essa prática reduz o consumo de água tratada e contribui para a sustentabilidade do empreendimento, além de minimizar impactos sobre a rede pública e sobre os corpos hídricos próximos.

O módulo de descarte controlado também se destacou ao proporcionar segurança ambiental, garantindo que o envio de água para galerias pluviais ocorra apenas quando necessário e dentro de parâmetros adequados. A automação evitou transbordamentos, sobrecargas e descartes indevidos, assegurando conformidade com normas e boas práticas de gestão ambiental.

De forma geral, o conjunto de soluções apresentado confirma que sistemas hidráulicos automatizados representam um avanço importante para a construção civil contemporânea. A adoção de tecnologias de controle, aliada ao planejamento modular, viabiliza operações mais seguras, eficientes e sustentáveis, reduzindo desperdícios e ampliando a vida útil dos equipamentos envolvidos.

Além disso, o estudo abre oportunidades para melhorias futuras, como a incorporação de sensores de qualidade da água com leituras avançadas, integração com plataformas IoT, supervisão remota em nuvem e aplicação de algoritmos de otimização energética. Tais

aprimoramentos podem tornar o sistema ainda mais inteligente, econômico e alinhado às diretrizes de construção sustentável e à transformação digital do setor.

## REFERÊNCIAS

- [1] United States Geological Survey – USGS. Karst Aquifers. Disponível em: <https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/karst-aquifers>. Acesso em: 11 set. 2025.
- [2] Edwards Aquifer Alliance. Map of the Edwards Aquifer Recharge Zone. Disponível em: <https://aquiferalliance.org/wp-content/uploads/2014/01/USGSmapwboundaries.pdf>. Acesso em: 11 set. 2025.
- [3] Universidade de Brasília – UnB. Sistema Aquífero Guarani em Goiás. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/8934>. Acesso em: 11 set. 2025.
- [4] Revista Geoambiente. Estudo hidrogeológico em Iporá-GO. Disponível em: <https://revistas.ufj.edu.br/geoambiente/article/view/52073>. Acesso em: 11 set. 2025.
- [5] Governo de Goiás, Cimehgo – “Caracterização da Bacia Hidrográfica do Rio Meia Ponte”. Disponível em: <https://goias.gov.br/meioambiente/cimehgo-bacia/>. Acesso em: 11 set. 2025.
- [6] Jornal Opção – “Goiânia já soterrou 85 córregos; alguns ainda vivem”. Disponível em: <https://www.jornalopcao.com.br/reportagens/goiania-ja-soterrou-85-corregos-alguns-ainda-vivem-360592/>. Acesso em: 11 set. 2025.
- [7] Câmara Municipal de Goiânia – notícias “Recuperação de nascentes para evitar crise hídrica será tema de encontro”. Disponível em: <https://www.goiania.go.leg.br/sala-de-imprensa/noticias/recuperacao-de-nascentes-para-evitar-crise-hidrica-sera-tema-de-encontro>. Acesso em: 11 set. 2025.
- [8] SOUSA, R. L.; OLIVEIRA, A. M. Geotecnia aplicada a obras de engenharia civil. São Paulo: Oficina de Textos, 2018.
- [9] VARGAS, M. Introdução à Mecânica dos Solos. 3. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1981.
- [10] PINTO, C. S. Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- [11] JORNAL OPÇÃO. Goiânia já soterrou 85 córregos; alguns ainda vivem. Goiânia, 2021. Disponível em: <https://www.jornalopcao.com.br/reportagens/goiania-ja-soterrou-85-corregos-alguns-ainda-vivem-360592/>. Acesso em: 11 set. 2025.
- [12] HELENE, P. Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. São Paulo: PINI, 1992.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 15527: Água de chuva — Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis — Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

- [14] TUCCI, C. E. M. Gestão de águas pluviais urbanas. Brasília: Ministério das Cidades/Global Water Partnership, 2005.
- [15] NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.
- [16] CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Controle de poluição em canteiros de obras. São Paulo: CETESB, 2019. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 11 set. 2025.
- [17] ANNECHINI, Juliana. Aproveitamento de água de chuva para fins não potáveis em edificações. 2005. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- [18] HERRMANN, Thomas; SCHMIDT, Manfred. Rainwater utilization in Germany: efficiency, dimensioning, hydraulic and environmental aspects. Urban Water, v. 1, n. 4, p.
- [19] ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Atlas da água: abastecimento urbano de água no Brasil. Brasília: ANA, 2019.
- [20] CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Manual de conservação e uso racional da água em edificações. São Paulo: CETESB, 2017.
- [21] CARVALHO, J. P.; BASTOS, R. C. Aproveitamento de águas subterrâneas em canteiros de obras. Revista Construção Civil, São Paulo, v. 12, n. 4, p. 45-53, 2018.
- [22] OLIVEIRA, A. S.; SOUZA, M. L. Abastecimento de água em obras de pequeno porte. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 14, n. 2, p. 177-184, 2009.
- [23] PÁDUA, J. A.; MELO, R. G. Sustentabilidade em canteiros de obras: práticas de gestão hídrica. Belo Horizonte: UFMG, 2015.
- [24] CAPUTO, H. P. Mecânica dos solos e suas aplicações. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- [25] VARGAS, M. Introdução à mecânica dos solos. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1981.
- [26] PINTO, C. S. Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL (ABGE). Manual de investigação geotécnica. São Paulo: ABGE, 2018.
- [28] SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. Geotecnia ambiental: fundamentos e aplicações. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- [29] CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União, Brasília, 2011.

- [30] FIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. Guia de uso racional da água em edificações. São Paulo: FIESP, 2018.
- [31] LIMA, T. C.; FERREIRA, A. C. Gestão sustentável da água em canteiros de obras. Revista Engenharia Civil em Debate, Fortaleza, v. 9, n. 2, p. 55-64, 2020.
- [32] CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção. Manual de práticas sustentáveis na construção civil. Brasília: CBIC, 2014.
- [33] DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. Métodos e técnicas de tratamento de água. 2. ed. São Carlos: Rima, 2005.
- [34] VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.
- [35] METCALF, L.; EDDY, H. Tratamento de águas residuárias: princípios e práticas. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.
- [36] AMY, G.; DREWS, A. Membrane processes for water reuse. Water Science and Technology, v. 62, n. 5, p. 1101-1109, 2010.
- [37] PEREIRA, C. C.; OLIVEIRA, D. R. Armazenamento de água em canteiros de obras: práticas e desafios. Revista Construção Sustentável, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 33-41, 2019.
- [38] CBIC – Câmara Brasileira da Indústria da Construção. Gestão ambiental de resíduos e água em obras. Brasília: CBIC, 2018.
- [39] DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. Métodos e técnicas de tratamento de água. 2. ed. São Carlos: Rima, 2005.
- [40] PEREIRA, C. C.; OLIVEIRA, D. R. Armazenamento de água em canteiros de obras: práticas e desafios. Revista Construção Sustentável, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 33-41, 2019.
- [41] RICHTER, C. A. Tratamento de água: tecnologia atualizada. São Paulo: Edgard Blücher, 2009.
- [42] WHO – World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality. 4. ed. Geneva: WHO, 2017.
- [43] GOTTSCHALK, C.; LIBRA, J. A.; SAUPE, A. Ozonation of water and wastewater: a practical guide to understanding ozone and its applications. 2. ed. New York: Wiley-VCH, 2010.
- [44] WHO – World Health Organization. Combating waterborne disease at the household level. Geneva: WHO, 2007.
- [45] WHITE, F. M. *Fluid Mechanics*. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [46] SULZER PUMPS. *Centrifugal Pump Handbook*. 3. ed. Oxford: Elsevier, 2010.
- [47] KÄRNELL, S.; FERNLUND, E.; LAGERSTEDT, F.; ERICSON, L. *Pump-Controlled Actuators with Dump Valves*. In: 17th Scandinavian International Conference on Fluid Power (SICFP'21), Linköping, Sweden, 2021.

- [48] KARASSIK, I. J. et al. *Pump Handbook*. 4.ed., McGraw-Hill, 2008.
- [49] HUANG, G. Q.; LI, K. *Modular Design*. In: LAPERRIÈRE, L.; REINHART, G. (eds.). *Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, 2013.
- [50] BALDWIN, C. Y.; CLARK, K. B. Modularity in the Design of Complex Engineering Systems. In: *Understanding Complex Systems*. Springer, 2007.
- [51] NUNES, F. L.; ROCHA, M. V.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. Modularização – Conceitos, Abordagens e Benefícios: Uma Revisão Teórica. *Revista Produção Online*, v. 14, n. 3, 2014.
- [52] SOLOMAN, Sabrie. *Sensores e sistemas de controle na indústria*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- [53] PAPOUTSIDAKIS, M.; SRIVASTAVA, A.; CHOWDHARY, S. *Displacement Sensors for Linear Electrical, Hydraulic and Pneumatic Actuators*. IEEE, 2019.
- [54] RENATO, Claiton Moro; CARVALHO, Válter Luís António de. *Controladores lógicos programáveis: sistemas discretos*. 2. ed. São Paulo: Érica, 2011.
- [55] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). Programmable controllers – Part 1: General information. IEC 61131-1, 2013.
- [56] NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION (NEMA). Programmable Controllers. ICS 3.1, 1993.
- [57] DORF, R. C.; BISHOP, R. H. *Modern Control Systems*. 12. ed. Prentice Hall, 2011.
- [58] ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. *PID Controllers*. 2nd ed. Research Triangle Park: Instrument Society of America (ISA), 1995.
- [59] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). Programmable controllers – Part 3: Programming languages. IEC 61131-3, 2013.