

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE  
MINAS GERAIS - *CAMPUS* SABARÁ  
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Elisabeth Soares Silva

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA SUPERVISÓRIO PARA O  
BOMBEAMENTO DE DRENO DE FUNDO**

Sabará  
2026

ELISABETH SOARES SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA SUPERVISÓRIO PARA O  
BOMBEAMENTO DE DRENO DE FUNDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus Sabará*, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

**Orientador:** Prof. Dr. Rodrigo Hiroshi Morofushi

Sabará  
2026

Silva, Elisabeth Soares

S586i            Desenvolvimento de um sistema supervisorio para o bombeamento de dreno de fundo [manuscrito]. / Elisabeth Soares Silva. - 2026.

63 f. : il.

Orientação: Prof. Dr. Rodrigo Hiroshi Murofushi.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) – Instituto Federal de Minas Gerais, *Campus* Sabará.

1. Automação industrial. – Monografia. 2. Engenharia de Minas. – Monografia. 3. Barragens de rejeitos – Dreno de fundo. – Monografia. 4. Drenagem. – Monografia. 5. Estruturas hidráulicas - Controle de bombeamento. – Monografia. 6. Sistemas de controle supervisorio. – Monografia. 7. Grafcet (Linguagem de programação de computador). – Monografia. I. Murofushi, Rodrigo Hiroshi. II. Instituto Federal de Minas Gerais, *Campus* Sabará. III. Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação. IV. Título.

CDU 681.5



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA**  
**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS**  
**Campus Sabará**

**Diretoria de Ensino, Pesquisa e Extensão**  
**Coordenação do Curso de Engenharia de Controle e Automação**  
Rodovia MGC 262, Km 10 - Bairro Sobradinho - CEP 34590-390 - Sabará - MG - www.ifmg.edu.br

## **ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

Aos vinte e nove dias do mês de janeiro do ano de dois mil e vinte e seis, às dezenove horas, sob a presidência do professor Rodrigo Hiroshi Murofushi, reuniu-se a banca examinadora composta pelos professores abaixo relacionados, para a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) da discente **Elisabeth Soares Silva**, matrícula nº 0050064, do curso de Engenharia de Controle e Automação, do IFMG *campus* Sabará.

O trabalho intitulado DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA SUPERVISÓRIO PARA O BOMBEAMENTO DE DRENO DE FUNDO foi apresentado e submetido à apreciação da banca. Após exposição, arguição e deliberação, a banca atribuiu a nota final de 72 pontos (de um total de 80). Somados aos 14 pontos atribuídos ao aluno pelo docente responsável pela disciplina de Projeto II, a aluna ficou com um total de 86 pontos, resultando em **aprovada**, condicionado ao cumprimento das orientações e prazos estabelecidos pelas normas acadêmicas institucionais.

Compuseram a Banca Examinadora:

- Membro 1 (Presidente): Prof. Rodrigo Hiroshi Murofushi (orientador)
- Membro 2: Prof. Paulo Aparecido Amaral Júnior
- Membro 3: Prof. Maicon Vaz Moreira

O discente deverá apresentar a versão final do trabalho em formato PDF e depositá-la no repositório institucional até o dia vinte e sete de fevereiro de dois mil e vinte e seis. O não cumprimento dessas exigências implicará na não contabilização das horas referentes aos componentes curriculares de TCC I e TCC II no sistema acadêmico.

A sessão foi encerrada às vinte horas e quarenta minutos. Para constar, eu, Rodrigo Hiroshi Murofushi, redigi a presente ata que após lida publicamente, foi aprovada e assinada pelos membros da banca examinadora.

Sabará, 28 de janeiro de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Hiroshi Murofushi**,  
**Professor EBTT**, em 04/02/2026, às 17:30, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Maicon Vaz Moreira, Professor EBTT**, em 04/02/2026, às 18:38, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Aparecido Amaral Junior, Professor EBTT**, em 05/02/2026, às 11:44, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2600082** e o código CRC **97018944**.

23714.001466/2025-48

2600082v1

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, Nilton e Maria, por todo o amor, apoio e incentivo incondicional ao longo de minha jornada acadêmica.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder saúde, sabedoria e força para superar os desafios e alcançar meus objetivos. Aos meus pais, Nilton e Maria, pela educação, amor e apoio incondicional que sempre me deram. À minha família, pelo carinho e suporte em todos os momentos da minha vida acadêmica. Agradeço aos meus professores, pela dedicação e pelo conhecimento compartilhado ao longo do curso, especialmente ao meu orientador, pela paciência, orientação e valiosas contribuições para a realização deste trabalho. Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado nos momentos difíceis e comemoraram comigo cada conquista. A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero agradecimento.

"É preciso que eu suporte duas ou três larvas se quiser conhecer as borboletas."

Antoine de Saint-Exupéry, O Pequeno Príncipe.

## RESUMO

Em mineração, o dreno de fundo é um sistema destinado à remoção da água que se acumula nas bases de barragens de rejeitos ou pilhas de estéril, em decorrência da drenagem natural do solo. Sua principal função, na mineração de ouro, é realizar a drenagem do efluente acumulado, evitando o aumento da pressão interna na estrutura e reduzindo os riscos de contaminação ambiental, por meio do bombeamento da água de um poço de drenagem de volta ao processo e, posteriormente, à barragem de rejeitos. Este trabalho aborda a proposta de melhoria de um sistema de bombeamento de dreno de fundo existente em uma mineradora de ouro, o qual operava com duas bombas interligadas a uma única linha de tubulação responsável pelo retorno dos efluentes à barragem. Durante períodos de chuvas intensas, o sistema mostrou-se incapaz de atender à vazão requerida, ocasionando o transbordamento de efluentes e o contato com o solo, configurando um cenário de risco ambiental. Tal situação pode resultar em prejuízos à empresa, como penalidades legais, impactos financeiros, danos à reputação e não conformidade com a legislação ambiental vigente. Diante desse contexto, tornou-se necessária a elaboração de um projeto de melhoria do sistema, implantando uma bomba adicional, visando o aumento da capacidade de bombeamento. Como parte dessa proposta, o presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma solução de automação e supervisão para o sistema de bombeamento do dreno de fundo, contemplando a modelagem do processo, a definição dos cenários operacionais, a implementação da lógica de controle em CLP e o desenvolvimento de um sistema supervisório e de aquisição de dados (SCADA). Essa solução visa proporcionar monitoramento e comando em tempo real do processo, contribuindo para uma operação eficiente.

**Palavras-chave:** Automação Industrial; Dreno de fundo; Controle de Bombeamento; Sistema Supervisório; GRAFCET;

## ABSTRACT

In mining, the bottom drainage system is designed to remove water that accumulates at the bases of tailings dams or waste rock piles as a result of natural soil drainage. In gold mining, its main function is to drain the accumulated effluent, preventing the increase of internal pressure within the structure and reducing the risks of environmental contamination by pumping water from a drainage well back into the process and, subsequently, to the tailings dam. This work addresses the proposal for improvement of an existing bottom drainage pumping system in a gold mining operation, which originally operated with two pumps connected to a single pipeline responsible for returning the effluents to the dam. During periods of intense rainfall, the system proved unable to meet the required flow rate, resulting in effluent overflow and contact with the soil, characterizing an environmental risk scenario. Such conditions may lead to losses for the company, including legal penalties, financial impacts, damage to reputation, and non-compliance with current environmental legislation. Given this context, it became necessary to develop a system improvement project, including the installation of an additional pump in order to increase pumping capacity. As part of this proposal, the present work aims to develop an automation and supervision solution for the bottom drainage pumping system, encompassing process modeling, definition of operational scenarios, implementation of control logic in a programmable logic controller (PLC), and the development of a supervisory control and data acquisition (SCADA) system. This solution is intended to provide real-time monitoring and control of the process, contributing to a more efficient operation.

**Keywords:** Industrial Automation; Bottom Drainage; Pumping Control; Supervisory System; GRAFCET.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ilustração de uma barragem de rejeito . . . . .	14
Figura 2 – Rota de processo . . . . .	15
Figura 3 – Comparação entre a configuração anterior e a configuração atual do sistema de bombeamento do dreno de fundo. . . . .	16
Figura 4 – Localização do sistema de dreno de fundo em relação à barragem de rejeitos	18
Figura 5 – Níveis da pirâmide de automação . . . . .	22
Figura 6 – Simbologia da Norma ISA-5.1. . . . .	23
Figura 7 – Tabela de letras de identificação ISA-5.1. . . . .	24
Figura 8 – Exemplo de fluxograma de engenharia. . . . .	25
Figura 9 – Exemplo de tela supervisória. . . . .	26
Figura 10 – Imagem representativa da construção de uma tela sinótica no Blueplant. . .	27
Figura 11 – Controlador Programável XP340 da Série Nexto. . . . .	28
Figura 12 – Exemplo de GRAFCET aplicado à lógica de controle do processo . . . . .	29
Figura 13 – Dreno de fundo de uma barragem de rejeitos de mineração de ouro. . . . .	30
Figura 14 – Dreno de fundo de uma barragem de rejeitos de mineração de ouro. . . . .	30
Figura 15 – Retorno do efluente do dreno de fundo na barragem. . . . .	31
Figura 16 – Drenagem interna de Barragem de Terra . . . . .	32
Figura 17 – Fluxograma de Engenharia - Dreno de Fundo . . . . .	37
Figura 18 – Modelagem lógica do sistema de bombeamento . . . . .	40
Figura 19 – Fluxograma funcional de Programação. . . . .	41
Figura 20 – Tela principal do sistema supervisório. . . . .	43
Figura 21 – Tela gráfica do sistema supervisório. . . . .	44
Figura 22 – Representação ilustrativa da comunicação cliente-servidor no modbus. . . .	45
Figura 23 – Tabela de resultados dos testes. . . . .	48
Figura 24 – Teste do cenário 1, nível igual a 80% - Tela principal. . . . .	49
Figura 25 – Teste do cenário 1, nível igual a 80% - Tela gráfica. . . . .	49
Figura 26 – Teste do cenário 2, nível igual a 70% - Tela principal. . . . .	50
Figura 27 – Teste do cenário 2, nível igual a 70% - Tela gráfica. . . . .	50
Figura 28 – Teste do cenário 8, nível igual a 50% - Tela principal. . . . .	51
Figura 29 – Trecho inicial do código em GRAFCET. . . . .	54
Figura 30 – Continuação do código em GRAFCET. . . . .	55
Figura 31 – Segmento intermediário do código. . . . .	56
Figura 32 – Segmento intermediário do código. . . . .	57
Figura 33 – Parte final do código em GRAFCET. . . . .	58
Figura 34 – Fluxograma de Engenharia do Dreno de Fundo. . . . .	59

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Tabela verdade dos cenários operacionais das bombas. . . . .	36
Tabela 2 – Correspondência entre variáveis do MasterTool e tags do sistema supervisorio	46

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
NRM	Normas Reguladoras de Mineração
DNPM	Departamento Nacional da Produção Mineral
NBR	Norma Brasileira
IHM	Interface Homem - Máquina
CLP	Controlador Lógico Programável
ETA	Estação de Tratamento de Água
ISA	<i>International Society of Automation</i>
SFC	<i>Sequential Function Chart</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>17</b>
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	<i>17</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>17</i>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>21</b>
<b>3.1</b>	<b>Automação Industrial</b>	<b>21</b>
<i>3.1.1</i>	<i>Instrumentação e Controle de Processos</i>	<i>22</i>
<i>3.1.2</i>	<i>Sistema Supervisório</i>	<i>26</i>
<i>3.1.3</i>	<i>Plataforma de Supervisão: BluePlant</i>	<i>27</i>
<i>3.1.4</i>	<i>Estrutura do Sistema de Controle</i>	<i>28</i>
<b>3.2</b>	<b>Sistema de Bombeamento de Dreno de Fundo</b>	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>33</b>
<b>4.1</b>	<b>Levantamento de Dados e Informações</b>	<b>33</b>
<b>4.2</b>	<b>Modelagem do sistema</b>	<b>33</b>
<b>4.3</b>	<b>Ambiente de Estudo</b>	<b>33</b>
<b>4.4</b>	<b>Ferramentas e tecnologias utilizadas</b>	<b>33</b>
<b>4.5</b>	<b>Estratégia de Testes</b>	<b>34</b>
<b>4.6</b>	<b>Etapas Metodológicas</b>	<b>34</b>
<b>4.7</b>	<b>Limite de Escopo</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS</b>	<b>36</b>
<b>5.1</b>	<b>Modelagem Lógica do Sistema de Bombeamento</b>	<b>36</b>
<b>5.2</b>	<b>Desenvolvimento da Lógica de Controle</b>	<b>41</b>
<b>5.3</b>	<b>Desenvolvimento do Sistema Supervisório</b>	<b>42</b>
<b>5.4</b>	<b>Arquitetura do Sistema de Automação</b>	<b>45</b>
<i>5.4.1</i>	<i>Mapeamento de Tags para Comunicação Modbus TCP</i>	<i>46</i>
<b>5.5</b>	<b>Testes em Bancada</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>52</b>

<b>6.1</b>	<b>Conclusão . . . . .</b>	<b>52</b>
<b>6.2</b>	<b>Trabalhos Futuros . . . . .</b>	<b>53</b>
<b>7</b>	<b>APÊNDICE A - CÓDIGO DO SISTEMA EM GRAFCET . . . . .</b>	<b>54</b>
<b>8</b>	<b>APÊNDICE B - FLUXOGRAMA DE ENGENHARIA - DRENO DE FUNDO . . . . .</b>	<b>59</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>60</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A mineração desempenha um papel importante no desenvolvimento econômico e social do país, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida da população. Esse setor, quando conduzido de forma responsável e alinhado aos princípios do desenvolvimento sustentável, torna-se fundamental para o progresso de uma sociedade equilibrada e desenvolvida. Farias. No setor mineral, a segurança é uma questão prioritária, uma vez que as atividades são inerentemente perigosas e exigem monitoramento constante. CUNHA (2022) alerta que os trabalhadores na mineração podem ser expostos a riscos físicos, químicos e biológicos. FRAGA (2019) enfatiza que a adoção de tecnologias autônomas proporciona aos operadores maior conforto na execução das atividades e sensação ampliada de produtividade.

A extração de minério é um processo industrial que armazena grande quantidade de rejeito estéril formado de substâncias naturais que não possuem valor econômico, nas estruturas conhecidas como barragem de rejeito ou pilha de estéril. Para a construção e operação, devem cumprir as Normas Reguladoras de Mineração – NRM nº 19, que trata da Disposição de Estéril, Rejeitos e Produtos, do Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM) e NBR 13029 (ABNT, 2006), que estabelece os requisitos essenciais para o desenvolvimento e a apresentação de projetos voltados à disposição de estéril. Uma preocupação relacionada às barragens de rejeito é a gestão do efluente pelo acúmulo de água gerado no processo de beneficiamento.

Para a drenagem de efluente, utiliza-se normalmente o dreno de fundo, um sistema de drenagem subterrânea projetado para conduzir os fluidos infiltrados para uma vala coletora ou um poço de drenagem. De acordo com (AQUINO; NETO, 2022), esses drenos podem ser compostos por materiais como colchões de pedras ou valas preenchidas com pedregulhos, os quais facilitam a passagem da água, geralmente instalados na base da estrutura, sendo fundamental para a estabilidade e segurança, evitando o acúmulo de água dentro da barragem, o que poderia gerar pressão interna, conforme explicado por (FARIA; BOTELHO, 2018).

A Figura 1 ilustra a configuração de uma barragem de rejeito, mostrando a drenagem interna.

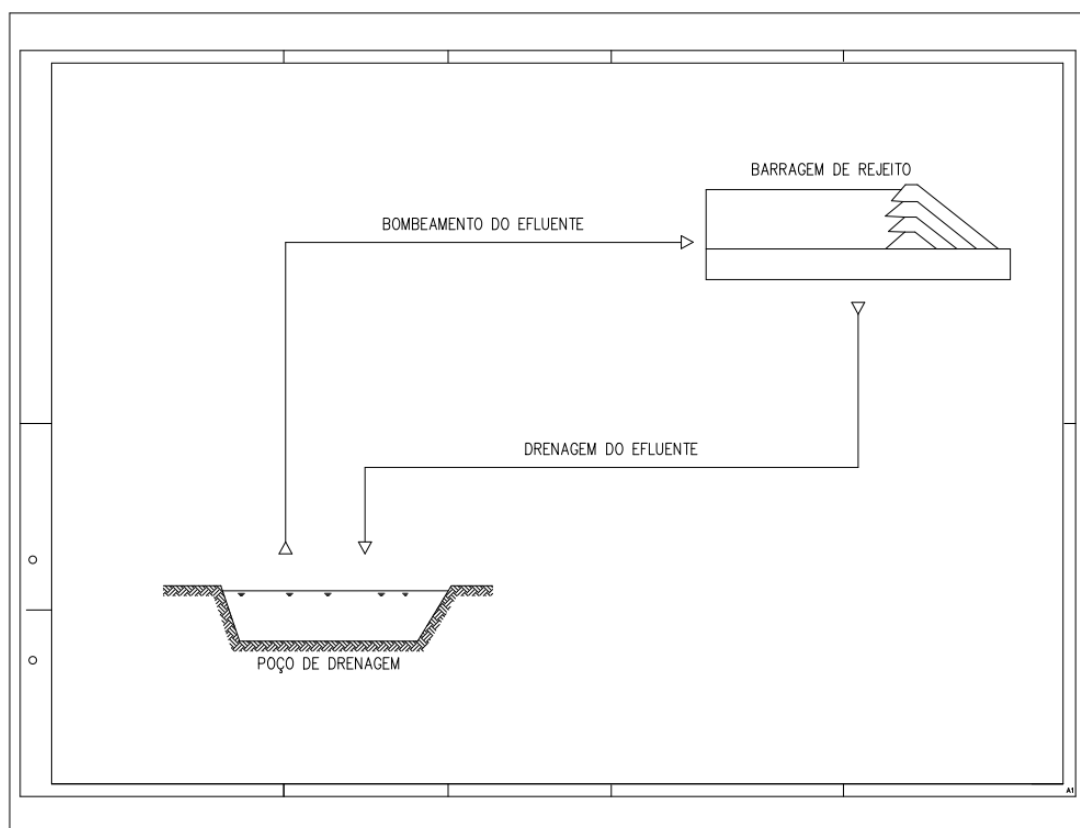
Figura 1 – Ilustração de uma barragem de rejeito



Na mineração de ouro, as atividades do processo estão associadas à presença de metais pesados. Dessa forma, barragens de rejeito e resíduos líquidos possuem um elevado potencial de contaminação ambiental. Caso os contaminantes atinjam o solo e os cursos d'água por meio da drenagem ácida, os impactos podem ser severos, prejudicando a comunidade local, que poderá ficar impossibilitada de utilizar a água contaminada para consumo, agricultura e outras necessidades. (SILVA *et al.*, 2004).

Na operação de uma mineradora de ouro, o sistema de bombeamento do dreno de fundo exerce uma função importante de transportar os efluentes do poço de drenagem (Sump) de volta para a barragem. Esse procedimento é realizado para conter e controlar os efluentes potencialmente contaminados dentro do próprio sistema, evitando que a água percole para o meio ambiente e atinja o solo ou corpos hídricos superficiais e subterrâneos. A Figura 2 representa a rota de processo do projeto.

Figura 2 – Rota de processo



Fonte: Própria autora, 2025.

Inicialmente, o sistema era composto por duas bombas, sendo uma principal e uma reserva. Essa configuração mostrou-se insuficiente para atender à vazão necessária, especialmente durante períodos chuvosos, resultando no transbordamento de efluentes no poço de drenagem que, ao atingir o solo, representam riscos ambientais. Essa situação pode gerar danos ambientais e comprometer a reputação da empresa.

Com o objetivo de melhorar a capacidade operacional do sistema e reduzir os riscos associados ao acúmulo de efluentes, foi proposto um projeto de ampliação do sistema de bombeamento por meio da instalação de uma terceira bomba. Dessa forma, a nova configuração passou a operar com uma bomba principal e duas bombas auxiliares, aumentando a confiabilidade e a capacidade de resposta do sistema frente às variações de vazão.

A Figura 3 apresenta um comparativo entre a configuração anterior do sistema de bombeamento e a configuração atual após a ampliação do sistema.

Após a implantação do novo equipamento, tornou-se necessário acompanhar a operação, e desenvolver um sistema de controle para integrar e monitorar os equipamentos e as variáveis. O sistema deve coletar e organizar dados, que são apresentados ao operador por meio de um sistema supervisor, possibilitando o monitoramento e o comando em tempo real (SANTOS; MARINATO, 2021). Além disso, será possível simular cenários operacionais, como falhas de equipamentos e períodos de chuvas intensas, auxiliando na tomada de decisão para evitar falhas e mitigar impactos ambientais.

Figura 3 – Comparação entre a configuração anterior e a configuração atual do sistema de bombeamento do dreno de fundo.



Fonte: Própria autora, 2025.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 *Objetivo geral*

Desenvolver um sistema de automação e supervisão para controlar o bombeamento de efluentes em barragens de rejeito no setor de extração mineral.

### 1.1.2 *Objetivos específicos*

- Realizar o levantamento e a especificação da lista de instrumentos e equipamentos envolvidos no projeto;
- Realizar a especificação de funcionamento da nova configuração do sistema;
- Desenvolver um sistema de automação do poço de drenagem.
- Desenvolver um sistema SCADA;
- Analisar o desempenho do sistema de controle do bombeamento em uma bancada didática.

## 1.2 Justificativa

A mineração é um dos setores que contribui estrategicamente para o desenvolvimento econômico do Brasil. Embora essencial para a economia, essa atividade está associada a grandes desafios ambientais, conforme explicado por FERNANDES; ARAUJO (2016). Segundo FIRMIANO (2020), o processo de beneficiamento do ouro com cianeto e arsênio é uma alternativa economicamente viável para as indústrias de mineração, porém apresenta alta toxicidade. Nesse contexto, a extração de ouro gera rejeitos que precisam ser gerenciados adequadamente para evitar impactos severos ao meio ambiente. Em casos de barragens de rejeitos, realiza-se a drenagem da água com potencial de contaminação por meio do dreno de fundo, descrito por AQUINO; NETO (2022), como valas preenchidas com pedregulhos que promovem uma drenagem natural do solo. O sistema de bombeamento do dreno de fundo transporta os efluentes acumulados para um poço de drenagem situado na base da barragem. A Figura 4 apresenta a localização aproximada desse sistema em relação à barragem, com base em imagem de satélite.

Figura 4 – Localização do sistema de dreno de fundo em relação à barragem de rejeitos



Fonte: Adaptado de Google Earth, 2025.

O efluente é bombeado de volta para barragem, evitando o acúmulo de água e a ocorrência de possíveis transbordamentos. Esse cenário, no entanto, pode se apresentar de forma distinta em casos nos quais a barragem se encontra em processo de descaracterização, situação em que o efluente drenado pode ser direcionado para uma Estação de Tratamento de Água (ETA), e não retornando à barragem. Quando não há a descaracterização da barragem, a operação do sistema de drenagem e bombeamento apresenta vulnerabilidades, especialmente nos momentos em que a capacidade de bombeamento é comprometida. Nessas condições, o acúmulo excessivo de efluentes pode elevar os riscos operacionais e ambientais. Conforme destacado por SILVA *et al.* (2004), o transbordamento desses efluentes pode comprometer a qualidade dos recursos hídricos, resultando na contaminação de rios e reservatórios. Esse impacto afeta diretamente as comunidades próximas, que podem perder o acesso à água potável, além de prejudicar a fauna, a flora e o equilíbrio ambiental da região. Esses danos configuram crime ambiental, conforme previsto na Lei nº 9.605/1998 (Lei de Crimes Ambientais), (Brasil, 1998).

Neste trabalho, propõe-se o desenvolvimento de um sistema de supervisão e controle aplicado ao processo de bombeamento do dreno de fundo de uma mineradora de ouro, abrangendo o trajeto do efluente desde o poço de drenagem até o retorno à barragem. Originalmente, o sistema de drenagem da planta operava com duas bombas, configuração que se mostrou insuficiente para atender às condições operacionais do processo, especialmente em períodos de maior demanda. Em função disso, o sistema foi posteriormente ampliado para operar com três bombas instaladas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A automação em processos industriais proporciona eficiência, segurança e sustentabilidade, abrangendo processos complexos realizando atividades de forma autônoma (ROSÁRIO, 2012). Em mineração, a automação e controle realizados com qualidade garantem a continuidade das operações, possibilitando monitorar e controlar processos em tempo real. FRAGA (2019) enfatiza que a adoção de tecnologias autônomas proporciona aos operadores industriais maior conforto na execução das atividades e uma sensação ampliada de produtividade, colaborando com a redução de custos operacionais e no cumprimento de normas ambientais e de segurança.

Nesse sentido, ZANGHI (2019), em seu estudo sobre o conceito de sistema de supervisão e controle, ressalta que, com a evolução da indústria e a crescente demanda por maior capacidade de monitoramento e controle, o mercado desenvolveu sistemas computacionais capazes de integrar funcionalidades de supervisão e controle de processos, conhecidos como SCADA. Esses sistemas são compostos por elementos de hardware e software destinados à aquisição de dados para supervisão e controle em ambientes industriais.

No estudo realizado por MESQUITA; JEFFERSON; ANDRADE (2012), foi desenvolvido um sistema supervisor para uma planta didática de controle de nível, permitindo a simulação contínua das variações dinâmicas do processo. Utilizou-se o *software* WinCC Flexible para a criação das telas de supervisão, integrado a bancadas de CLPs Siemens S7-200 da Automatus Didática. O sistema usa um sensor de pressão para converter a altura do líquido em um sinal elétrico, que é enviado ao CLP, processado via protocolo OPC Server (*OLE for Process Control*) e exibido na interface supervisória.

O projeto visava a implementação de sistemas supervisórios para quatro plantas didáticas do Laboratório de Automação e Controle de Processos Industriais (LACOPI), porém, devido a desafios como o desgaste dos equipamentos e à necessidade de manutenção, foi possível concluir apenas a supervisão da planta de nível. Apesar dos desafios, o projeto apresentou um estudo aprofundado sobre CLPs, redes industriais (PROFIBUS DP) e sistemas supervisórios.

O trabalho de MAIA (2022) aborda a aplicação da biblioteca *PlantPax*, disponibilizada pela *Rockwell Automation*, para o desenvolvimento de sistemas de controle e supervisão aplicados a processos industriais, seguindo os padrões ISA. A programação do CLP foi realizada no Logix Designer, integrante do Studio 5000, utilizando as linguagens gráficas FBD (*Function Block Diagram*) e Ladder, utilizando os blocos específicos da biblioteca *PlantPax*. O sistema supervisor foi implementado por meio do *FactoryTalk View Site Edition*, possibilitando o monitoramento do estado dos equipamentos e a operação remota do processo.

Desse modo, o objetivo principal foi alcançado, uma vez que a utilização da biblioteca *PlantPax* aumentou a eficiência e reduziu o tempo de desenvolvimento do sistema de controle. No entanto, a biblioteca apresenta limitações, pois não contempla todos os equipamentos necessários, como hidrociclones e filtros. Isso exige que as lógicas de controle e as interfaces homem-máquina

(IHMs) relacionadas a esses dispositivos sejam desenvolvidas do zero, o que pode demandar mais tempo.

O estudo de TENÓRIO *et al.* (2015) analisa a aplicação de sistemas automatizados no controle do processo de filtragem em plantas mineradoras. A pesquisa destaca que a implementação de sistemas supervisórios e CLP proporciona uma operação mais eficiente e segura, reduzindo a variabilidade do processo e aumentando a previsibilidade dos resultados.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica deste trabalho tem como objetivo apresentar os conceitos e princípios para a compreensão dos temas abordados ao longo da pesquisa, entre os quais se destacam a automação industrial, a instrumentação e o controle de processos, os sistemas supervisórios e o sistema de bombeamento de dreno de fundo.

#### 3.1 Automação Industrial

A automação industrial refere-se à utilização de sistemas de controle, controladores lógicos programáveis (CLPs) e dispositivos para monitorar e controlar equipamentos industriais, processos de produção e máquinas em uma fábrica ou instalação. Essa tecnologia visa substituir ou minimizar a necessidade de intervenção humana em processos repetitivos, aumentando a eficiência, a segurança e a confiabilidade, conforme apresentado por RIBEIRO (1999).

O conceito de automação remonta à Revolução Industrial, quando os primeiros mecanismos automatizados começaram a surgir, substituindo o trabalho manual por máquinas e novas tecnologias (ALMEIDA; MARTINS, 2018). Esse período abriu caminho para o surgimento da automação industrial, onde, com o avanço da eletrônica e da computação, foi possível melhorar a eficiência e reduzir custos nas fábricas. Atualmente, sistemas interconectados e autônomos transformam radicalmente a maneira de operar as indústrias envolvendo a gestão de sistemas complexos de produção em indústrias minerais, automotivas, alimentícias, petroquímicas e muitos outros setores.

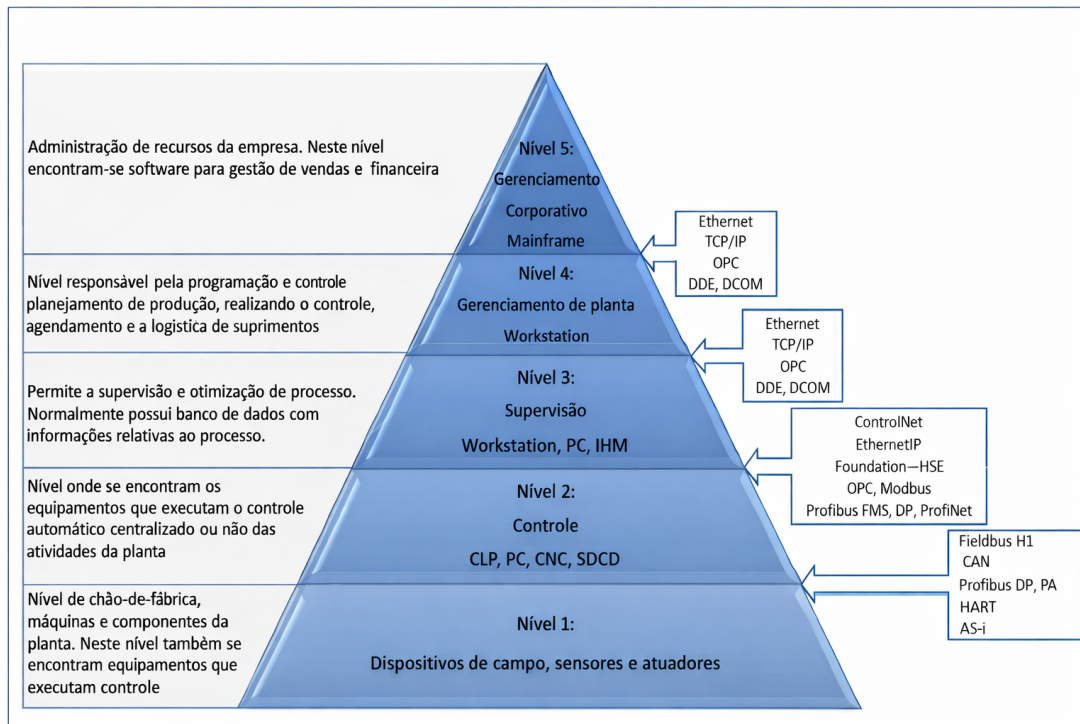
Dentro desse contexto, o sistema supervisório desempenha um papel importante no monitoramento e controle de processos industriais em tempo real (WIETHAN; PEROZZO, 2018). O objetivo de um sistema supervisório é fornecer um meio eficiente para supervisão de processos industriais complexos. Ele permite que os operadores visualizem o desempenho das máquinas, ajustem parâmetros de operação, detectem falhas ou condições anormais e tomem decisões informadas de forma ágil. Em geral, um sistema supervisório é composto por quatro componentes principais: unidades de controle, sensores, atuadores e interface de usuário (SANTOS; MARINATO, 2021).

A integração da automação industrial com sistemas supervisórios é fundamental para o sucesso das operações industriais modernas. Os sistemas de automação controlam os processos e equipamentos, enquanto os sistemas supervisórios fornecem a interface e os dados necessários para o gerenciamento e otimização dessas operações. Juntos, eles garantem maior eficiência, redução de erros e falhas, além da otimização dos custos operacionais.

A pirâmide da automação industrial é uma estrutura que classifica os níveis de controle e gestão de um sistema automatizado, abrangendo desde as operações no chão de fábrica até a tomada de decisões em nível estratégico. Ela é composta por cinco camadas, sendo que cada uma desempenha um papel na organização e no funcionamento dos processos industriais conforme a

Figura 5.

Figura 5 – Níveis da pirâmide de automação



Fonte: SMAR Automação Industrial, 2011. Adaptado pelo autor.

No nível 1 (campo), localizado na base da pirâmide, estão os sensores, atuadores e instrumentos que coletam dados e executam tarefas diretamente do processo industrial. Logo acima, encontra-se o nível 2 (controle), responsável por processar as informações recebidas do campo e aplicar comandos automáticos. Nesse nível, atuam dispositivos como CLPs. Subindo para o nível 3 (supervisão) ocupa a camada intermediária e utiliza sistemas supervisórios, para monitorar e visualizar os dados em tempo real. Isso possibilita, assim, que os operadores acompanhem o desempenho do processo e façam ajustes ou intervenções, se necessário. Acima desse, o nível 4 (execução) conecta o chão de fábrica à gestão da produção. Nessa camada, são realizadas atividades como rastreamento, controle de eficiência e gerenciamento dos recursos utilizados nos processos industriais. Por fim, no topo da pirâmide, está o nível 5 (gestão corporativa), que integra as áreas administrativas da empresa, como finanças, vendas e logística. Esse nível tem como objetivo alinhar os processos produtivos às estratégias de negócios, utilizando as informações coletadas nos níveis inferiores para as decisões gerenciais.

### 3.1.1 Instrumentação e Controle de Processos




























A instrumentação industrial envolve o uso de diversos dispositivos para monitorar e controlar parâmetros em processos produtivos. Segundo NERIS (2022) os dispositivos de instrumentação são organizados em malhas de controle, onde cada componente possui uma função

específica. Sensores detectam variações nas condições do processo, enquanto transmissores enviam esses dados para sistemas de supervisão. Indicadores e registradores exibem e armazenam as informações coletadas, permitindo análises detalhadas. Já os controladores atuam na regulação das variáveis, acionando elementos finais de controle, como válvulas e inversores de frequência, para corrigir desvios e manter a estabilidade do sistema.

A norma ISA (*International Society of Automation*) foi criada com o objetivo de padronizar a elaboração de diagramas funcionais, esquemas elétricos e sistemas de controle, fornecendo diretrizes que aprimoram a comunicação entre os profissionais da área. Fundada em 1945, a ISA desenvolveu uma série de normas que abrangem diversos tópicos, incluindo controle de processos industriais, instrumentação e automação de sistemas.

A Norma ISA-5.1 (AUTOMATION, 2008), que estabelece padrões para símbolos e identificação de instrumentação, é amplamente utilizada em documentos técnicos. Um dos documentos que mais emprega essa norma é o fluxograma de engenharia, que adota esses padrões para representar processos e instrumentos de forma padronizada. A Figura 6 ilustra um exemplo de simbologia da norma ISA usada em fluxograma de engenharia.

Figura 6 – Simbologia da Norma ISA-5.1.

	FLUXO PRINCIPAL		DIAFRAGMA
	FLUXO SECUNDÁRIO / EVENTUAL		SINAL ULTRASSÔNICO
	FLUXO EXISTENTE		ATUADOR PNEUMÁTICO
	LINHA DE REDE		BOMBA CENTRÍFUGA
	SINAL ELÉTRICO		ÁGUA DE SELAGEM
	EQUIPAMENTO EXISTENTE		PLC
	EQUIPAMENTO EXISTENTE		SISTEMA SUPERVISÓRIO
	VÁLVULA BORBOLETA		PARA AS TODOS OS INSTRUMENTOS CONSIDERAR DESCRIÇÃO ABAIXO:
	VÁLVULA DE RETENÇÃO		0591 – ÁREA
	VÁLVULA ESFERA		FIT – NOMENCLATURA ISA
	VÁLVULA MANGOTE		101 – SEQUENCIAL
	ENGATE RÁPIDO		
	REDUÇÃO CONCENTRICA		
	REDUÇÃO EXCÊNTRICA		
	MEDIDOR DE VAZÃO MAGNÉTICO		
	DRENO		

Fonte: AUTOMATION, 2008. Adaptado pelo autor.

A identificação dos instrumentos é realizada por meio de uma tabela de letras de identificação, na qual a primeira letra representa a variável de processo do instrumento, como, por

exemplo, medidor de temperatura, pressão ou nível. As letras subsequentes fornecem informações adicionais, como o tipo do dispositivo e suas características específicas, como se é um indicador, transmissor ou controlador.

A Figura 7 exibe a tabela de letras de identificação de acordo com a norma ISA-5.1, o que facilita a leitura e a interpretação de diversos documentos de engenharia utilizados na indústria, tais como fluxogramas de engenharia, listas de entrada e saída, folhas de dados, diagramas de interligação, entre outros.

Figura 7 – Tabela de letras de identificação ISA-5.1.

TABELA ISA 5.1

PRIMEIRA LETRA		LETRAS SUBSEQUENTES			
	VARIÁVEL MEDIDA OU INICIADA	MODIFICADORA	LEITURA OU VARIÁVEL PASSIVA	FUNÇÃO DA SAÍDA	MODIFICADORA
A	ANÁLISE		ALARME		
B	CHAMA DO QUEIMADOR				
C	CONDUTIVIDADE			CONTROLE	
D	DENSID. OU PESO ESP.	DIFERENCIAL			
E	TENSÃO		ELEMENTO PRIMÁRIO		
F	VAZÃO	NOMINAL			
G	–		VISOR		
H	OPERAÇÃO MANUAL				ALTO
I	CORRENTE		INDICADA		
J	POTÊNCIA	AJUSTE			
K	TEMPO			ESTAÇÃO DE CONTROLE	
L	NÍVEL		LÂMPADA PILOTO		BAIXO
M	UMIDADE	INSTANTÂNEO			MEIO OU INTERMEDIÁRIO
N	–				
O	–		ORIFÍCIO DE RESTRIÇÃO		
P	PRESSÃO OU VÁCUO		CONEXÃO PARA PONTO DE TESTE		
Q	QUANTIDADE	INTEGRAL OU TOTAL		CONTROLE	
R	RADIOATIVIDADE		REGISTRADOR		
S	VEL. OU FREQUÊNCIA	SEGURANÇA		CHAVE	
T	TEMPERATURA			TRANSMISSOR	
U	MULTIVARIÁVEL		MULTIFUNÇÃO	MULTIFUNÇÃO	MULTIFUNÇÃO
V	VIBRAÇÃO			VÁLVULA OU DEFLETORA	
W	PESO OU FORÇA		POÇO OU PONTA DE PROVA		
X	SONORO				
Y	POSIÇÃO DE EQUIP.			RELÉ, RELÉ DE COMPUTAÇÃO, CONVERSOR	
Z	POSIÇÃO			ACIONADOR OU ATUADOR P/ ELEMENTO FINAL DE CONTROLE	

Fonte: AUTOMATION, 2008. Adaptado pelo autor.

A nomenclatura é organizada com letras e números, como mostrado abaixo:

• **FT-01:**

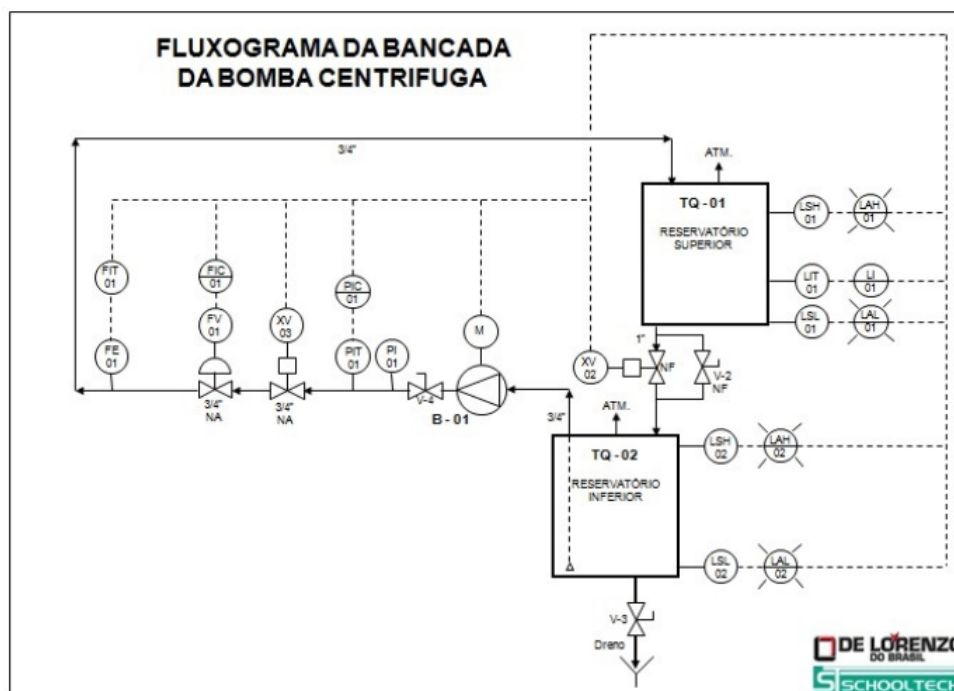
– **F:** Vazão

- **T**: Transmissor.
  - **01**: Número identificador do instrumento.
- **LIT-01**:
    - **L**: Nível
    - **I**: Indicador.
    - **T**: Transmissor.
    - **01**: Número identificador do instrumento.

Desse modo, torna-se possível interpretar os fluxogramas de engenharia utilizados na indústria, considerando que há uma norma específica responsável por padronizar a simbologia e a identificação de instrumentos. Em algumas indústrias, uma prática comum para a identificação e a rastreabilidade dos instrumentos consiste na inclusão do número da área da planta onde o equipamento está instalado antes das letras de identificação e do número sequencial. Nesse caso, um transmissor de vazão pode ser identificado, por exemplo, como XXXX-FT-01 ou XXXX-FT-001, em que XXXX representa o número da área na qual o instrumento está localizado, e o número final corresponde ao sequencial de identificação do instrumento.

A Figura 8 apresenta um exemplo ilustrativo de fluxograma de engenharia de uma bancada de bomba centrífuga.

Figura 8 – Exemplo de fluxograma de engenharia.



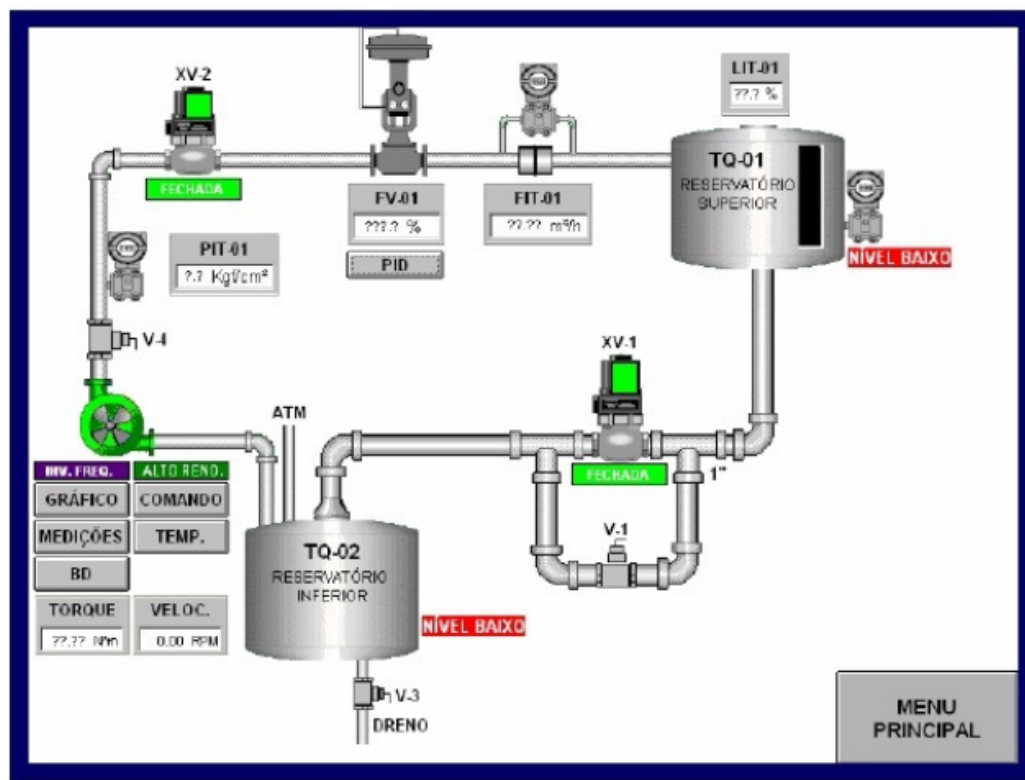
### 3.1.2 Sistema Supervisório

De acordo com (SANTOS; MARINATO, 2021), o sistema SCADA é um conjunto de ferramentas que coleta dados de diferentes fontes e os exibe de forma amigável ao operador. Esse operador é responsável por interagir com o sistema, interpretando as informações fornecidas pelo supervisório.

Uma das principais vantagens é o monitoramento remoto, que possibilita o acesso às informações e à gestão do processo à distância. Isso facilita a identificação de falhas e ajustes operacionais sem a necessidade de presença física no local.

A Figura 9 apresenta um exemplo de tela de supervisório, que corresponde à tela principal do sistema supervisório da bancada da bomba centrífuga mostrada na Figura 8. Nela, é possível visualizar os reservatórios, a bomba e os demais instrumentos. Ou seja, a tela supervisória reflete o fluxograma de engenharia, o que, por sua vez, representa a planta industrial, proporcionando uma visão clara e interativa do processo.

Figura 9 – Exemplo de tela supervisória.



Fonte: LORENZO, 2010.

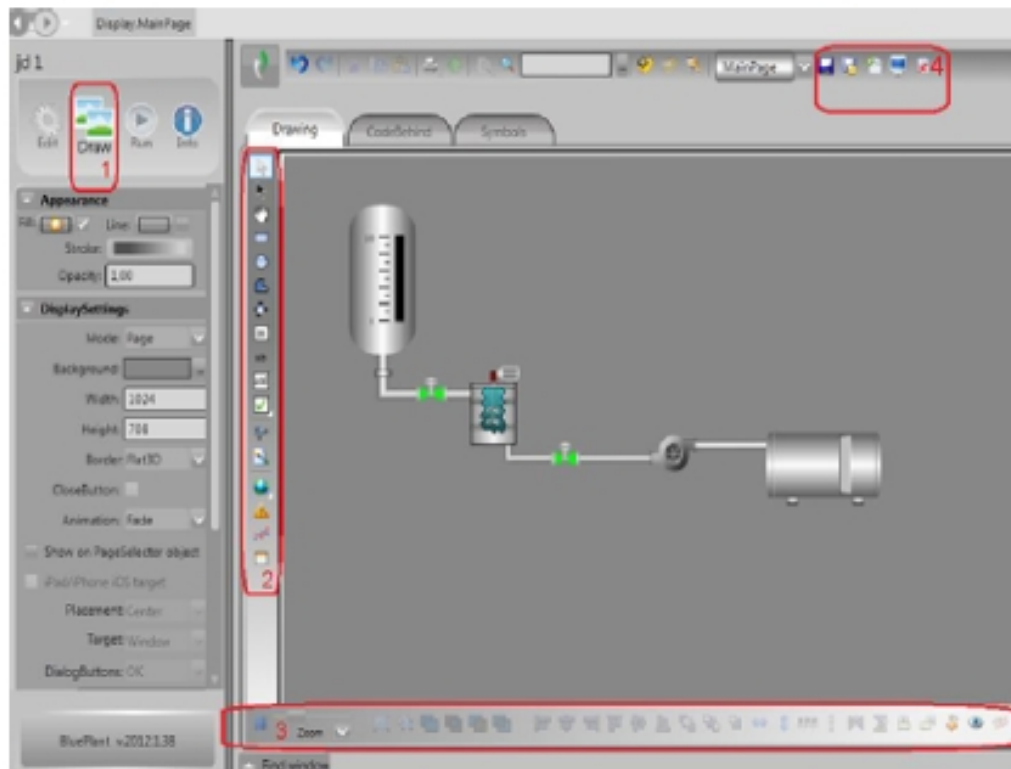
De acordo com (CONSTAIN *et al.*, 2011), o operador em sistemas SCADA é responsável pela supervisão do processo e pela interação com a Interface Homem-Máquina, que permite o monitoramento, controle e gerenciamento das informações do sistema.

### 3.1.3 Plataforma de Supervisão: BluePlant

Conforme a documentação técnica da ALTUS (2021) o BluePlant possibilita a criação de interfaces gráficas modernas, interativas e intuitivas. Essa característica contribui para uma melhor experiência do operador, favorecendo a visualização clara das variáveis do processo e reduzindo a probabilidade de erros operacionais durante a supervisão.

Outro aspecto relevante da plataforma é a disponibilidade de uma biblioteca de símbolos gráficos, que permite a construção de telas sinóticas representativas da planta industrial. Esses recursos visuais facilitam a interpretação do processo, aceleram o desenvolvimento das telas de supervisão e contribuem para a padronização da interface conforme é possível ver na figura 10.

Figura 10 – Imagem representativa da construção de uma tela sinótica no Blueplant.



Fonte: Adaptado de ALTUS, 2021.

O BluePlant também possibilita o mapeamento de variáveis de processo em tempo real, permitindo o acompanhamento contínuo de grandezas como nível, pressão e vazão. Essa funcionalidade é essencial em sistemas supervisórios, uma vez que fornece subsídios para a tomada de decisão operacional e para a identificação de anomalias no processo.

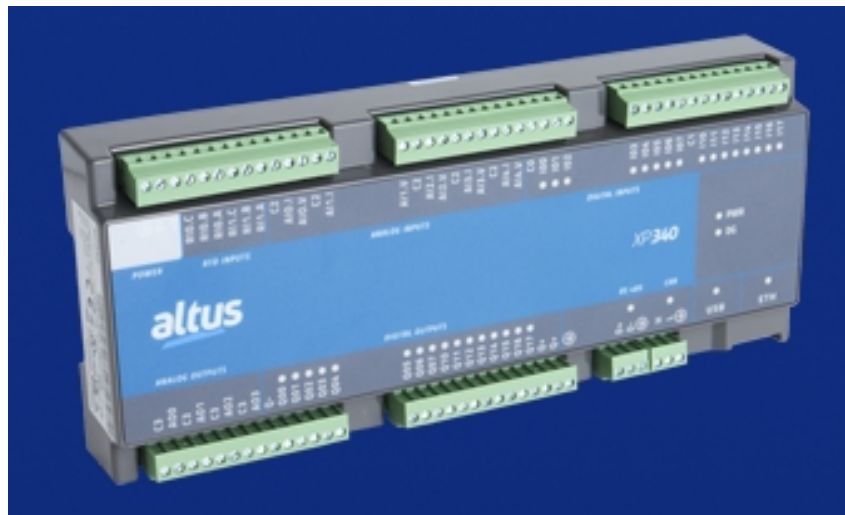
Além disso, a plataforma dispõe de recursos de acessibilidade remota por meio de servidor Web, possibilitando o acesso às telas de supervisão a partir de diferentes dispositivos conectados à rede (ALTUS, 2021). Tal característica amplia a flexibilidade operacional e se mostra especialmente relevante em aplicações industriais que demandam monitoramento contínuo e intervenções à distância.

### 3.1.4 Estrutura do Sistema de Controle

Conforme documentação técnica da ALTUS (2025) o CLP XP340, pertencente à Série Nexto, possui comunicação Ethernet, permitindo a troca de dados com outros sistemas por meio de protocolos industriais amplamente utilizados, como o Modbus TCP. Essa funcionalidade possibilita a integração eficiente com a plataforma de supervisão, garantindo a comunicação entre o nível de controle e o nível supervisiório, conforme apresentado na Figura 11.

Além disso, o controlador conta com canal serial RS-485 com suporte ao protocolo Modbus, o que facilita a comunicação com dispositivos de campo, como transmissores e sensores. Essa característica amplia a interoperabilidade do sistema com diferentes equipamentos de instrumentação.

Figura 11 – Controlador Programável XP340 da Série Nexto.

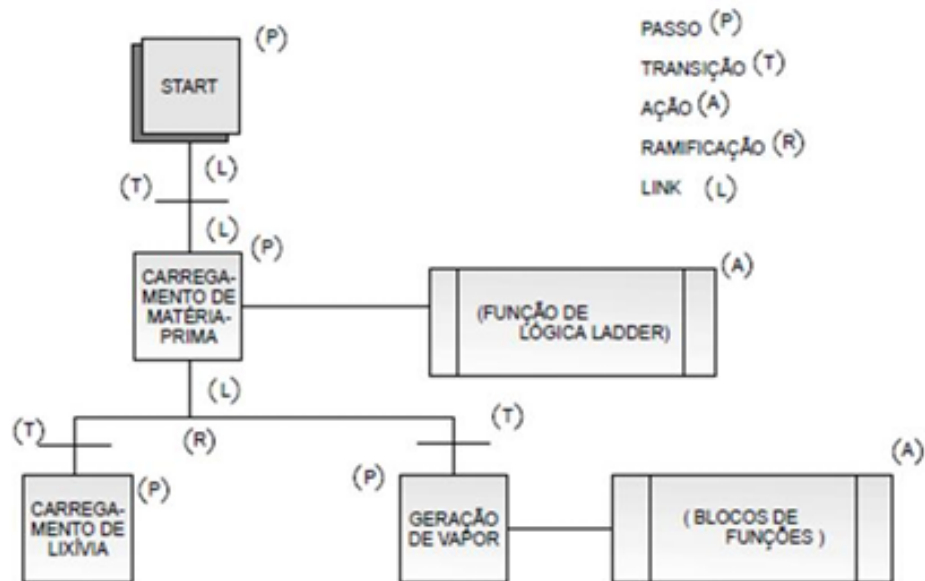


Disponível em: <<https://www.altus.com.br/produto/xp340-2/>>. Acesso em: 11 jan. 2026.

Também fornecido pela Altus, o **software** de programação MasterTool IEC XE permite a implementação de lógicas de controle por meio de diferentes linguagens de programação utilizadas em sistemas de automação industrial. Entre essas linguagens, destaca-se o Diagrama de Funções Sequenciais, também conhecido como metodologia Grafcet, que, de acordo com (JUNIOR, 2016), é empregado de forma simples e clara para descrever o funcionamento de sistemas automatizados, possibilitando a representação de ligações sequenciais e paralelas.

A metodologia GRAFCET descreve a sequência operacional do sistema passo a passo, por meio de passos e transições, permitindo visualizar estados e condições de avanço da lógica (JUNIOR, 2016), conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Exemplo de GRAFCET aplicado à lógica de controle do processo



Fonte: JUNIOR, 2016.

### 3.2 Sistema de Bombeamento de Dreno de Fundo

O Sistema de Bombeamento de Dreno de Fundo é uma parte no gerenciamento de águas acumuladas em barragens de rejeito, especialmente nas indústrias de mineração de ouro. As barragens de rejeito são estruturas utilizadas para armazenar os resíduos gerados durante o processo de extração e beneficiamento de minerais. Uma das principais preocupações com as barragens de rejeito é a presença de água acumulada em seu interior, que pode gerar pressão interna. Essa pressão, se não controlada, pode comprometer a integridade da barragem, aumentando o risco de falhas estruturais, com potencial para causar danos ambientais significativos (FARIAS; EUGÊNIO, 2002).

O Dreno de Fundo tem como principal objetivo evitar o acúmulo de água dentro da barragem, conduzindo-a para poços de drenagem ou valas de escoamento. A Figura 13 apresenta, de forma ilustrativa, o funcionamento desse sistema, destacando o trajeto da água desde a barragem, passando pelo sistema de drenagem até o poço de acumulação, onde posteriormente é bombeada novamente para a barragem.

Figura 13 – Dreno de fundo de uma barragem de rejeitos de mineração de ouro.



Fonte: Própria autora, 2025.

O sistema é composto por bombas, tubulações e válvulas, que atuam no transporte contínuo da água acumulada, para que o nível de água se mantenha controlado nos poços de drenagem. A Figura 14 apresenta um exemplo real do dreno de fundo em uma barragem de rejeitos de mineração de ouro, obtido a partir de levantamento de campo.

Figura 14 – Dreno de fundo de uma barragem de rejeitos de mineração de ouro.



Fonte: Acervo pessoal da autora, registro realizado durante levantamento de campo, 2025.

Os efluentes drenados podem conter metais pesados e outras substâncias tóxicas, que apresentam elevado risco de contaminação do solo e das águas subterrâneas. Em barragens que ainda não se encontram em processo de descaracterização, o efluente proveniente do dreno de fundo é bombeado de volta para a barragem. Essa configuração pode ser observada na Figura 15, onde é possível observar a tubulação e o efluente chegando na barragem. Essa imagem foi obtida a partir de um levantamento de campo realizado em uma mineradora de ouro.

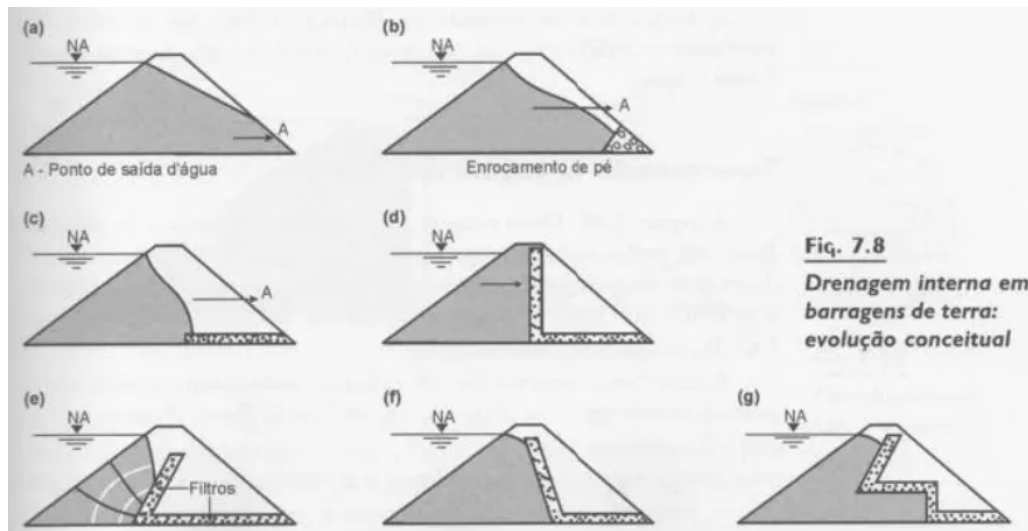
Figura 15 – Retorno do efluente do dreno de fundo na barragem.



Fonte: Acervo pessoal da autora, registro realizado durante levantamento de campo, 2025.

No livro MASSAD (2003), são explorados os diferentes tipos de drenos, com ênfase na evolução do sistema de drenagem interna em barragens de terra. A Figura 16 ilustra sete tipos de drenagem interna.

Figura 16 – Drenagem interna de Barragem de Terra



Fonte: MASSAD, 2003.

Conforme figura 14 o sistema (a) sem a presença de drenos, havia o risco de ocorrência de *piping* na barragem. O *piping* é um processo onde a água, ao infiltrar-se através dos materiais da barragem, pode gerar erosões internas que formam canais, comprometendo a integridade da estrutura e aumentando a possibilidade de falhas na barragem. Nos sistemas (b) e (c), o projeto seria viável se o solo fosse isotrópico, o que não reflete a realidade. Um solo isotrópico possui propriedades, como permeabilidade e resistência, que são iguais em todas as direções. Porém, na prática, os solos são geralmente anisotrópicos, o que significa que suas características variam conforme a direção. Isso pode prejudicar o desempenho dos sistemas de drenagem e aumentar o risco de problemas como o *piping*. Já no sistema (d), utiliza-se um filtro vertical e horizontal. Esse tipo de filtro é comumente utilizado, pois desvia o fluxo de água e dissipa as pressões neutras, ajudando a manter a estabilidade da estrutura. Para o sistema (e), o filtro é inclinado, o que proporciona uma condição mais favorável para a estabilidade da barragem. No caso do sistema (f), a solução torna-se mais eficaz quando o solo das fundações apresenta alta permeabilidade. Por fim, o sistema (g) busca integrar as características dos sistemas (e) e (f), combinando os benefícios de ambos.

## **4 METODOLOGIA**

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema supervisorio aplicado ao sistema de bombeamento do dreno de fundo em uma planta de mineração de ouro, com foco no apoio ao monitoramento e controle operacional do processo. A metodologia foi estruturada nas seguintes etapas:

### **4.1 Levantamento de Dados e Informações**

Antes do desenvolvimento do projeto, foi realizada uma pesquisa prévia sobre o funcionamento do dreno de fundo e seus impactos, com base em revistas de mineração, artigos científicos, normas técnicas e coleta de informações junto a profissionais envolvidos no processo com o objetivo de embasar tecnicamente o projeto. Essa etapa permitiu a identificação das variáveis relevantes do sistema, bem como dos requisitos operacionais e de segurança a serem considerados.

### **4.2 Modelagem do sistema**

Após o levantamento das informações, foi realizada a modelagem conceitual do sistema de bombeamento, para estruturar o comportamento do processo antes da etapa de programação. A modelagem precisava contemplar os estados operacionais, condições de falhas e modos de operação. Para isso, foi utilizada como base a lógica booleana com tabela-verdade como ferramenta de apoio à organização das regras lógicas.

### **4.3 Ambiente de Estudo**

O desenvolvimento deste trabalho ocorreu integralmente em ambiente controlado, no Laboratório de Automação do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) – Campus Sabará. Embora o estudo seja aplicado a um sistema real existente, pertencente a uma planta de mineração de ouro, não houve intervenção direta na planta real. Isso se deve ao fato de que, para uma aplicação em ambiente industrial, outras variáveis de processo poderiam ser consideradas, tais como vazão e pressão nas tubulações, potência das bombas e volume do poço de drenagem, entre outros conteúdos abordados em disciplinas específicas. Dessa forma, o foco do estudo concentrou-se na automação do sistema, nos intertravamentos operacionais e na supervisão do processo.

### **4.4 Ferramentas e tecnologias utilizadas**

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados dispositivos e *softwares* disponíveis no Laboratório de Automação do Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Sabará, selecionados de acordo com sua adequação aos objetivos acadêmicos e técnicos propostos.

Os principais recursos empregados são descritos a seguir:

- **CLP**: modelo XP340, pertencente à série Nexto, desenvolvido pela Altus, utilizado para a implementação da lógica de controle do sistema.
- **Computador**: empregado no desenvolvimento das atividades de modelagem, programação e supervisão do sistema, com o auxílio de periféricos como teclado e mouse.
- **BluePlant**: *software* supervisor utilizado para a criação das telas de monitoramento e operação do sistema, na versão gratuita v.9.1.36.
- **MasterTool IEC XE**: *software* de engenharia utilizado para o desenvolvimento e carregamento da programação do CLP, na versão 3.71.

A estrutura do sistema de controle foi desenvolvida com base no conceito de GRAFCET, sendo sua implementação realizada no CLP por meio da linguagem SFC, conforme estabelecido pela norma IEC 61131-3 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2013). Essa norma define padrões internacionais para a programação de controladores programáveis, incluindo linguagens gráficas e textuais utilizadas na indústria. A abordagem adotada mostrou-se adequada a sistemas sequenciais que apresentam estados de operação e transições definidos. A utilização dessa metodologia possibilitou uma organização clara da lógica de controle.

## 4.5 Estratégia de Testes

A estratégia de testes adotada neste trabalho teve como objetivo verificar o funcionamento lógico do sistema supervisor e validar os intertravamentos programados. Os testes consistiram na simulação de cenários operacionais representativos do processo de bombeamento, adaptados às necessidades e limitações do laboratório do IFMG, sendo realizados tanto no ambiente de simulação do *software* quanto em uma bancada didática. Dessa forma, foi possível avaliar o comportamento do sistema frente às condições previstas de operação e falha, considerando a interação entre o CLP e os dispositivos físicos utilizados nos ensaios. A validação do sistema foi realizada de forma qualitativa, por meio da comparação entre o comportamento esperado, definido na etapa de modelagem lógica, e o comportamento apresentado durante os testes, utilizando o CLP, o computador e sinalizadores LED na bancada didática para representar a operabilidade do sistema.

## 4.6 Etapas Metodológicas

O desenvolvimento do trabalho seguiu as seguintes etapas metodológicas:

- Levantamento e análise das informações do processo de bombeamento;

- Modelagem lógica para que fosse possível mapear os cenários em que o sistema iria operar;
- Definição da linguagem de programação e *software* utilizado;
- Definição de *software* e planejamento das telas;
- Definição da arquitetura de rede do sistema;
- Desenvolvimento do *software* de controle;
- Desenvolvimento do sistema supervisorio;
- Realização de testes em bancada dos cenários mapeados para a verificação do funcionamento do sistema;

## 4.7 Limite de Escopo

Ressalta-se que a automação do sistema de bombeamento, por si só, não é suficiente para garantir a inexistência de transbordamentos nem assegurar integralmente a segurança ambiental do sistema de dreno de fundo. O funcionamento seguro desse tipo de sistema depende de diversas variáveis que não são contempladas neste estudo. Dentre os aspectos não abordados, destacam-se a análise hidráulica de vazão e pressão na tubulação, a detecção de vazamentos, bem como a especificação detalhada das bombas, válvulas e demais dispositivos de segurança do processo. Dessa forma, este trabalho limita-se à solução de automação e supervisão, não incluindo análises hidráulicas, mecânicas e de instrumentação necessárias para uma avaliação completa do sistema em nível industrial.

## 5 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Este capítulo apresenta o desenvolvimento e os resultados do sistema de automação e supervisão aplicado ao bombeamento do dreno de fundo.

### 5.1 Modelagem Lógica do Sistema de Bombeamento

A modelagem foi desenvolvida considerando a operação de três bombas, sendo uma principal e duas auxiliares. As bombas não possuem função fixa, podendo assumir diferentes papéis conforme sua disponibilidade operacional, o que proporciona maior flexibilidade e confiabilidade ao sistema. A lógica foi estruturada com base em dois modos de operação, manual e automático, selecionados pelo operador por meio da interface do sistema supervisão.

No modo manual, o operador possui total autonomia para realizar o acionamento ou desligamento individual das bombas por meio da tela de supervisão, sendo responsável direto pelas decisões operacionais.

No modo automático, o acionamento e o desligamento das bombas são realizados de forma autônoma pelo sistema de controle, com base na variável de nível. A lógica também considera situações de falha das bombas, identificadas por sinais de intertravamento provenientes do sistema de proteção elétrica dos motores. Essas falhas podem ocorrer devido a sobrecarga, falhas elétricas, superaquecimento ou intervenções de manutenção, situações em que os dispositivos de proteção interrompem automaticamente o funcionamento do equipamento.

Quando uma falha é detectada, o sistema identifica a indisponibilidade da bomba e realiza automaticamente sua substituição por uma das bombas auxiliares disponíveis, garantindo a continuidade da operação do sistema de drenagem. Para estruturar essa lógica, foi utilizada a tabela verdade como ferramenta de apoio, permitindo mapear os diferentes cenários operacionais relacionados à disponibilidade das três bombas, conforme tabela 1.

Tabela 1 – Tabela verdade dos cenários operacionais das bombas.

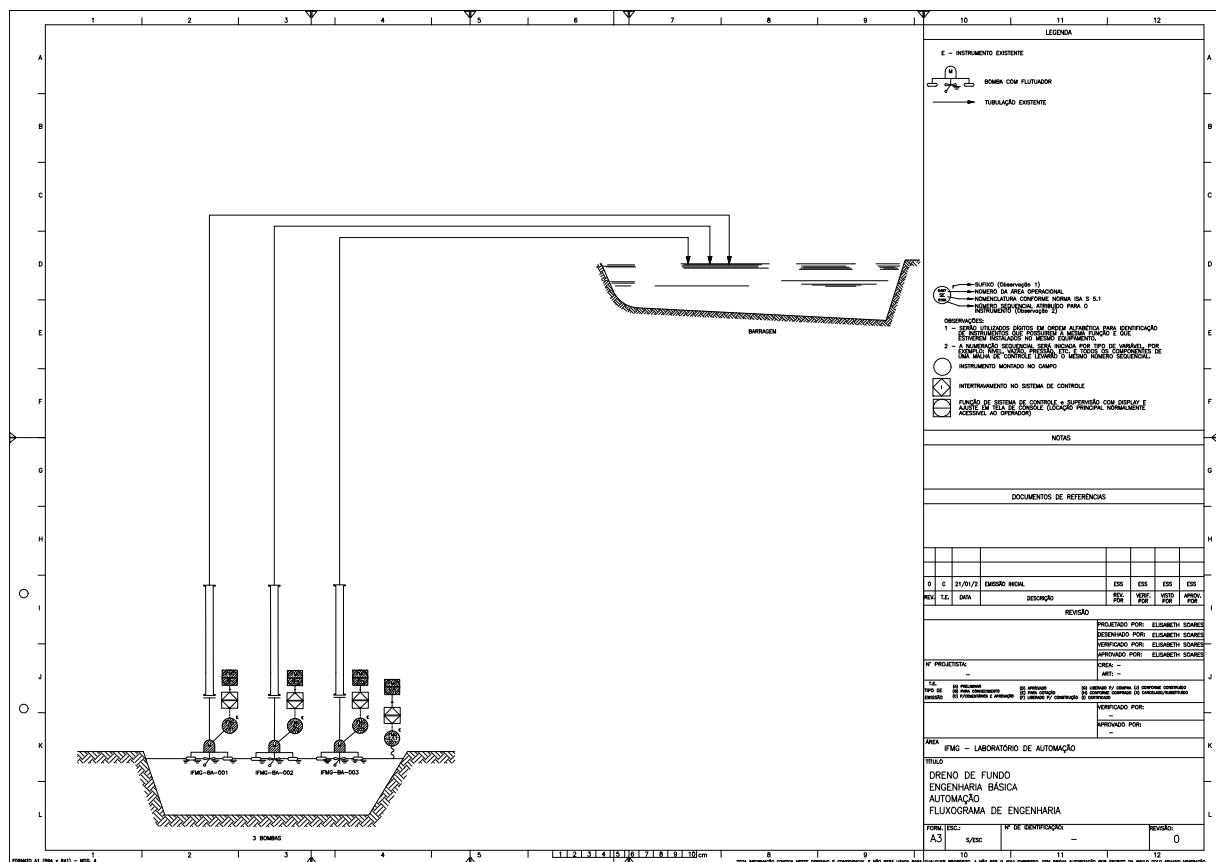
Disponibilidade das Bombas			Cenários Operacionais							
Bomba 1	Bomba 2	Bomba 3	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0

Dessa forma, foi possível mapear os cenários de operação do sistema em modo automático,

totalizando oito cenários distintos. Em cada um deles, foram analisados o funcionamento das bombas, os níveis de atuação, as condições operacionais de partida e parada e a geração de alarmes associados.

Com o intuito de complementar essa análise e representar o sistema sob a ótica da engenharia de processos e automação, foi elaborado um fluxograma de engenharia do sistema de bombeamento, conforme apresentado na Figura 17. Para uma visualização ampliada, o fluxograma encontra-se disponível no Apêndice B.

Figura 17 – Fluxograma de Engenharia - Dreno de Fundo



Fonte: Própria autora, 2025.

O fluxograma de engenharia apresentado foi elaborado de acordo com a norma ISA 5.1, que estabelece critérios para a representação simbólica de instrumentos e sistemas de controle. Nessa representação, são identificadas as bombas do sistema, o transmissor de nível radar, o fluxo de tubulação e os sinais de instrumentação e controle, evidenciando a comunicação entre os equipamentos de campo, o CLP e o sistema supervisor. O fluxograma foi desenvolvido em formato A3, padrão geralmente utilizado na indústria para fluxogramas de engenharia, e contempla legenda e cabeçalho técnico, atendendo às práticas usuais de projetos industriais. Essa representação proporcionou uma visão estruturada do sistema de bombeamento, contribuindo para a definição dos cenários de operação do sistema, apresentados na sequência.

O Cenário 1 representa a condição em que todas as bombas se encontram prontas para operar. Nesse cenário, a Bomba 1 atua como bomba principal, a Bomba 2 como auxiliar 1 e a Bomba 3 como auxiliar 2. A Bomba 1 entra em operação quando o nível ultrapassa 45% e é desligada quando o nível reduz para valores inferiores a 30%. A Bomba 2 é acionada quando o nível excede 60% e desligada quando o nível retorna para abaixo de 50%, enquanto a Bomba 3 entra em operação acima de 65% e é desligada quando o nível cai abaixo de 60%. O alarme de transbordo é ativado somente quando o nível ultrapassa 75%, sendo desativado quando o nível retorna para valores inferiores a esse limite. Nesse cenário, não há acionamento de alarmes de falha, desde que todas as bombas permaneçam operacionais.

O Cenário 2 representa a condição em que há falha da Bomba 2. A Bomba 1 mantém sua lógica de operação normalmente, enquanto a Bomba 3 passa a assumir a função de bomba auxiliar 1, operando com os mesmos limites anteriormente atribuídos à Bomba 2. Nesse cenário, é emitido o alarme de falha da Bomba 2. O alarme de transbordo passa a ser ativado quando o nível ultrapassa 65% e é desligado quando o nível retorna para valores inferiores a esse limite. Essa antecipação ocorre porque o sistema reconhece a redução da capacidade de bombeamento e ajusta sua estratégia para mitigar o risco de transbordo.

O Cenário 3 corresponde à condição em que ocorre a falha simultânea das Bombas 1 e 3. Nessa situação, a Bomba 2 assume a função de bomba principal e tem seu acionamento antecipado, passando a operar quando o nível ultrapassa 30% e para de bombear somente quando o nível é reduzido para valores inferiores a 25%. Os alarmes de falha das Bombas 1 e 3 são acionados imediatamente após a detecção das respectivas falhas. O alarme de transbordo é ativado quando o nível ultrapassa 65% e é desativado quando o nível retorna para valores inferiores a 60% estabelecendo um intervalo de histerese.

No Cenário 4 representa a condição em que há falha apenas da Bomba 3. As Bombas 1 e 2 mantêm o mesmo comportamento operacional definido no Cenário 1. É emitido o alarme de falha da Bomba 3, enquanto o alarme de transbordo segue a mesma lógica adotada no Cenário 2, sendo acionado de forma antecipada em função da redução da capacidade total de bombeamento.

O Cenário 5 corresponde à condição em que ocorre a falha simultânea das Bombas 1 e 2, permanecendo apenas a Bomba 3 disponível para operação. Nessa situação, a Bomba 3 assume a função de bomba principal e passa a operar segundo a mesma lógica adotada para a Bomba 2 no Cenário 3, caracterizada pelo acionamento antecipado em função do nível. Os alarmes de falha das Bombas 1 e 2 são acionados imediatamente após a detecção das respectivas falhas. O alarme de transbordo mantém a mesma lógica de atuação adotada no Cenário 3.

O Cenário 6 corresponde à condição em que apenas a Bomba 1 permanece disponível para operação, com as Bombas 2 e 3 em condição de falha. Nessa situação, os alarmes de falha das Bombas 2 e 3 são acionados, enquanto o alarme de transbordo mantém a mesma lógica de atuação adotada no Cenário 3.

O Cenário 7 corresponde à condição de falha da Bomba 1, na qual a Bomba 3 assume a função de bomba principal e a Bomba 2 passa a operar como bomba auxiliar 1. Nessa situação, é acionado o alarme de falha da Bomba 1, enquanto o alarme de transbordo segue a mesma lógica de atuação adotada nos Cenários 2 e 4, nos quais duas bombas permanecem disponíveis para operação.

Por fim, o Cenário 8 representa a condição crítica do sistema, na qual nenhuma bomba está disponível para operação. Nesse contexto, todos os alarmes de falha são acionados, juntamente com o alarme de transbordo, indicando a indisponibilidade total do sistema de bombeamento, sem dependência da variável de nível.

A partir da análise dos cenários apresentados, observa-se que o comportamento do alarme de transbordo segue um padrão definido em função da quantidade de bombas disponíveis para operação. Nos cenários em que duas bombas permanecem operacionais, o alarme é acionado de forma antecipada em relação à condição normal. Quando apenas uma bomba encontra-se disponível, o sistema adota limites ainda mais conservadores. Nas condições em que todas as bombas se encontram disponíveis para operação, o alarme de transbordo é acionado apenas quando o nível atinge patamares mais elevados, uma vez que a capacidade total de bombeamento do sistema está assegurada. Em contrapartida, no cenário de indisponibilidade total das bombas, o alarme permanece continuamente ativo, independentemente da variação do nível, sinalizando a condição crítica do sistema. Dessa forma, o sistema ajusta automaticamente sua lógica de alarmes de acordo com a capacidade instantânea de bombeamento disponível, adotando critérios mais conservadores à medida que a disponibilidade dos equipamentos é reduzida.

Diante do exposto, a Figura 18 apresenta a tabela de modelagem lógica desenvolvida com o objetivo de auxiliar as etapas de programação do sistema de controle e de criação das telas do sistema supervisão. Essa modelagem constituiu uma etapa essencial para o desenvolvimento do trabalho, uma vez que permitiu organizar de forma estruturada os cenários operacionais, as condições de funcionamento das bombas e a lógica de atuação dos alarmes. A partir dessa abordagem, foi possível garantir maior clareza na implementação da lógica de controle, além de servir como referência durante todo o processo de desenvolvimento do sistema supervisão.

Figura 18 – Modelagem lógica do sistema de bombeamento

Modelagem do sistema											
Equipamento	Funcionamento	Nível (%)	Condição de Operação	Alarmes							
				Falha B1	Falha B2	Falha B3	Transbordo				
Cenário 1											
Bomba 1	OK	> 45 % < 30 %	Partida Parada	Não	Não	Não	Nível > 75% Nível < 75%				
Bomba 2	OK	> 60% < 50%	Partida Parada								
Bomba 3	OK	> 65% < 60%	Partida Parada								
Cenário 2											
Bomba 1	OK	> 45 % < 30 %	Partida Parada					Não	Sim	Não	Nível > 65% Nível < 65%
Bomba 2	Falha	- -	- -								
Bomba 3	OK	> 60% < 50%	Partida Parada								
Cenário 3											
Bomba 1	Falha	- -	- -	Sim	Não	Sim	Nível > 65% Nível < 60%				
Bomba 2	OK	> 30 % < 25%	Partida Parada								
Bomba 3	Falha	- -	- -								
Cenário 4											
Bomba 1	OK	> 45 % < 35 %	Partida Parada	Não	Não	Sim	Nível > 65% Nível < 65%				
Bomba 2	OK	> 60 % < 50%	Partida Parada								
Bomba 3	Falha	- -	- -								
Cenário 5											
Bomba 1	Falha	- -	- -	Sim	Sim	Não	Nível > 65% Nível < 60%				
Bomba 2	Falha	- -	- -								
Bomba 3	OK	> 30 % < 25%	Partida Parada								
Cenário 6											
Bomba 1	OK	> 30 % < 25%	Partida Parada	Não	Sim	Sim	Nível > 65% Nível < 60%				
Bomba 2	Falha	- -	- -								
Bomba 3	Falha	- -	- -								
Cenário 7											
Bomba 1	Falha	- -	- -	Sim	Não	Não	Nível > 65% Nível < 65%				
Bomba 2	OK	> 60 % < 50%	Partida Parada								
Bomba 3	OK	> 45 % < 35 %	Partida Parada								
Cenário 8											
Bomba 1	Falha	- -	- -	Sim	Sim	Sim	Sim				
Bomba 2	Falha	- -	- -								
Bomba 3	Falha	- -	- -								

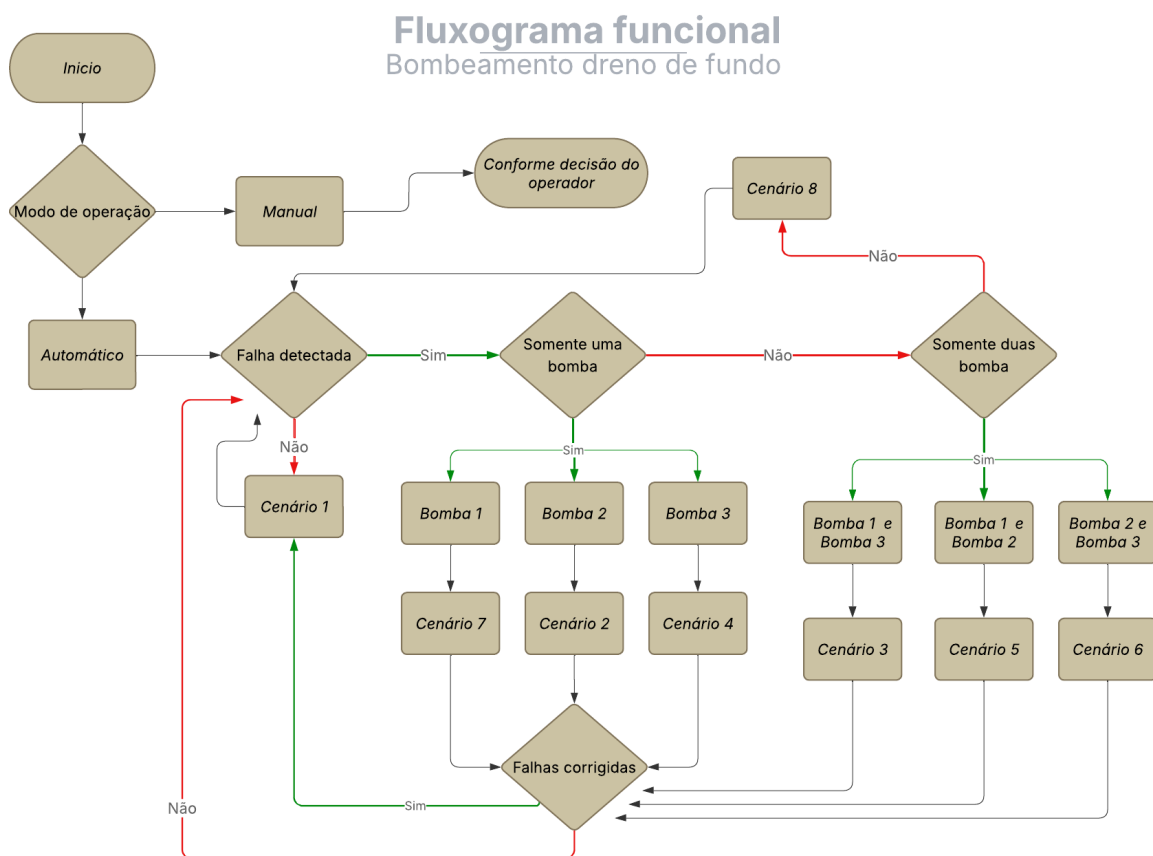
## 5.2 Desenvolvimento da Lógica de Controle

O desenvolvimento da lógica de controle foi realizado no ambiente de programação MasterTool, utilizando a linguagem SFC. A implementação do sistema ocorreu de forma progressiva, iniciando-se pela codificação individual de cada cenário operacional definido na etapa de modelagem. Essa abordagem permitiu a verificação isolada do comportamento esperado do sistema para cada condição de operação.

Após a implementação de cada cenário, foram realizadas simulações no próprio ambiente do MasterTool, com o objetivo de validar o funcionamento da lógica desenvolvida antes da inclusão de novos cenários. Sendo a programação estruturada de forma modular, visando facilitar a leitura, a manutenção e o entendimento do código disponibilizado no Apêndice A.

A lógica implementada não realiza a seleção explícita de cenários durante a operação do sistema. Os diferentes cenários emergem automaticamente a partir da avaliação contínua das condições de processo, tais como nível do sistema, disponibilidade das bombas e ocorrência de falhas. A combinação dessas condições define o comportamento do sistema, conforme representado no fluxograma funcional apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Fluxograma funcional de Programação.



O fluxograma apresentado descreve a lógica geral de funcionamento do sistema de bombeamento do dreno de fundo, servindo como base conceitual para a implementação da lógica de controle.

O fluxo inicia-se com a definição do modo de operação do sistema, o qual pode ser selecionado pelo operador entre os modos manual e automático. Quando o modo manual é selecionado, os comandos de partida e parada das bombas são executados diretamente conforme a decisão do operador, sem a atuação dos intertravamentos automáticos do sistema.

No modo automático, o sistema passa a monitorar continuamente a ocorrência de falhas nos equipamentos. Caso nenhuma falha seja detectada, o sistema permanece operando no Cenário 1, correspondente à condição na qual todas as bombas estão disponíveis. Quando uma falha é detectada, a lógica avalia a quantidade de bombas disponíveis para operação. Se apenas uma bomba estiver disponível, o sistema direciona a operação para os cenários em que essa bomba assume a função principal. Se duas bombas estiverem disponíveis, o sistema seleciona automaticamente o cenário correspondente à combinação das bombas operantes. Na condição em que nenhuma bomba esteja disponível para operação, o sistema é direcionado para o Cenário 8, caracterizando uma situação crítica, na qual são acionados os alarmes.

Após a atuação em qualquer cenário de falha, o sistema verifica continuamente se as falhas foram corrigidas. Caso as falhas sejam sanadas, o fluxo retorna para a condição normal de operação, reassumindo o Cenário 1. Caso contrário, o sistema permanece no cenário correspondente, garantindo a continuidade da operação dentro das limitações impostas pela disponibilidade dos equipamentos.

### **5.3 Desenvolvimento do Sistema Supervisório**

O sistema supervisório foi desenvolvido na plataforma BluePlant, com o objetivo de realizar o monitoramento e o controle do bombeamento do dreno de fundo. Para a concepção das telas sinóticas, adotaram-se como referência as diretrizes da norma ISA 101, que estabelece boas práticas para o desenvolvimento de interfaces voltadas à operação de processos industriais (INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION, 2015).

O sistema supervisório foi estruturado em duas telas. A tela principal concentra os comandos operacionais, o painel de status do sistema e o painel de alarmes. A segunda tela apresenta a representação gráfica do processo, possibilitando ao operador uma visualização mais clara e intuitiva do funcionamento do sistema de bombeamento. A Figura 20 apresenta a tela principal do sistema supervisório.

Figura 20 – Tela principal do sistema supervisorio.



Fonte: Própria autora, 2026.

Os comandos operacionais, apresentados à esquerda da tela sinótica, são responsáveis pela interação direta do operador com o sistema. Conforme indicado em (1), o operador realiza inicialmente a seleção do modo de operação, podendo optar entre os modos manual ou automático. Após a definição do modo de operação, o operador pode atuar na seção de acionamento, destacada em (2), na qual estão disponíveis os comandos de ligar, desligar e parada de emergência do sistema. Esses comandos permitem o controle operacional do bombeamento de acordo com as condições do processo e as decisões do operador.

Devido às limitações do laboratório do IFMG – Campus Sabará, em que o CLP utilizado encontra-se com o cartão de entradas e saídas analógicas indisponível, tornou-se necessária a simulação de algumas variáveis do processo diretamente pela interface supervisória. Dessa forma, conforme indicado em (4), o nível da caixa de drenagem é inserido manualmente na tela, em uma faixa de valores de 0 a 30000, correspondentes aos valores lidos pelo CLP, os quais são posteriormente convertidos para uma escala percentual de 0 a 100%. Os sensores de continuidade das bombas em (3), também foram simulados por meio do supervisório. Esses sensores têm a função de representar condições de falha nas bombas, possibilitando a realização de testes e a verificação do comportamento do sistema supervisorio frente a situações de indisponibilidade dos equipamentos.

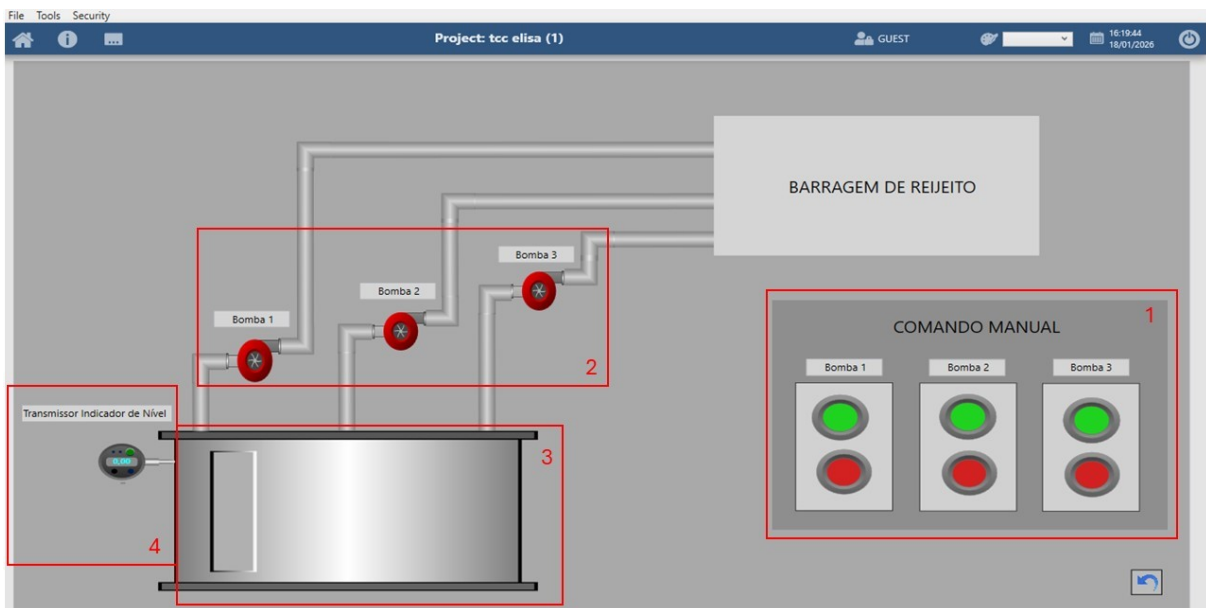
O painel de status do sistema, indicado em (5), apresenta ao operador as condições atuais de operação. Por meio de indicadores visuais, permite o acompanhamento em tempo real do estado do sistema e do funcionamento de cada bomba. Também informa o modo de operação selecionado (manual ou automático) e o estado do sistema ativo, indicando que o sistema está habilitado para executar a lógica de controle e os comandos operacionais. Além disso, são

apresentados indicadores específicos para cada bomba do sistema, identificando se as bombas 1, 2 e 3 estão em operação.

O painel de alarmes, indicado em (6), tem como função sinalizar ao operador a ocorrência de condições anormais ou de falha. Esses alarmes foram definidos e organizados de acordo com diferentes níveis de severidade, seguindo as boas práticas recomendadas pela norma ISA-101 – Interfaces Homem-Máquina. Neste trabalho, foram adotados dois níveis de severidade: o alarme de transbordo foi classificado como crítico e sinalizado na cor vermelha, por indicar uma condição de risco elevado e exigir ação imediata do operador, enquanto os demais alarmes foram classificados como de menor severidade e representados na cor amarela, permitindo ao operador identificar e priorizar rapidamente as situações mais críticas do sistema.

O elemento indicado em (7) corresponde a um botão de navegação, cuja função é permitir o acesso à tela gráfica do sistema apresentada na Figura 21.

Figura 21 – Tela gráfica do sistema supervisório.



Fonte: Própria autora, 2026.

A tela gráfica permite ao operador acompanhar o funcionamento do sistema de forma intuitiva e próxima da realidade do processo. Essa tela complementa a tela sinótica principal, oferecendo uma visualização gráfica dos equipamentos, do nível do poço de drenagem e do estado das bombas.

Conforme indicado em (1), quando o sistema é configurado para operar em modo manual, o operador tem a possibilidade de atuar diretamente sobre as bombas por meio dos comandos disponíveis nessa tela, realizando o acionamento de cada bomba de acordo com sua decisão operacional. O item (2) representa as tubulações e as bombas, quando uma bomba entra em operação, sua representação gráfica altera-se, assumindo a cor verde e apresentando animação

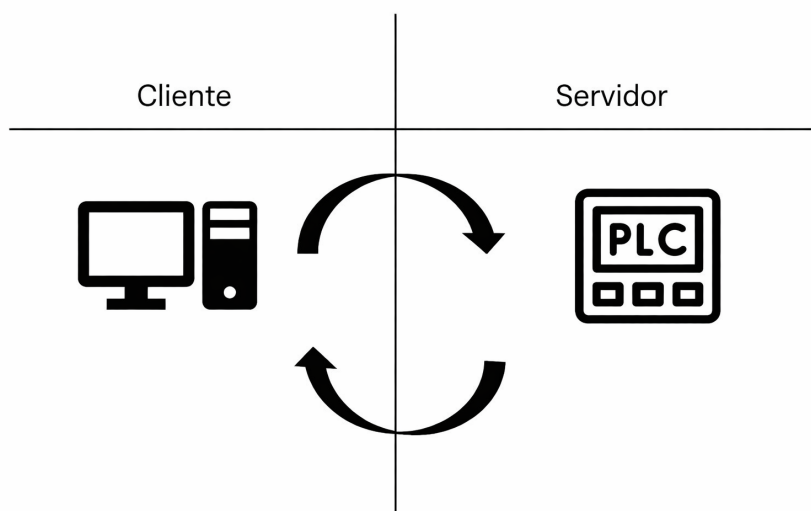
de rotação, enquanto a tubulação associada passa a ser exibida com um maior nível de brilho, indicando o escoamento do fluido. Em (3) é apresentada a representação gráfica do poço de drenagem, na qual é possível visualizar dinamicamente a variação do nível do fluido. À medida que o nível aumenta ou diminui, essa alteração é refletida diretamente na imagem, proporcionando uma percepção visual clara do comportamento do processo. O item (4) corresponde ao transmissor de nível, responsável por indicar numericamente o valor do nível do poço em porcentagem, variando de 0 a 100%. Diferentemente da tela sinótica, na qual o nível é inserido em valores internos do CLP (variando de 0 a 30000), a tela gráfica apresenta o valor já convertido para a escala percentual, facilitando a interpretação das informações pelo operador. Dessa forma, a tela gráfica contribui para uma operação mais intuitiva, permitindo o acompanhamento visual do processo.

## 5.4 Arquitetura do Sistema de Automação

A arquitetura do sistema de automação foi definida para a integração entre o CLP e o sistema supervisório. Adotou-se uma arquitetura de comunicação baseada no protocolo Modbus TCP, operando sobre rede Ethernet. O sistema foi estruturado segundo o modelo cliente-servidor, no qual o sistema supervisório atua como mestre da comunicação, sendo responsável por realizar as requisições de leitura e escrita das variáveis de processo. O CLP, por sua vez, opera como escravo, respondendo às solicitações do supervisório e disponibilizando os dados referentes ao estado do sistema. Essa arquitetura permite a troca contínua de informações entre o CLP e o supervisório, assegurando a atualização dos dados de processo e a execução dos comandos em tempo adequado à operação do sistema.

A Figura 22 ilustra a arquitetura adotada, evidenciando a comunicação entre o CLP e o sistema supervisório por meio da rede Ethernet utilizando o protocolo Modbus TCP.

Figura 22 – Representação ilustrativa da comunicação cliente-servidor no modbus.



### 5.4.1 Mapeamento de Tags para Comunicação Modbus TCP

Para viabilizar a comunicação entre o CLP e o sistema supervisor, foi realizado o mapeamento das variáveis internas do programa do CLP por meio do recurso Modbus Symbol Server, disponível no ambiente MasterTool. Nesse mapeamento, cada variável global foi associada a um endereço Modbus específico, de acordo com sua função no sistema.

A Tabela 2 apresenta o mapeamento das variáveis configuradas no CLP e os pontos configurados no sistema supervisor. A utilização de endereços idênticos em ambos os sistemas é fundamental para o correto funcionamento da comunicação Modbus TCP.

Tabela 2 – Correspondência entre variáveis do MasterTool e tags do sistema supervisor

Variável no MasterTool	Tag no Supervisor	Variável Modbus	Endereço Modbus
GVL.botAUTOMATICO	botAUTOMATICO	Coil	00001
GVL.botDESLIGAR	botDESLIGAR	Coil	00002
GVL.botLIGAR	botLIGAR	Coil	00003
GVL.botMANUAL	botMANUAL	Coil	00004
GVL.SensorBF1	SensorBF1	Coil	00005
GVL.SensorBF2	SensorBF2	Coil	00006
GVL.SensorBF3	SensorBF3	Coil	00007
GVL.Nivel_Percent_FINAL	Nivel_Percent_FINAL	Holding Register	400001
GVL.saidaB1	saidaB1	Input Status	100009
GVL.saidaB2	saidaB2	Input Status	100010
GVL.saidaB3	saidaB3	Input Status	100011
GVL.saidaAL1	saidaAL1	Input Status	100012
GVL.saidaAL2	saidaAL2	Input Status	100013
GVL.saidaAL3	saidaAL3	Input Status	100014
GVL.saidaALT	saidaALT	Input Status	100015
GVL.saidaSA	saidaSA	Input Status	100016
GVL.NIVEL_BRUTO	NIVEL_BRUTO	Holding Register	400010
GVL.botMAN_LIGB1	botMAN_LIGB1	Coil	00021
GVL.botMAN_LIGB2	botMAN_LIGB2	Coil	00022
GVL.botMAN_LIGB3	botMAN_LIGB3	Coil	00023
GVL.botMAN_DESLB1	botMAN_DESLB1	Coil	00024
GVL.botMAN_DESLB2	botMAN_DESLB2	Coil	00025
GVL.botMAN_DESLB3	botMAN_DESLB3	Coil	00026

As variáveis do tipo *Coil* foram utilizadas principalmente para representar comandos digitais enviados pelo supervisor ao CLP. Já as variáveis do tipo *Input Status* são aquelas que podem ser apenas lidas. As variáveis do tipo *Holding Register* foram destinadas à transmissão de valores numéricos, como o nível do reservatório em formato bruto e em percentual sendo

dados de leitura e escrita.

No sistema supervisorio BluePlant, cada tag é configurada utilizando exatamente o mesmo tipo e endereço Modbus definidos no CLP. Dessa forma, é estabelecido uma relação direta entre a variável interna do controlador e o ponto de supervisão.

A padronização adotada para as variáveis no CLP e para as tags no sistema supervisorio contribuiu para a rastreabilidade facilitando a manutenção e futuras extensões.

## 5.5 Testes em Bancada

Os testes em bancada foram realizados no Laboratório de Automação do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), campus Sabará, sala 303. Para a condução dos ensaios, utilizou-se como referência a tabela de modelagem lógica do sistema, na qual foram definidos oito cenários operacionais, cada um apresentando comportamentos distintos das bombas em função das condições de operação e de falha.

Para cada cenário mapeado, foram executados três testes distintos, variando-se os níveis simulados, totalizando vinte e quatro testes realizados em bancada. Essa abordagem permitiu avaliar o comportamento do sistema frente a diferentes condições de nível.

Com o objetivo de possibilitar a visualização do funcionamento do sistema durante os testes, foi montada uma bancada próxima às telas do sistema supervisorio, contendo o CLP conectado a um conjunto de sinalizadores luminosos. Cada sinalizador foi utilizado para representar uma bomba, acendendo para indicar a condição de partida e apagando para indicar a condição de parada do respectivo equipamento.

Durante a execução dos testes, também foi analisado o comportamento do sistema supervisorio, verificando-se se o painel de status e o painel de alarmes apresentavam informações coerentes com a modelagem do sistema. Para a simulação dos níveis em cada cenário, foram aplicados valores específicos na entrada analógica do CLP, sendo utilizados os valores de 21000 para representar 70%, 15000 para 50%, 7200 para 24% e 24000 para 80%.

Na figura 23 são apresentados os resultados obtidos durante os testes em bancada, organizados de forma a evidenciar o comportamento do sistema para cada cenário avaliado.

Figura 23 – Tabela de resultados dos testes.

Modelagem do sistema								Teste em bancada
Equipamento	Funcionamento	Nível (%)	Condição de Operação	Alarmes				Resultado
				Falha B1	Falha B2	Falha B3	Transbordo	
<b>Cenário 1</b>								
Bomba 1	OK	>45%	Partida	Não	Não	Não	Nível > 75% Nível < 75%	Conforme
		<30%	Parada					
Bomba 2	OK	>60%	Partida					
		<50%	Parada					
Bomba 3	OK	>65%	Partida					Conforme
		<60%	Parada					
<b>Cenário 2</b>								
Bomba 1	OK	>45%	Partida	Não	Sim	Não	Nível > 65% Nível < 65%	Conforme
		<30%	Parada					
Bomba 2	Falha	-	-					
		-	-					
Bomba 3	OK	>60%	Partida					Conforme
		<50%	Parada					
<b>Cenário 3</b>								
Bomba 1	Falha	-	-	Sim	Não	Sim	Nível > 65% Nível < 60%	Conforme
		-	-					
Bomba 2	OK	>30%	Partida					
		<25%	Parada					
Bomba 3	Falha	-	-					Conforme
		-	-					
<b>Cenário 4</b>								
Bomba 1	OK	>45%	Partida	Não	Não	Sim	Nível > 65% Nível < 65%	Conforme
		<35%	Parada					
Bomba 2	OK	>60%	Partida					
		<50%	Parada					
Bomba 3	Falha	-	-					Conforme
		-	-					
<b>Cenário 5</b>								
Bomba 1	Falha	-	-	Sim	Sim	Não	Nível > 65% Nível < 60%	Conforme
		-	-					
Bomba 2	Falha	-	-					
		-	-					
Bomba 3	OK	>30%	Partida					Conforme
		<25%	Parada					
<b>Cenário 6</b>								
Bomba 1	OK	>30%	Partida	Não	Sim	Sim	Nível > 65% Nível < 60%	Conforme
		<25%	Parada					
Bomba 2	Falha	-	-					
		-	-					
Bomba 3	Falha	-	-					Conforme
		-	-					
<b>Cenário 7</b>								
Bomba 1	Falha	-	-	Sim	Não	Não	Nível > 65% Nível < 65%	Conforme
		-	-					
Bomba 2	OK	>60%	Partida					
		<50%	Parada					
Bomba 3	OK	>45%	Partida					Conforme
		<35%	Parada					
<b>Cenário 8</b>								
Bomba 1	Falha	-	-	Sim	Sim	Sim	Sim	Conforme
		-	-					
Bomba 2	Falha	-	-					
		-	-					
Bomba 3	Falha	-	-					Conforme
		-	-					

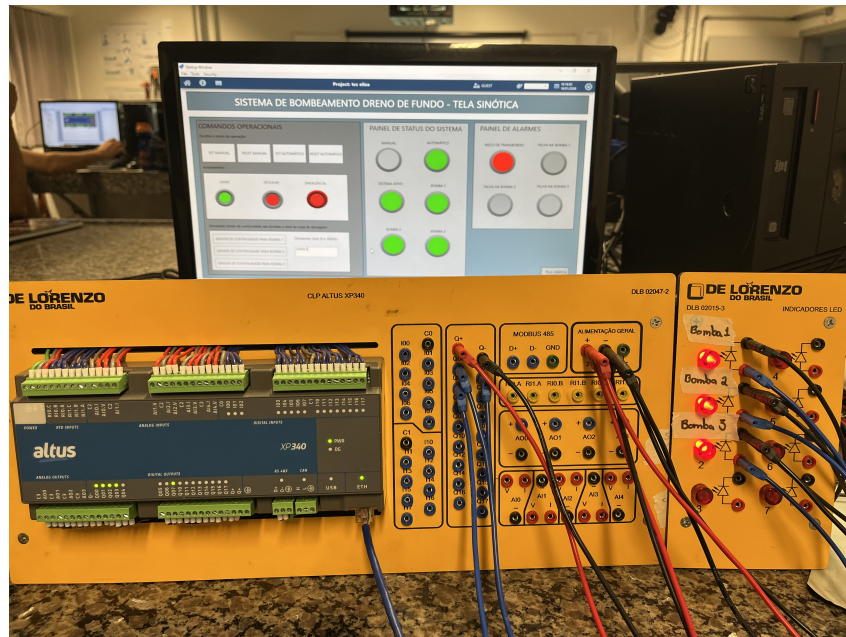
Fonte: Acervo pessoal da autora, 2026.

Observa-se que, em todos os cenários testados, o sistema apresentou comportamento conforme o especificado, atendendo às condições estabelecidas na modelagem lógica. As partidas e paradas das bombas ocorreram de acordo com os limites de nível definidos para cada cenário, bem como a atuação dos alarmes de falha e de transbordo.

É possível observar, nas Figuras 24 e 25, que no Cenário 1 todas as bombas permanecem operando quando o nível atinge 80%, condição esta representada tanto na tela principal do sistema

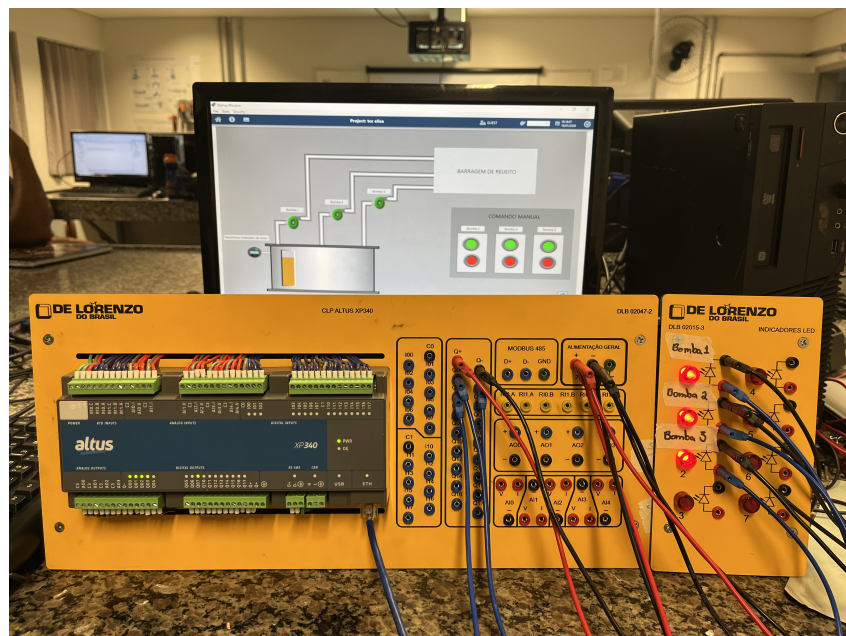
supervisório quanto na tela gráfica do processo, além da bancada física.

Figura 24 – Teste do cenário 1, nível igual a 80% - Tela principal.



Fonte: Acervo pessoal da autora, 2026.

Figura 25 – Teste do cenário 1, nível igual a 80% - Tela gráfica.

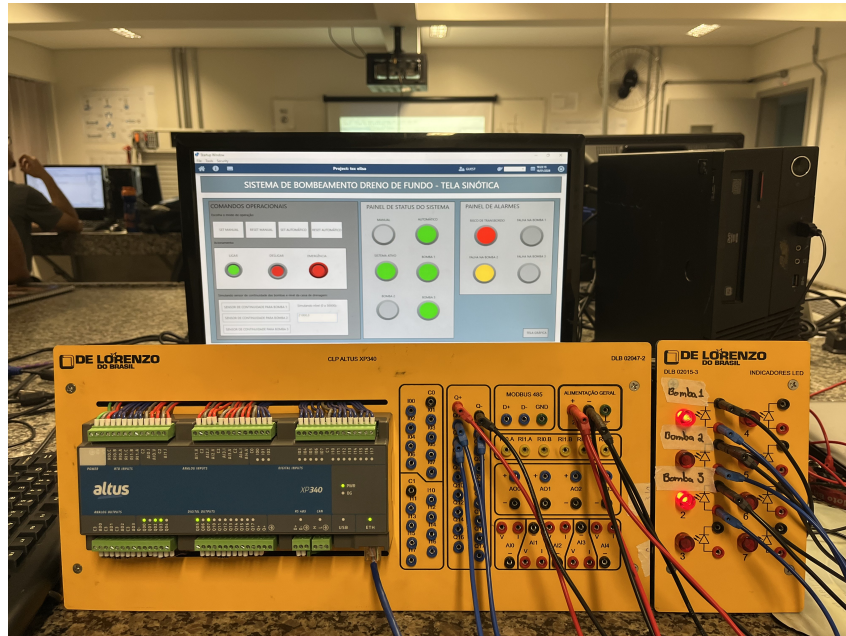


Fonte: Acervo pessoal da autora, 2026.

Nos cenários em que houve a indisponibilidade de uma ou mais bombas, o sistema ajustou automaticamente sua lógica de operação, antecipando a entrada das bombas disponíveis e modificando os limites de acionamento do alarme de transbordo, conforme estabelecido na etapa

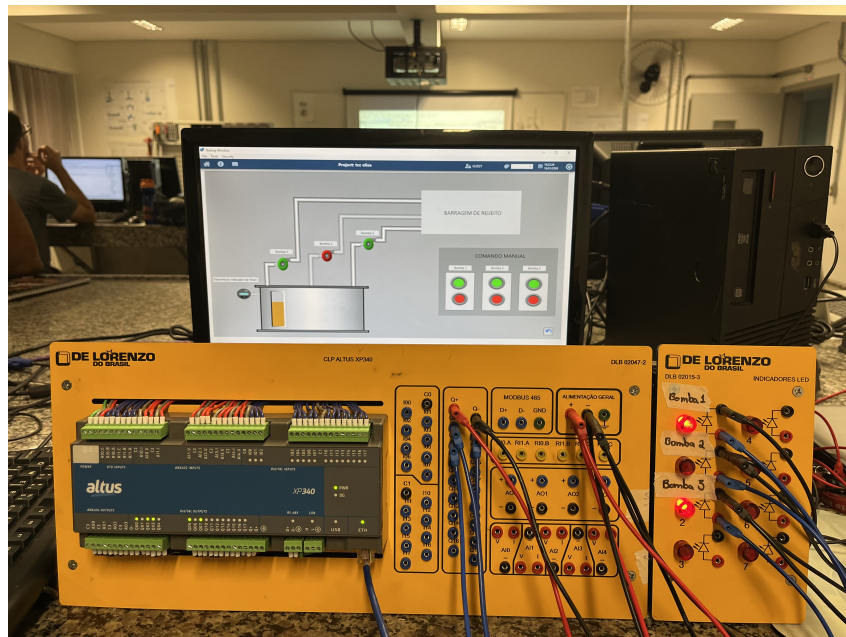
de projeto. Esse tipo de comportamento pode ser observado nas Figuras 26 e 27 no cenário 2, quando ocorre falha na bomba 2 e o alarme de transbordo é reduzido para o nível acima de 65%.

Figura 26 – Teste do cenário 2, nível igual a 70% - Tela principal.



Fonte: Acervo pessoal da autora, 2026.

Figura 27 – Teste do cenário 2, nível igual a 70% - Tela gráfica.

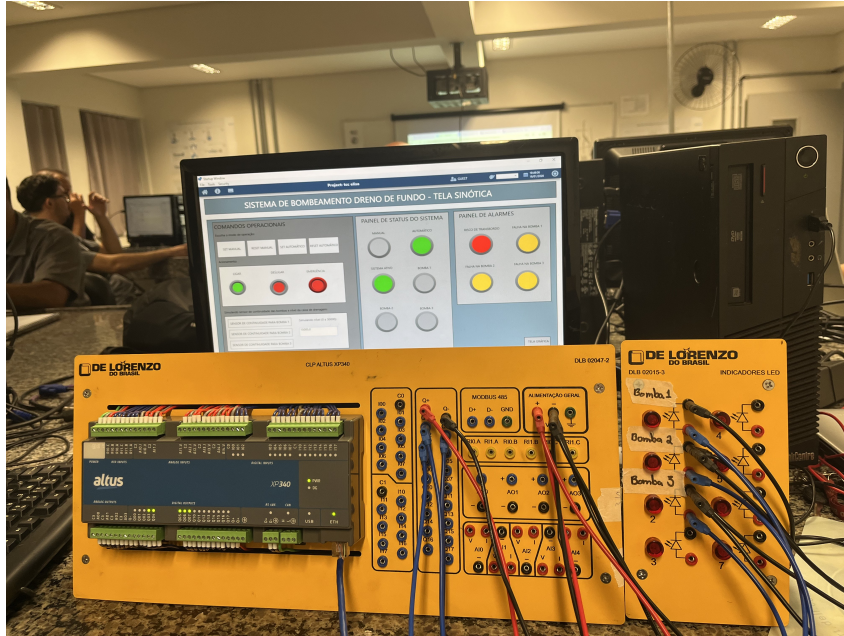


Fonte: Acervo pessoal da autora, 2026.

No cenário 8, caracterizado pela indisponibilidade total das bombas, observou-se a ativação simultânea dos alarmes de falha e do alarme de transbordo, representando corretamente

uma condição crítica do sistema. Na Figura 28, é possível visualizar esses alarmes na tela principal do supervisor.

Figura 28 – Teste do cenário 8, nível igual a 50% - Tela principal.



Fonte: Acervo pessoal da autora, 2026.

Diante do exposto, os testes em bancada realizados permitiram verificar o funcionamento da lógica de controle e da integração com o sistema supervisor para todos os cenários operacionais definidos. Os resultados obtidos demonstram que o sistema respondeu conforme o previsto na etapa de modelagem.

## 6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma solução de automação e supervisão aplicada ao sistema de bombeamento do dreno de fundo na mineração de ouro. A análise dos resultados obtidos permite concluir que os objetivos específicos propostos foram atendidos de forma satisfatória, considerando o escopo acadêmico estabelecido.

Inicialmente, realizou-se o levantamento e a especificação dos instrumentos e equipamentos envolvidos no projeto, levando em conta os recursos disponíveis em laboratório e as necessidades do sistema de bombeamento. Essa etapa possibilitou a identificação das principais variáveis do processo, dos dispositivos de campo simulados e dos equipamentos de automação utilizados, servindo como base para a modelagem lógica e para o desenvolvimento da solução proposta.

Na sequência, foi desenvolvido o sistema de controle e automação do poço de drenagem, fundamentado na definição estruturada dos cenários operacionais e na implementação da lógica de controle em um controlador lógico programável. A utilização da modelagem lógica, por meio de tabelas verdade e da metodologia GRAFCET, contribuiu para a organização do comportamento do sistema diante das diferentes condições de operação e falha das bombas, proporcionando clareza, consistência e facilidade de validação da lógica implementada.

No que se refere ao sistema supervísório, foi implementado um sistema SCADA capaz de integrar as variáveis do processo, os estados de funcionamento das bombas e os alarmes operacionais, disponibilizando ao operador uma interface clara e intuitiva para monitoramento e comando do sistema. As telas desenvolvidas permitem a visualização em tempo real do nível do poço de drenagem, do estado das bombas e da ocorrência de condições anormais.

Por fim, o desempenho do sistema de controle do bombeamento foi avaliado por meio de testes em bancada didática, nos quais foram simulados diferentes cenários operacionais. Os resultados obtidos indicaram um comportamento coerente com o esperado, validando a lógica de controle desenvolvida e evidenciando a correta integração entre o CLP e o sistema supervísório. Embora os testes tenham sido realizados em ambiente controlado e com variáveis simuladas, foi possível verificar a funcionalidade do sistema e sua adequação aos objetivos acadêmicos propostos.

Dessa forma, conclui-se que o trabalho atingiu seus objetivos ao demonstrar a aplicação integrada de conceitos de automação industrial, lógica de controle e sistemas supervísórios em um contexto da indústria de mineração.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Como continuidade do presente trabalho, podem ser exploradas diversas possibilidades de aprimoramento, com o objetivo de ampliar a maturidade técnica da solução desenvolvida e aproximá-la de uma aplicação em ambiente industrial.

Uma das possibilidades consiste na evolução do sistema supervisório para uma arquitetura baseada em Internet das Coisas Industrial, permitindo o acesso remoto às informações do processo e o monitoramento em tempo real por meio de diferentes dispositivos. Essa abordagem possibilitaria maior flexibilidade, escalabilidade e integração do sistema com plataformas externas.

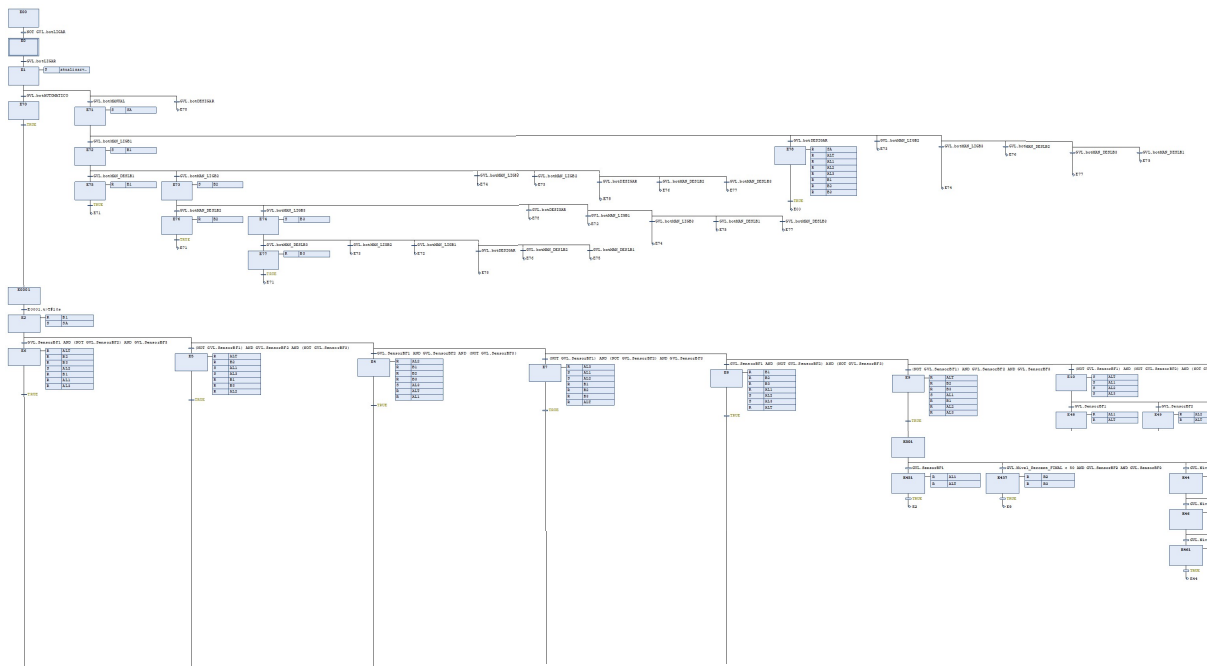
Outra oportunidade de trabalho futuro refere-se à integração do sistema supervisório com um banco de dados histórico, possibilitando o armazenamento contínuo das variáveis de processo, estados operacionais e eventos de alarme. Essa funcionalidade permitiria a análise do comportamento do sistema ao longo do tempo, a geração de relatórios e o apoio à tomada de decisão operacional.

Por fim, a integração dessas melhorias configura uma evolução natural do trabalho desenvolvido, alinhada às tendências atuais da Engenharia de Controle e Automação.

## 7 APÊNDICE A - CÓDIGO DO SISTEMA EM GRAFCET

Devido ao tamanho extenso do código em GRAFCET, sua apresentação foi dividida em cinco imagens sequenciais. Cada imagem representa uma parte do código completo, de modo que todas juntas formam o fluxo integral do programa. Assim, as figuras a seguir devem ser interpretadas em conjunto para visualizar a lógica completa.

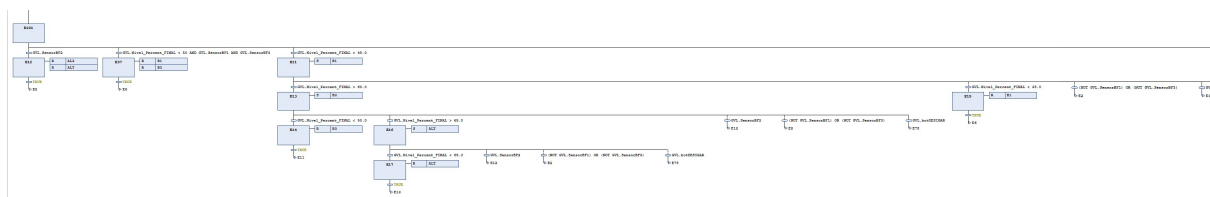
Figura 29 – Trecho inicial do código em GRAFCET.



Fonte: Própria autora, 2026.

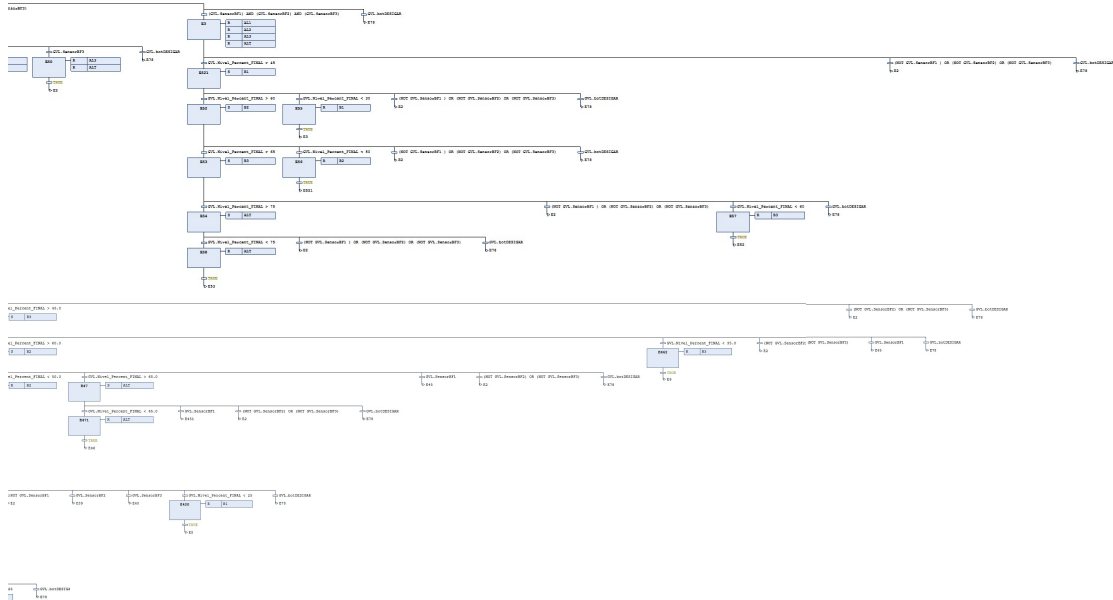


Figura 31 – Segmento intermediário do código.



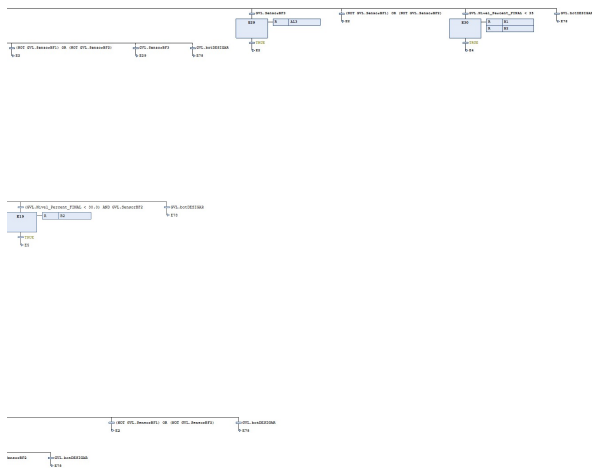
Fonte: Própria autora, 2026.

Figura 32 – Segmento intermediário do código.



Fonte: Própria autora, 2026.

Figura 33 – Parte final do código em GRAFCET.



Fonte: Própria autora, 2026.



## REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 13029: Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha**. Rio de Janeiro, 2006. 5p. Citado na página 14.
- ALMEIDA, E. V.; MARTINS, N. F. A revolução industrial e a indústria 4.0. **Faculdade de Jaguariúna. Jaguariúna**, 2018. Citado na página 21.
- ALTUS. **Manual de Utilização – Série BluePlant**. Porto Alegre, 2021. MU224000, Rev. F. Disponível em: <<https://www.altus.com.br>>. Citado na página 27.
- \_\_\_\_\_. **Manual de Utilização – MasterTool IEC XE**. Porto Alegre, 2025. MT8500, MU299048, Rev. Q. Disponível em: <<https://www.altus.com.br>>. Citado na página 28.
- AQUINO, F. R. de; NETO, J. V. G. Aspectos gerais de execução e controle de pilhas de estéril: Experiências da vale. **TECNOLOGIAS EM PROJEÇÃO**, v. 13, n. 2, p. 41–51, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 17.
- AUTOMATION, I. S. of. **Revisão 7 da Norma ISA-D5.1 de Dezembro de 2008 sobre Símbolos e Identificação de Instrumentação**. 2008. <<https://pt.slideshare.net/slideshow/isa-31027976/31027976>>. Acessado em: 23 março 2025. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- Brasil. **Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências**. 1998. Diário Oficial da União: Brasília, 13 de fevereiro de 1998. Citado na página 18.
- CONSTAIN, N. B. P. *et al.* Integração de sistemas scada com a implementação de controle supervisão em clp para sistemas de manufatura. Florianópolis, SC, 2011. Citado na página 26.
- CUNHA, G. P. Segurança do trabalho aplicada à mineração: uma revisão bibliográfica das normas vigentes. 2022. Citado na página 14.
- Estado de Minas. **Família de vítima desaparecida vive angústia da falta de notícia; buscas são retomadas**. 2014. Disponível em: <[https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2014/09/11/interna\\_gerais,567860/familia-de-vitima-desaparecida-vive-angustia-da-falta-de-noticia-buscas-sao-retomadas.shtml](https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2014/09/11/interna_gerais,567860/familia-de-vitima-desaparecida-vive-angustia-da-falta-de-noticia-buscas-sao-retomadas.shtml)>. Citado na página 14.
- FARIA, M.; BOTELHO, M. O rompimento da barragem de fundão em mariana, minas gerais, brasil: a incubação de um acidente organizacional. **Methodology**, v. 1, n. 9, 2018. Citado na página 14.
- FARIAS, G.; EUGÊNIO, C. Mineração e meio ambiente no brasil. Farias, Carlos Eugênio Gomes, 2002. Citado na página 29.
- FERNANDES, F. R. C.; ARAUJO, E. R. Mineração no brasil: crescimento econômico e conflitos ambientais. In: . [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 17.
- FIRMIANO, F. D. A lógica destrutiva da mineração em paracatu-mg/the destructive logic of mining in paracatu-mg/la lógica destructiva de la minería en paracatu-mg. **REVISTA NERA**, n. 53, p. 47–65, 2020. Citado na página 17.

- FRAGA, O. A. B. Percepções dos operadores de uma mineradora sobre alterações em sua vida no trabalho ocasionadas por um processo de automação. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 19.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61131-3**. Geneva: IEC, 2013. Citado na página 34.
- INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. **ANSI/ISA-101.01-2015, Human Machine Interfaces for Process Automation Systems**. Research Triangle Park, NC, 2015. Citado na página 42.
- JUNIOR, A. F. D. S. **Ensino e Formação em Automação Industrial utilizando Integração de Elementos de Manufatura a partir do GRAFCET**. Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- LORENZO, D. **Fluxograma da bancada da bomba centrífuga**. 2010. <<https://delorenzo.com.br/>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- MAIA, A. F. Desenvolvimento de sistemas de controle e supervisão para processo industrial. 2022. Citado na página 19.
- MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. [S.l.]: Oficina de textos, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- MESQUITA, B. D. de; JEFFERSON, A.; ANDRADE, R. V. Desenvolvimento de um sistema supervisorio para uma planta didática de nível. 2012. Citado na página 19.
- NERIS, R. F. Instrumentação e controle de processos na indústria. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 8, n. 3, p. 1269–1276, 2022. Citado na página 22.
- RIBEIRO, M. A. Automação industrial. **Salvador:[sn]**, 1999. Citado na página 21.
- ROSÁRIO, J. M. **Automação industrial**. [S.l.]: Editora Baraúna, 2012. Citado na página 19.
- SANTOS, F. T. d.; MARINATO, M. M. Sistema supervisorio. SANTOS, Fabrício Teixeira dos Santos MARINATO, Matheus Mariano, 2021. Citado 3 vezes nas páginas 16, 21 e 26.
- SILVA, S.; PROCÓPIO, S.; QUEIROZ, T.; DIAS, L. Caracterização de rejeito de mineração de ouro para avaliação de solubilização de metais pesados e arsênio e revegetação local. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, SciELO Brasil, v. 28, p. 189–196, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 18.
- SMAR Automação Industrial. **Redes Industriais**. 2011. Acesso em: 23 mar. 2025. Disponível em: <<https://www.smar.com.br/pt/artigo-tecnico/redes-industriais>>. Citado na página 22.
- TENÓRIO, D. C.; DIAS, S. M. P.; MAGALHÃES, Y. T. d.; OLIVEIRA, D. A.; ALVARENGA, C. P. d. Automatização do processo de filtragem de uma mineradora. Universidade Federal de Campina Grande, 2015. Citado na página 20.
- WIETHAN, J. H.; PEROZZO, R. F. Desenvolvimento de um sistema scada para automação industrial. 2018. Citado na página 21.
- ZANGHI, E. Sistemas scada: Conceitos. **Proteção e Comunicação de Sistemas Elétricos de Potência**, 2019. Citado na página 19.