

SISTEMA DE CONTROLE AUTOMÁTICO DE CORREÇÃO DE pH UTILIZANDO MICROCONTROLADOR PARA APLICAÇÕES EM EFLUENTES ÁCIDOS INDUSTRIAIS

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED PH NEUTRALIZATION SYSTEM WITH MICROCONTROLLER-BASED CONTROL FOR ACIDIC INDUSTRIAL EFFLUENTS

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema automatizado para correção de pH e controle de nível em efluentes industriais, utilizando o microcontrolador Arduino Mega 2560 com shield de expansão industrial e o sistema supervisório ScadaBR. Foram empregados transmissores analógicos industriais de pH e nível, que permitem o monitoramento em tempo real das variáveis de processo. O microcontrolador processa os sinais recebidos e realiza o acionamento de bombas dosadoras e bombas de retirada por meio de saídas discretas, com lógicas de intertravamento locais baseadas em alarmes. A comunicação com o supervisório ScadaBR ocorre via protocolo Modbus RTU. Os testes demonstraram a viabilidade da aplicação do sistema em substituição a CLPs, com aderência ao Decreto Estadual nº 8.468/1976 e padronização conforme a norma ISA-5.1.

Palavras-chave: automação industrial; Arduino; Modbus RTU; controle de pH; ScadaBR; efluentes industriais.

ABSTRACT

This paper presents the development of an automated system for pH correction and level control in industrial effluents, using the Arduino Mega 2560 microcontroller with an industrial expansion shield and the ScadaBR supervisory system. Industrial-grade analog transmitters for pH and level were employed, enabling real-time monitoring of process variables. The microcontroller processes the received signals and activates dosing pumps and discharge pumps through digital outputs, using local interlock logic based on alarms. Communication with ScadaBR occurs via the Modbus RTU protocol. Tests demonstrated the feasibility of applying the system as a replacement for PLCs, in compliance with State Decree No. 8.468/1976 and following the ISA-5.1 standard for signal standardization.

Keywords: industrial automation; Arduino; Modbus RTU; pH control; ScadaBR; industrial effluents.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Problema de pesquisa

O lançamento de efluentes com pH fora dos limites estabelecidos por normas ambientais representa um problema crítico para a indústria, podendo acarretar prejuízos ambientais, multas e sanções legais. No estado de São Paulo, o Decreto Estadual nº 8.468/1976 determina que o pH dos efluentes deve ser mantido entre 5,0 e 9,0 antes do descarte. No entanto, muitas indústrias de pequeno e médio porte não

dispõem de soluções automatizadas acessíveis para realizar esse controle com precisão e segurança. Além disso, a falta de supervisão remota e o controle de nível deficiente podem comprometer o funcionamento do sistema e gerar riscos operacionais.

1.2 Objetivo(s)

Desenvolver um sistema automatizado para correção de pH e controle de nível em efluentes industriais, utilizando microcontrolador Arduino Mega 2560, transmissores industriais com saída 4–20 mA e sistema supervisório ScadaBR, com comunicação via protocolo Modbus RTU. O projeto visa assegurar conformidade com o Decreto Estadual nº 8.468/1976, proporcionar supervisão em tempo real e permitir a atuação automática de bombas dosadoras e de retirada com segurança.

1.3 Justificativa

A adoção de plataformas tecnológicas abertas como o Arduino e o ScadaBR permite a implementação de soluções confiáveis para automação de processos ambientais. A proposta substitui sistemas convencionais baseados em CLPs por uma alternativa funcional, mantendo robustez, segurança e rastreabilidade. Ao integrar sensores industriais, lógicas de intertravamento e supervisão remota, o sistema oferece confiabilidade ao processo e contribui para a conformidade ambiental das indústrias. A aplicação da norma ISA-5.1 reforça a padronização e a documentação técnica do projeto.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 pH e Neutralização Química

O pH mede a acidez ou alcalinidade de uma solução, variando de 0 a 14. Segundo Chang (2011), é definido como o logaritmo negativo da concentração de íons H_3O^+ , sendo 7 neutro, abaixo disso ácido, e acima alcalino. De acordo com Feltre (2004), o controle do pH em efluentes industriais é essencial para evitar impactos ambientais. A correção é geralmente feita com hidróxido de sódio (NaOH).

2.2 Sensores e Sinais Analógicos e Discretos

Sensores industriais convertem grandezas físicas em sinais elétricos. Conforme Balbinot e Brusamarello (2019), sinais analógicos como 4–20 mA são preferidos por sua imunidade a ruídos e confiabilidade em longas distâncias. Já os sinais 0–5 V são comuns em curtas distâncias e microcontroladores. A norma ANSI/ISA-5.1-2009 padroniza a identificação desses sinais. Malvino e Bates (2016) destacam que sinais discretos operam com níveis lógicos, sendo usados para indicar estados (ligado/desligado), com entradas NPN e saídas a relé em acionamentos industriais.

2.3 Arduino, Shield Industrial e Controle Digital

O Arduino Mega 2560 é uma plataforma de prototipagem flexível, com diversas entradas e saídas, programável em C/C++ (McRoberts, 2013). Quando associado a uma shield industrial, torna-se capaz de interagir com sensores e atuadores industriais. Petruzella (2019) destaca que microcontroladores podem assumir funções típicas de CLPs quando associados a interfaces de expansão robustas.

2.4 Sistemas Supervisórios SCADA e o ScadaBR

Scada é um sistema para supervisão e controle de processos. Segundo Quesada (2017), permite visualizar variáveis em tempo real, gerar alarmes e registrar históricos. O ScadaBR, desenvolvido em Java e de código aberto, é compatível com o protocolo Modbus RTU e adequado para aplicações industriais e educacionais.

2.5 Protocolo Modbus RTU e Bibliotecas do Arduino

Conforme a MODICON (1996), o Modbus RTU é um protocolo mestre-escravo para comunicação serial. No projeto, foi usado para integração entre o Arduino e o ScadaBR, com auxílio das bibliotecas “ModbusRTUSlave.h” e “SoftwareSerial.h”, que possibilitam a troca estável de dados.

2.6 Transmissores de Nível por Radar e pHmetros Industriais

Transmissores de nível tipo radar são sensores sem contato ideais para ambientes industriais com vapores e alta umidade, oferecendo medições precisas. pHmetros industriais utilizam eletrodos para medir o potencial elétrico gerado por íons H^+ , conforme Chang (2011), permitindo leituras confiáveis em tempo real.

2.7 Dispositivos de Campo e Comandos Elétricos

Comandos elétricos envolvem ações de controle de cargas como bombas e válvulas, normalmente por meio de contatores, relés e dispositivos de proteção. Conforme Carvalho (2011), esses dispositivos devem estar interligados de forma segura, respeitando lógicas de intertravamento e normas de segurança. Malvino e Bates (2016) ressaltam que a atuação dos comandos depende do correto condicionamento dos sinais lógicos e do acionamento adequado de saídas discretas.

2.8 Normas Técnicas e Legislação Ambiental

A norma ANSI/ISA-5.1-2009 padroniza a simbologia e os TAGs utilizados em sistemas de instrumentação e controle, facilitando a leitura e compreensão de diagramas e listas de instrumentos. As normas da Petrobras N-1882, N-1883 e N-2833 são amplamente utilizadas na elaboração de diagramas de malha, diagramas lógicos e listas de instrumentos em projetos de automação industrial. O Decreto Estadual nº 8.468/1976, por sua vez, define os padrões de qualidade exigidos para lançamento de efluentes no estado de São Paulo.

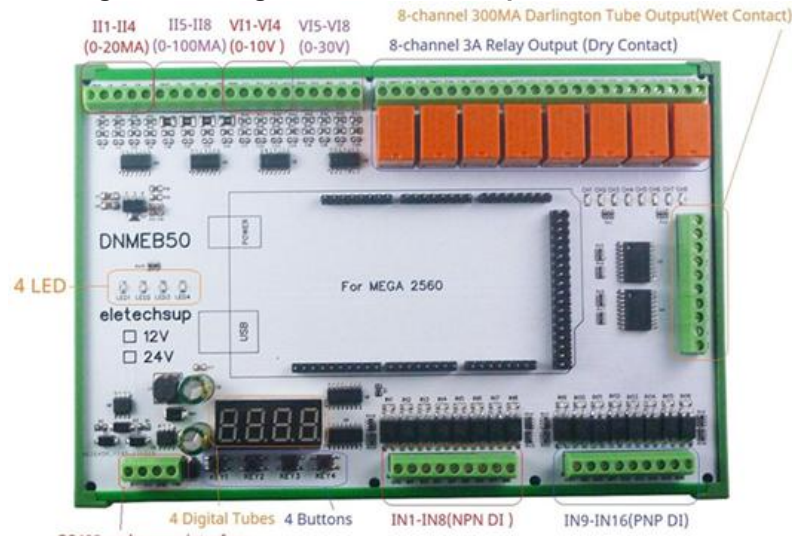
3 METODOLOGIA

3.1 Levamento de dispositivos e sinais

O sistema foi estruturado com base na definição dos dispositivos de campo necessários para o tratamento de efluentes ácidos, incluindo bombas de transferência, dosadoras de reagente, agitadores, transmissores de nível por radar e de pH. Foram definidas 8 saídas discretas a relé (bombas/agitadores), 8 entradas discretas NPN (estado de contatores) e 5 entradas analógicas (sinais 4–20 mA) e 5 entradas analógicas (0-5VCC).

O controle utiliza Arduino Mega 2560 com shield de expansão industrial, que integra entradas e saídas para conexão direta aos dispositivos de campo.

Figura 1 – Imagem da shield de expansão industrial.



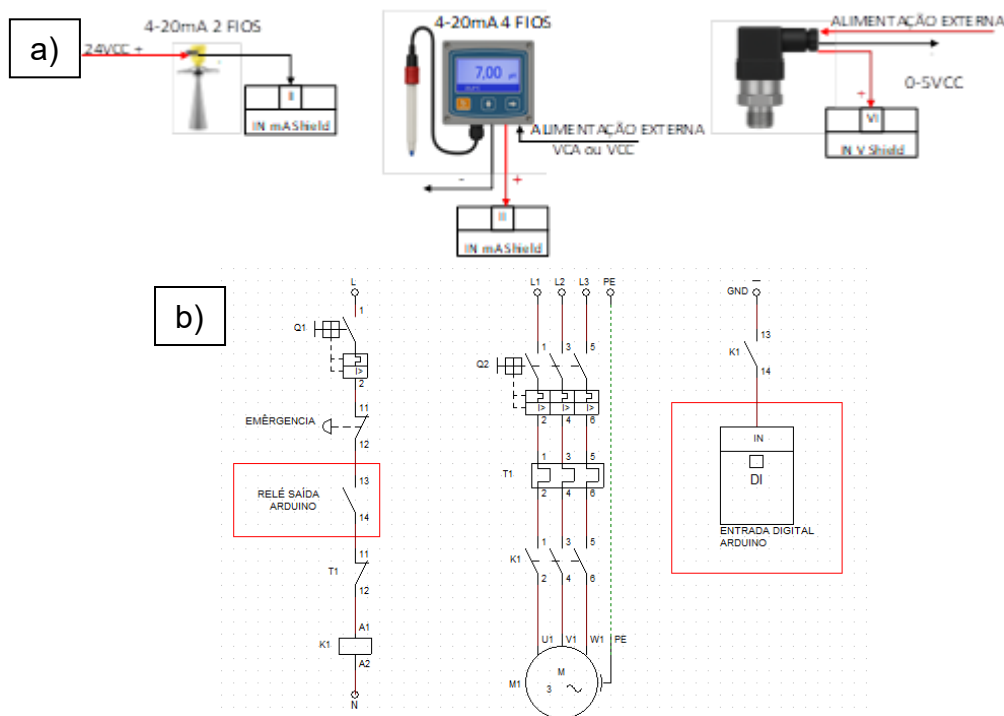
Fonte:

(<https://485io.com/>, dez 2024).

3.1 Interligação de sinais analógicos e discretos

Sensores e atuadores foram interligados ao microcontrolador e supervisor por conexões padronizadas. Entradas analógicas receberam sinais de transmissores 4–20 mA de dois ou quatro fios, ou 0–5 V. Entradas discretas NPN operam com pulso em nível baixo, enquanto saídas discretas a relé acionam bombas e agitadores. Ambas as ligações estão ilustradas na Figura 2.

Figura 2 – Ligações de instrumentação de campo: (a) transmissores analógicos (4–20 mA e 0–5 V); (b) acionamento de motor com leitura de estado.



Fonte:

Elaborado pelo autor.

3.3 Leitura das variáveis

As variáveis analógicas são lidas pela shield industrial e convertidas por funções no código, como `map()`, com escala de 0 a 1000 (0,0% a 100,0%). A seleção dos canais é feita via software, com TAGs específicas para cada entrada. As Figuras 3 e 4 ilustram a conversão dos sinais analógicos (mA e V, respectivamente), enquanto a Figura 5 mostra a leitura de um sinal digital invertido (discreto). Os valores são transmitidos ao ScadaBR com uma casa decimal.

Figura 3 – Conversão mA para variável final.

```
I1_Current = Current_ratio_value_20MA * analogRead(II1); //LEITURA II1 mA MAPEADO RANGE LT_10101
IN1_mA = mapFloat(I1_Current, 400.0, 2000.0, 0.0, 1000.0);
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4 – Conversão V para variável final.

```
V1_Voltage = Voltage_ratio_value_10V * analogRead(VI1); //LEITURA V1 mA MAPEADO RANGE LT_10101
IN1_V = mapFloat(V1_Voltage, 0.0, 50.0, 0.0, 1000.0);
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5 – Leitura do sinal discreto.

```
//LEITURA INVERTIDA DA ENTRADA DA PLACA POR TAG
XSH_10001 = !digitalRead(IN1); //LEITURA DA ENTRADA NPN INVERTIDO PADRÃO PLACA
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 1 - Mapeamento dos canais analógicos.

TAG	Variável Monitorada	Canal (4-20 mA)	Canal (0-5 V)
LT-10101	Nível – Tanque R-10001	A0 - II1	A8 - VI1
LT-10301	Nível – Tanque R-10003	A1 - II2	A9 - VI2
LT-10401	Nível – Tanque Alcalinizante	A2 - II3	A10 - VI3
AT-10101	pH – Tanque R-10001	A3 - II4	A11 - VI4
AT-10201	pH – Tanque R-10002	A4 - II5	A12 - VI5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 - Mapeamento dos canais entradas discretas.

Canal	TAG	Descrição	Canal	TAG	Descrição
DI06-IN1	XSH-10001	Retorno Agitador R-10001	DI02-IN5	XSH-10201	Retorno Bomba P-10201
DI05-IN2	XSH-10002	Retorno Agitador R-10002	DI14-IN6	XSH-10202	Retorno Bomba P-10202
DI04-IN3	XSH-10101	Retorno Bomba P-10101	DI15-IN7	XSH-10301	Retorno Bomba P-10301
DI03-IN4	XSH-10102	Retorno Bomba P-10102	DI19-IN8	XSH-10302	Retorno Bomba P-10302

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 Alarmes e intertravamentos

Alarmes foram definidos para variáveis de pH e nível, nas faixas: muito baixo (LL), baixo (L), alto (H) e muito alto (HH), com ações visuais, sonoras e intertravamentos locais. Limites com histerese evitam oscilações: $\pm 0,3$ pH e $\pm 2\%$ para nível. A Figura 6 apresenta a lógica de atuação dos alarmes muito altos para as variáveis de nível (LAHH) e pH (AAHH). A Tabela 3 mostra a classificação dos alarmes conforme a norma Petrobras N-2833.

Figura 6 – Exemplos de atuação e desativação de alarmes muito altos: (a) alarme de nível LAHH - LI-10301; (b) alarme de pH AAHH - AI-10101.

```

a) //ACIONAMENTO DE ALARMES LI_10301
if ( LT_10301 >= HLAHH_10301 ) { //ACIONAMENTO ALARME HIHI LI_10301
LAHH_10301 = 1;}
if ( LT_10301 <= (HLAHH_10301 - histerese_nivel) ) { //DESACIONAMENTO ALARME HI LI_10301
LAHH_10301 = 0;}

b) //ACIONAMENTO DE ALARMES AI_10101
if ( AT_10101 >= HAAHH_10101 ) { //ACIONAMENTO ALARME HIHI AI_10101
AAHH_10101 = 1;}
if ( AT_10101 <= (HAAHH_10101 - histerese_pH) ) { //DESACIONAMENTO ALARME HI AI_10101
AAHH_10101 = 0;}

```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 - Classificação de alarmes segundo norma Petrobras 2833.

TAG	Instrumento	Tipo de Alarme	Prioridade	Condição de Acionamento	Ação do alarme
AAHH-10101	pH - R-10001	Muito Alto	Alta	AT-10101 >= HAAHH_10101	Sonoro + intertravamento
AAH-10101	pH - R-10001	Alto	Baixa	AT-10101 >= HAAH_10101	Visual
AAL-10101	pH - R-10001	Baixo	Média	AT-10101 <= HAAL_10101	Visual
AALL-10101	pH - R-10001	Muito Baixo	Alta	AT-10101 <= HAALL_10101	Sonoro + intertravamento
AAHH-10201	pH - R-10002	Muito Alto	Alta	AT-10201 >= HAAHH_10201	Sonoro + intertravamento
AAH-10201	pH - R-10002	Alto	Baixa	AT-10201 >= HAAH_10201	Visual
AAL-10201	pH - R-10002	Baixo	Média	AT-10201 <= HAAL_10201	Visual
AALL-10201	pH - R-10002	Muito Baixo	Alta	AT-10201 <= HAALL_10201	Sonoro + intertravamento
LAHH-10101	Nível - R-10001	Muito Alto	Alta	LT-10101 >= HLAHH_10101	Sonoro + intertravamento
LAH-10101	Nível - R-10001	Alto	Média	LT-10101 >= HLAH_10101	Visual
LAL-10101	Nível - R-10001	Baixo	Baixa	LT-10101 <= HLAL_10101	Visual
LALL-10101	Nível - R-10001	Muito Baixo	Alta	LT-10101 <= HLALL_10101	Sonoro + intertravamento
LAHH-10301	Nível - R-10003	Muito Alto	Alta	LT-10301 >= HLAHH_10301	Sonoro + intertravamento
LAH-10301	Nível - R-10003	Alto	Média	LT-10301 >= HLAH_10301	Visual
LAL-10301	Nível - R-10003	Baixo	Baixa	LT-10301 <= HLAL_10301	Visual
LALL-10301	Nível - R-10003	Muito Baixo	Alta	LT-10301 <= HLALL_10301	Sonoro + intertravamento
LAHH-10401	Nível - R-10004	Muito Alto	Alta	LT-10401 >= HLAHH_10401	Sonoro + intertravamento
LAH-10401	Nível - R-10004	Alto	Média	LT-10401 >= HLAH_10401	Visual
LAL-10401	Nível - R-10004	Baixo	Média	LT-10401 <= HLAL_10401	Visual
LALL-10401	Nível - R-10004	Muito Baixo	Alta	LT-10401 <= HLALL_10401	Sonoro

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5 Acionamentos e intertravamentos

A lógica de controle foi desenvolvida para operação manual e automática, com base em leituras de pH e nível, além de alarmes críticos. A atuação dos dispositivos está detalhada nas Tabelas 4 a 8.

As bombas de retirada P-10101/02 (tanque R-10001) operam conforme níveis mínimo, máximo e comandos manuais Tabela 4 (causa e efeito).

Tabela 4 - Causa e Efeito P-10101/P-10102.

TAG	Descrição	Modo de Operação	Condição	Efeito
LALL-10101	Nível muito baixo no R-10001 (10%)	Todos	Intertravamento ativo	Desliga e impede ligar
LAHH-10301	Nível muito alto no R-10003 (90%)	Todos	Intertravamento ativo	Desliga e impede ligar
LAH-10101	Nível alto (85%)	Automático		Liga
LAL-10101	Nível baixo (20%)	Automático		Desliga
M_HS-10101/102	Comando manual SCADA	Manual		Liga

Fonte: Elaborado pelo autor.

As bombas P-10201/02 (tanque R-10003) seguem lógica similar Tabela 5(causa e efeito).

Tabela 5 - Causa e Efeito P-10201/P-10202.

TAG	Descrição	Modo de Operação	Condição	Efeito
LALL-10301	Nível muito baixo no R-10003 (10%)	Todos	Intertravamento ativo	Desliga e impede ligar
LAH-10301	Nível alto (80%)	Automático		Liga
LAL-10301	Nível baixo (20%)	Automático		Desliga
M_HS-10201/102	Comando manual SCADA	Manual		Liga

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os agitadores A-10001/02 operam somente em modo manual (Tabela 6).

Tabela 6 – Causa e efeito para os agitadores A-10001 e A-10002.

TAG	Descrição	Modo de Operação	Efeito
M_HS-10001/02	Comando manual SCADA	Manual	Liga/Desliga

Fonte: Elaborado pelo autor.

As bombas dosadoras P-10301 e P-10302 realizam a correção de pH com base na leitura dos transmissores AT-10101 e AT-10201. A atuação segue os parâmetros definidos pelo Decreto Estadual nº 8.468/1976, conforme Tabela 7 (fluxo de ação) e Tabela 8 (causa e efeito).

Tabela 7 – Fluxo de Ação do Sistema de Correção de pH.

Faixa de pH Detectada	Classificação	Ação do Sistema
pH < 6,0	AAL	Liga bomba dosadora (injeção de NaOH)
6,0 ≤ pH ≤ 7,5	Normal	Mantém o estado anterior (monitoramento)
pH > 7,5	AAH	Desliga bomba dosadora

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 – Causa e efeito para as bombas P-10301 e P-10302.

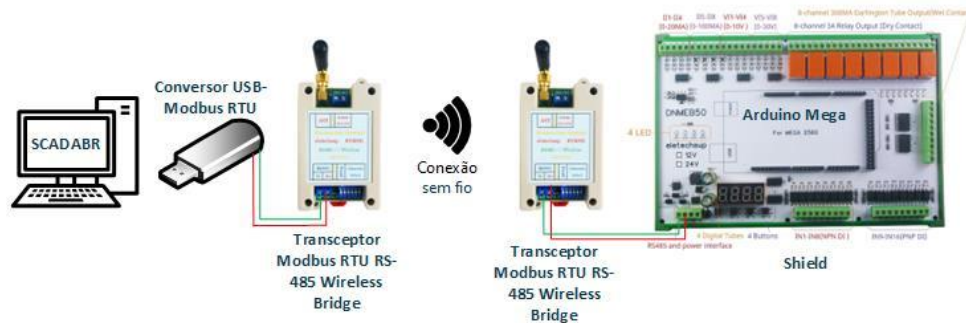
TAG	Descrição	Modo de Operação	Condição	Efeito
AAHH-10101/10201	pH muito alto	Todos	Intertravamento ativo	Desliga e impede ligar
AAL-10101/10201	pH baixo dentro do limite	Automático		Liga
AAH-10101/10201	pH acima do ideal	Automático		Desliga
M_HS-10301/10302	Comando manual SCADA	Manual		Liga

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6 Integração entre microcontrolador e ScadaBR através do protocolo Modbus

A comunicação entre o microcontrolador e o ScadaBR foi implementada utilizando o protocolo Modbus RTU em arquitetura mestre-escravo. O Arduino opera como escravo, responsável pela leitura das variáveis, execução da lógica de controle e envio dos dados via registradores Modbus. A topologia física é apresentada na Figura 7, que demonstra a integração dos dispositivos, inclusive com segmento sem fio para transmissão confiável.

Figura 7 – Arquitetura de comunicação microcontrolador – ScadaBR via Modbus RTU com segmento sem fio.

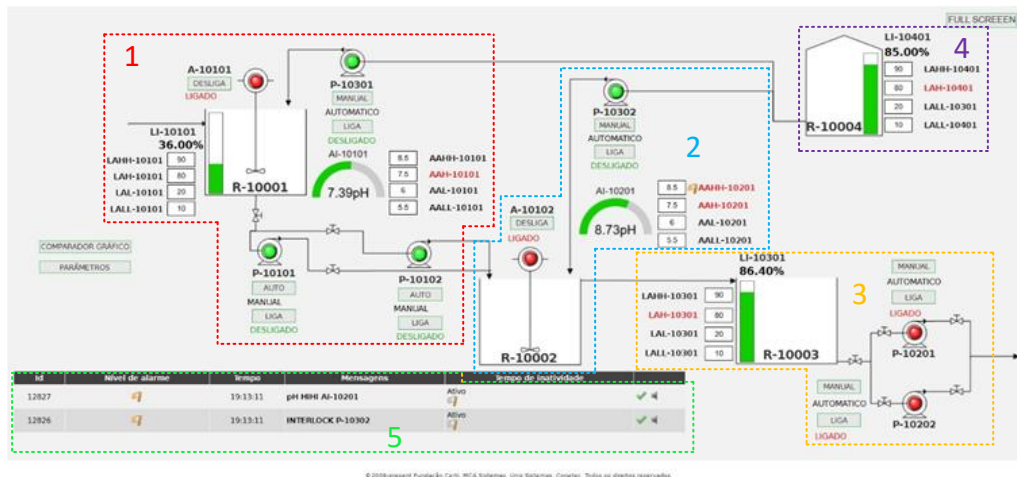


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.7 Operação do sistema supervisório ScadaBR.

A interface do ScadaBR permite monitoramento em tempo real, acionamento de dispositivos, visualização de históricos e alarmes. A Figura 8 apresenta a tela principal de operação, com status de bombas, comandos manuais e leituras de sensores, utilizada para supervisão do sistema de correção de pH e transferência de efluentes.

Figura 8 – Tela principal de operação no ScadaBR.



Fonte: Elaborado pelo autor.

1. Recepção e correção primária do efluente.
2. Correção final.
3. Descarte para tratamento efluente.
4. Tanque de armazenamento de alcalinizante (NaOH).
5. Banner de dos últimos 3 alarmes ativos.

A Figura 9 mostra a tela de configuração, onde são ajustados os limites de alarme e mapeadas as variáveis aos canais analógicos. Essa configuração é acessível apenas a usuários autorizados.

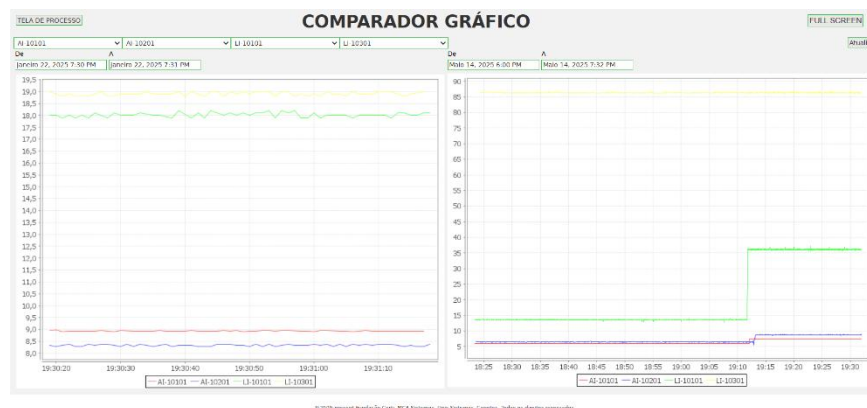
Figura 9 – Tela de configuração de variáveis no ScadaBR.

LI-10101	LI-10301	LI-10401	AI-10101	AI-10201
LAHH-10101: 90	LAHH-10301: 90	LAHH-10401: 90	AAHH-10101: 8.5	AAHH-10201: 8.5
LAH-10101: 80	LAH-10301: 80	LAH-10401: 80	AAH-10101: 7.5	AAH-10201: 7.5
LAL-10101: 20	LAL-10301: 20	LAL-10401: 20	AAL-10101: 6	AAL-10201: 6
LALL-10101: 10	LALL-10301: 10	LALL-10401: 10	AALL-10101: 5.5	AALL-10201: 5.5
ENTRADA ANALÓGICA: RANGE 0 - 5V	ENTRADA ANALÓGICA: RANGE 0 - 5V	ENTRADA ANALÓGICA: RANGE 0 - 5V	ENTRADA ANALÓGICA: RANGE 0 - 5V	ENTRADA ANALÓGICA: RANGE 0 - 5V

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 10 exibe os gráficos de tendência, utilizados para análise histórica das variáveis como pH e nível, essenciais para diagnósticos operacionais.

Figura 10 – Tela de gráficos de tendência no ScadaBR.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Teste Prático com Transmissor de Nível Tipo Radar

Foi realizado um teste com transmissor de nível tipo radar conectado à entrada analógica II1 (4–20 mA), simulando três níveis (0%, 50% e 100%). Para verificar a correta transição entre níveis, uma barreira física foi posicionada na marca de 50%. As leituras foram monitoradas simultaneamente via aplicativo Bluetooth (corrente em mA) e no ScadaBR (valor convertido).

Figura 11 – Teste com transmissor de nível: (a) montagem física com barreira em 50%; (b) leitura via aplicativo Bluetooth e ScadaBR.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Teste Prático com Transmissor de pH

Para validação da leitura analógica de pH, utilizou-se um transmissor industrial calibrado conforme a tabela de potencial eletroquímico a 25 °C (SKOOG et al., 2014). Foram simulados dois valores: pH 6 (60 mV) e pH 8 (-60 mV). Como o gerador de sinais não fornecia tensão negativa, a polaridade foi invertida fisicamente.

Tabela 9 – Relação entre pH e potencial do eletrodo (25 °C)

pH	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
mV	414	355	296	237	178	119	60	0	-60	-119	-178	-237	-296	-355	-414

Fonte: Adaptado de SKOOG, D. A. et al. *Fundamentos de Química Analítica*, 9. ed., 2014.

Figura 12 – Teste com transmissor de pH: (a) montagem com sinais de 60 mV e -60 mV; (b) leitura em tempo real e configuração do canal no ScadaBR.

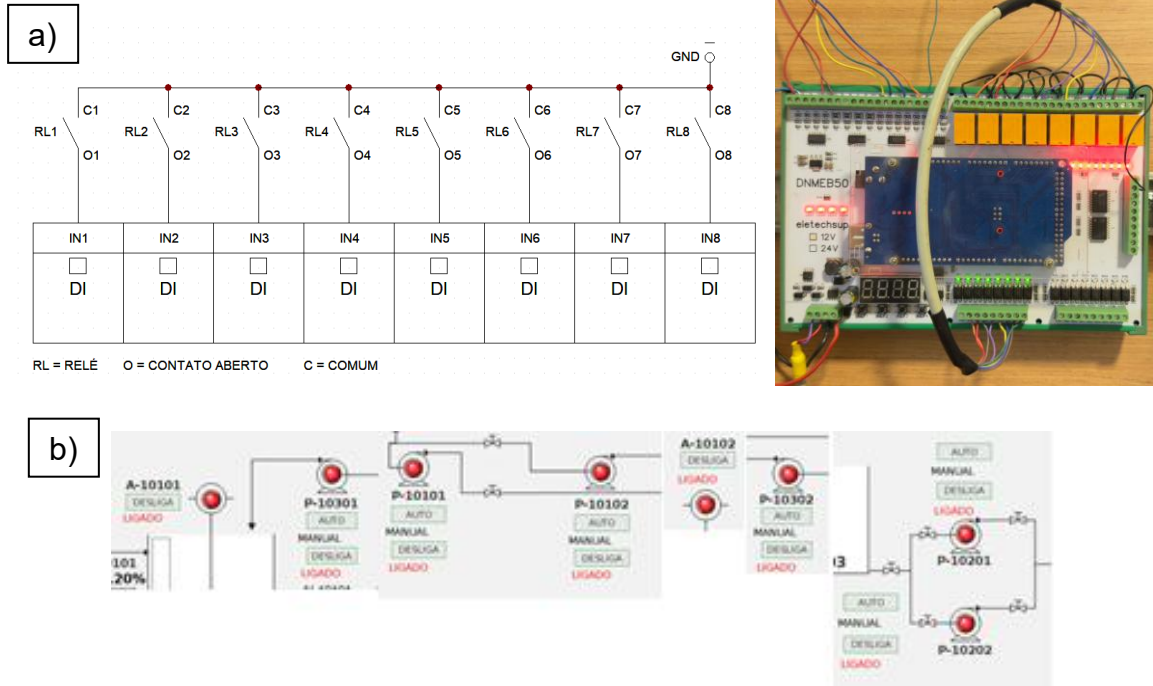


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Teste Prático das Saídas a Relé e Entradas Discretas NPN

Foi realizado teste para validar saídas digitais a relé (DO) e entradas digitais NPN (DI), com retorno de estado por contato seco. A montagem incluiu acionamento total dos canais e monitoramento no ScadaBR.

Figura 13 – Validação de DO e DI: (a) esquema elétrico e acionamento de saídas; (b) tela do ScadaBR com leitura dos sinais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Simulação e Verificação dos Alarmes no ScadaBR

A matriz de alarmes foi verificada por simulação prática no ScadaBR, forçando os estados de alarme LAL, LALL, AAH e AAHH.

Figura 14 – Verificação dos alarmes: (a) lista de eventos; (b) variáveis com alarme ativo.



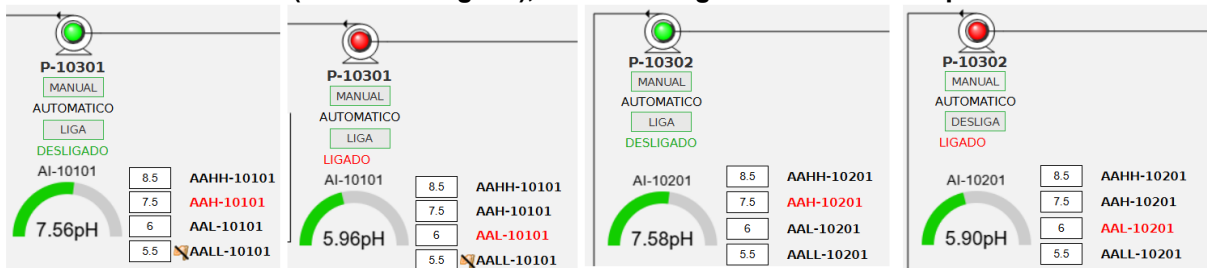
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Teste de Controle Automático de pH

Foi simulada a lógica de controle automático das bombas dosadoras P-10301 e P-10302, programadas para atuar conforme as faixas de pH no microcontrolador. As condições testadas foram:

- pH < 6,0 (AAL): acionamento automático da bomba;
- pH > 7,5 (AAH): desligamento automático da bomba.

Figura 15 – Tela do ScadaBR com simulação das condições de alarme AAL (bomba ligada) e AAH (bomba desligada), conforme lógica de controle de pH.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÃO

O projeto desenvolvido demonstrou a viabilidade técnica e operacional de utilizar um microcontrolador Arduino Mega 2560 em substituição a CLPs industriais para o controle automático de pH e nível em efluentes. Com apoio de uma shield de expansão e sensores industriais 4–20 mA, o sistema obteve resultados satisfatórios de estabilidade e precisão.

A comunicação via Modbus RTU e a interface gráfica no ScadaBR permitiram supervisão em tempo real, registro de históricos, emissão de alarmes e comandos manuais. Os testes práticos comprovaram a robustez do sistema frente a diferentes condições de processo.

A padronização ISA-5.1 e o atendimento ao Decreto Estadual nº 8.468/1976 asseguraram a conformidade legal e técnica do sistema, demonstrando que soluções abertas e de investimento reduzido podem ser empregadas de forma confiável em ambientes industriais. O sistema também se mostra promissor para uso em projetos educacionais e de pesquisa.

REFERÊNCIAS

ANSI/ISA-5.1-2009. **Instrumentation Symbols and Identification**. The International Society of Automation, 2009.

BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

BEGA, Egídio Alberto. **Instrumentação Industrial**. São Paulo: Érica, 2019.

CARVALHO, Geraldo. **Comandos Elétricos. Teoria e Atividades**. São Paulo: Érica, 2011.

CHANG, Raymond. **Química**. 10. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2011.

FELTRE, Ricardo. **Química**. Vol. 2. São Paulo: Moderna, 2004.

MALVINO, Albert P.; BATES, David J. **Eletrônica. Volume 1**. Tradução de Antônio Pertence Jr. São Paulo: AMGH, 2016.

McROBERTS, Michael. **Arduino básico**. São Paulo: Novatec, 2013.

MODICON. **Modbus protocol reference guide**. North Andover: Schneider Electric, 1996.

PETROBRAS. N-1882: **Critérios para elaboração de projetos de instrumentação**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2012.

PETROBRAS. N-1883: **Apresentação de projetos de instrumentação e automação**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2012.

PETROBRAS. N-2833: **Formulários e listas para projetos de instrumentação**. Rio de Janeiro: Petrobras, 2012.

PETRUZELLA, Frank D. **Controladores Lógicos Programáveis**. São Paulo: Érica, 2019.

QUESADA, Ricardo Carvalho. **Controle e automação de processos industriais**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2017.

SKOOG, Douglas A.; WEST, Donald M.; HOLLER, F. James; CROUCH, Stanley R. **Fundamentos de Química Analítica**. 9. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto estadual nº 8.468, de 8 de setembro de 1976**. Dispõe sobre o controle da poluição do meio ambiente. Diário Oficial do Estado: São Paulo, 9 set. 1976.

ScadaBR. **Página oficial**. Disponível em: <https://scadaBR.org> . Acesso em: 07 dez. 2024.

485IO. **Módulos de expansão para automação**. Disponível em: <https://485io.com> . Acesso em: 07 dez. 2024.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo apoio constante ao longo desta trajetória. Aos colegas de trabalho, pelo incentivo e troca de experiências que contribuíram para o projeto. Aos professores orientadores, pela dedicação e suporte técnico, e aos colegas de classe, pelo companheirismo e aprendizado compartilhado.

SOBRE O(S)AUTOR(ES)

Sobre os autores:
