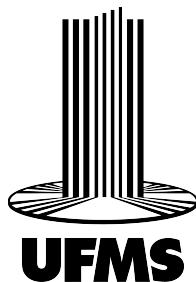


UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Monitoramento de Processos Industriais: Sistema Inteligente de Baixo Custo

Pedro Henrique Mendes Moreira

Campo Grande - MS
27 de Novembro de 2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Monitoramento de Processos Industriais: Sistema Inteligente de Baixo Custo

Pedro Henrique Mendes Moreira

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como exigência para obtenção do grau de Ba-
charelado em Engenharia Elétrica da Universi-
dade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Quevedo Andrea

Campo Grande - MS
27 de Novembro de 2025

Monitoramento de Processos Industriais: Sistema Inteligente de Baixo Custo

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do grau de
Bacharelado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul –
UFMS.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Cristiano Quevedo Andrea

Prof. Dr. Tiago Henrique de Abreu Mateus

Prof. Dr. Luigi Galotto Junior

Campo Grande - MS
27 de Novembro de 2025

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, sabedoria e perseverança para concluir esta jornada acadêmica. À minha família, por ser o alicerce que sustentou cada passo desta caminhada. Ao meu pai, pelo exemplo de trabalho, dedicação e pelos conselhos que sempre me guiaram. À minha mãe, pelo amor incondicional, paciência e incentivo diário, fundamentais para que eu jamais desistisse dos meus objetivos. À minha irmã, pela amizade, compreensão e apoio constante em todos os momentos. À minha namorada, pela presença, carinho e compreensão durante os períodos de estudo e dedicação ao projeto, sendo sempre uma fonte de motivação e equilíbrio. À minha madrinha e ao meu padrinho, por acreditarem em mim, incentivarem meus sonhos e estarem sempre dispostos a ajudar nas horas mais desafiadoras. Expresso também minha sincera gratidão ao meu professor orientador, pela orientação técnica, paciência e dedicação ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho, contribuindo não apenas para a conclusão do TCC, mas para minha formação como engenheiro. Por fim, agradeço à banca examinadora, pela presença, pelas valiosas observações e contribuições que enriqueceram este trabalho e ampliaram minha visão acadêmica e profissional. A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta conquista, deixo meu mais profundo muito obrigado.

Resumo

O presente Trabalho de Conclusão de Curso apresenta o desenvolvimento e a validação de um Sistema Inteligente de Baixo Custo para Monitoramento de Processos Industriais, aplicado à simulação de um misturador químico. A proposta surge da necessidade de soluções de monitoramento em tempo real compatíveis com os princípios da Indústria 4.0 e acessíveis a pequenas e médias empresas. O objetivo foi demonstrar que, com um projeto de engenharia otimizado e o uso de componentes econômicos, é possível obter um sistema confiável para medir e processar variáveis críticas tais como: nível, temperatura e corrente. A metodologia contemplou as etapas de projeto, implementação e validação experimental. O sistema foi construído com Arduino Uno, sensor ultrassônico HC-SR04 (nível), sensor digital DS18B20 (temperatura) e um circuito de condicionamento de sinal 4–20 mA para medição de corrente. O protótipo foi montado em bancada, simulando um tanque de mistura com motor DC, cujo circuito tensão–corrente possibilitou relacionar a corrente de agitação à carga do processo. O controle e a visualização dos dados em tempo real foram realizados via software Processing. Nos testes, o sistema respondeu corretamente aos limites programados: nível acima de 15 cm, temperatura abaixo de 15 °C ou acima de 50 °C e corrente superior a 18 mA, acionando os alertas correspondentes. A análise quantitativa demonstrou erro máximo de 4% no sensor de nível e entre 1,2% e 1,67% nos sensores de temperatura e corrente, comprovando sua precisão e estabilidade. Conclui-se que o sistema atinge plenamente seu objetivo, oferecendo monitoramento preciso e confiável a baixo custo. Como trabalhos futuros, propõe-se reduzir a instabilidade do sensor de nível em alta agitação, integrar o sistema à computação em nuvem e aplicar técnicas de manutenção preditiva, consolidando o protótipo como uma solução prática para a Indústria 4.0.

Palavras-chaves: Instrumentação Industrial, Baixo Custo, Indústria 4.0, Arduino, Monitoramento de Processos, Sensor.

Abstract

This Final Graduation Project presents the development and validation of a Low-Cost Intelligent System for Industrial Process Monitoring, applied to the simulation of a chemical mixer. The proposal arises from the need for real-time monitoring solutions aligned with Industry 4.0 principles and accessible to small and medium-sized enterprises. The main objective was to demonstrate that, through an optimized engineering design and the use of low-cost components, it is possible to build a reliable system for measuring and processing critical process variables level, temperature, and current. The methodology comprised three stages: design, implementation, and experimental validation. The system was built using an Arduino Uno microcontroller, an HC-SR04 ultrasonic sensor (level), a DS18B20 digital sensor (temperature), and a 4–20 mA signal conditioning circuit for current measurement. The prototype was assembled on a test bench simulating a mixing tank with a DC motor, whose voltage–current converter circuit allowed correlating motor current with process load. Control logic and real-time visualization were implemented using the Processing software. Experimental tests demonstrated that the system correctly responded to predefined limits: level above 15 cm, temperature below 15 °C or above 50 °C, and current exceeding 18 mA, triggering the corresponding alerts. Quantitative analysis indicated a maximum relative error of 4.0% for the level sensor and 1.2% to 1.67% for the temperature and current sensors, confirming high precision and stability. In conclusion, the proposed system achieved its goal, providing accurate and reliable monitoring at low cost. Future improvements include reducing level sensor instability under high agitation, integrating the system into cloud computing platforms, and implementing predictive maintenance algorithms, consolidating the prototype as a practical solution for Industry 4.0 applications. .

Keywords: Industrial Instrumentation, Low-Cost, Industry 4.0, Arduino, Process Monitoring, Sensor.

Lista de ilustrações

Figura 1 –	Diagrama comparativo da Evolução da Instrumentação Industrial. .	16
Figura 2 –	Esquema do sistema de medição de nível por sensor ultrassônico. .	19
Figura 3 –	Exemplo de circuito do conversor de sinais	20
Figura 4 –	Curva característica de resistência em função da temperatura para sensor NTC	22
Figura 5 –	Fluxograma Geral da Metodologia de Desenvolvimento do Sistema de Instrumentação	29
Figura 6 –	Mapa Conceitual da Revisão Teórica	31
Figura 7 –	Diagrama Esquemático do Circuito de Condicionamento do 4-20mA 1-5V	33
Figura 8 –	Gráfico de Resposta Tensão vs Corrente	33
Figura 9 –	Fluxograma da Lógica de Programação do Microcontrolador Arduino	36
Figura 10 –	Diagrama Elétrico Simplificado de Interligação dos Sensores ao Arduino	37
Figura 11 –	Protótipo do Sistema Montado em Bancada	38
Figura 12 –	Gráfico Comparativo: Valores Simulados vs. Valores Medidos . . .	41
Figura 13 –	Gráfico de Estabilidade das Medições de Temperatura	41
Figura 14 –	Linha de Tempo do Desenvolvimento do Projeto	43
Figura 15 –	Variação de Temperatura no Processo de Mistura	49
Figura 16 –	Monitoramento do Nível do tanque	51
Figura 17 –	Curva Característica do Sensor de Corrente	52

Lista de tabelas

Tabela 1	–	Variação do pH da água pura em função da temperatura.	22
Tabela 2	–	Materiais e Componentes Utilizados na Implementação do Protótipo	34
Tabela 3	–	Dados de Monitoramento da Temperatura no Misturador	50
Tabela 4	–	Leituras do Sensor Ultrassônico de Nível	51
Tabela 5	–	Relação Tensão (Arduino) x Corrente (Motor)	53

Sumário

1	Introdução	10
1.1	Contextualização do trabalho	10
1.2	Objetivos	12
1.2.1	Objetivo Geral	12
1.2.2	Objetivos Específicos	13
1.3	Organização do Trabalho	13
2	Revisão Bibliográfica	15
2.1	Fundamentação Teórica	15
2.1.1	Importância da Instrumentação Industrial	15
2.1.2	Evolução Analógica Digital Inteligente	15
2.1.3	Indústria 4.0 e IoT Industrial	17
2.2	Sensores: Princípios de Medição e Condicionamento de Sinais	17
2.2.1	Medição de Nível por Sensor Ultrassônico HC-SR04	18
2.2.2	Medição e Transmissão de Sinais Padrão (4-20 mA e 1-5 V)	19
2.2.3	Medição de Temperatura	21
2.3	Integração dos Sensores e Aquisição de Dados	22
2.3.1	Arquitetura de Aquisição e Processamento de Dados	23
2.3.2	Comunicação e Protocolos em Sistemas Inteligentes	23
2.3.3	Calibração, Tratamento e Armazenamento dos Dados	24
2.4	Estado da Arte	25
2.4.1	Síntese dos Avanços Tecnológicos	25
2.4.2	Identificação das Lacunas e Oportunidades	26
2.4.3	Conclusão Integrada do Capítulo	27
3	Metodologia	28
3.1	Estrutura Geral da Metodologia	28
3.2	Revisão Teórica e Definição de Requisitos	29
3.3	Projeto e Simulação do Sistema de Instrumentação	31
3.4	Implementação e Montagem do Protótipo	34
3.4.1	Materiais e Componentes Utilizados	34
3.4.2	Montagem e Integração do Sistema	35
3.4.3	Procedimentos de Teste e Coleta de Dados	38
3.5	Análise dos Resultados	39
3.6	Síntese da Metodologia	42

4	Resultados	44
4.1	Introdução do Capítulo	44
4.2	Descrição da Planta Experimental	44
4.3	Configuração do Sistema e Metodologia dos Testes	45
4.3.1	Funcionamento do Sistema sem Carga	47
4.3.2	Variação do Processo	47
4.3.3	Comportamento Dinâmico	48
4.4	Resultados e Análise dos Dados	48
4.4.1	Análise das Leituras de Temperatura	48
4.4.2	Análise das Leituras de Nível	50
4.4.3	Análise das Leituras de Corrente	52
4.5	Síntese dos Resultados	53
	Referências	56

1 Introdução

1.1 Contextualização do trabalho

Desde o surgimento da Revolução Industrial, a instrumentação tem exercido um papel central na inovação tecnológica. Ela evoluiu de simples instrumentos de medição para sistemas complexos de sensoriamento e controle, tornando-se indispensável para otimizar processos produtivos e sustentar o avanço de indústrias e residências inteligentes. O marco dessa transformação foi a introdução dos chamados “sensores inteligentes”, que substituíram os modelos analógicos tradicionais ao oferecer maior precisão, melhor relação sinal-ruído, capacidade de diagnóstico e conectividade em rede [1].

Com o amadurecimento dessas tecnologias, a instrumentação industrial consolidou sistemas de controle distribuído e sensoriamento inteligente nas fábricas, estabelecendo as bases para a expansão em direção ao mundo digital. Essa transição resultou na substituição em larga escala de sistemas analógicos por sensores e atuadores controlados por microcontroladores, capazes não apenas de medir, mas também de processar dados localmente. O desenvolvimento das redes de sensores sem fio ampliou ainda mais essas possibilidades, redefinindo os limites da automação. No Brasil, por exemplo, a automação residencial tem se destacado como um mercado em crescimento, com soluções que reduzem a intervenção manual e utilizam sensores para monitorar variáveis como movimento, temperatura, umidade e luminosidade, empregando o protocolo ZigBee como meio de comunicação [2].

Após o fortalecimento das tecnologias digitais e o avanço das comunicações em rede, a instrumentação passou a desempenhar um papel ainda mais estratégico na chamada Quarta Revolução Industrial. Desse modo, sensores e sistemas de medição deixaram de atuar isoladamente e passaram a integrar ecossistemas ciberfísicos, conectados a plataformas de análise de dados, aprendizado de máquina e computação em nuvem. Essa integração possibilitou monitoramento remoto em tempo real, antecipação de falhas e otimização autônoma de operações redefinindo a automação industrial e residencial. A Indústria 4.0, portanto, se fundamenta na convergência entre automação avançada, conectividade digital e inteligência computacional, com destaque para tecnologias como IoT, Big Data, IA e sistemas ciberfísicos [3].

Antes desse avanço tecnológico a instrumentação analógica dominava o cenário industrial, com sistemas de controle baseados em controladores PID garantindo estabilidade e desempenho em processos contínuos [4]. A digitalização ainda era limitada e concentrava-se no uso de CLPs para gerenciar sequências e lógicas discretas, como sis-

temas de intertravamento e comandos convencionais [5]. Embora eficiente, esse modelo exigia cabeamento extenso e apresentava vulnerabilidade a ruídos, impulsionando o desenvolvimento de dispositivos capazes de processar dados localmente abrindo caminho para sensores digitais e redes inteligentes.

Na sequência dessa evolução, a próxima era foi marcada pelo avanço dos sensores inteligentes que passaram a incorporar funções de auto calibração e filtragem de dados na própria fonte. Essa inteligência distribuída acelerou a digitalização, facilitou a integração com arquiteturas SCADA e fortaleceu a conectividade em redes industriais. Com isso, o monitoramento remoto de plantas tornou-se mais eficiente, ampliando as possibilidades de automação e conectividade [6]. Essa base tecnológica foi fundamental para o crescimento exponencial de dados e para a necessidade de técnicas mais avançadas de análise, que caracterizam a fase atual.

Atualmente, a instrumentação moderna se estabelece como um dos pilares da Indústria 4.0 e da Internet das Coisas. Sensores conectados geram grandes volumes de dados que, ao serem processados por Inteligência Artificial, permitem ir além do simples monitoramento, viabilizando manutenção preditiva e otimizações em tempo real. "A disseminação de sensores inteligentes e sistemas conectados representa um dos principais vetores de transformação dos processos produtivos contemporâneos, permitindo maior flexibilidade operacional e tomada de decisão baseada em dados" [7].

Neste cenário de avanço acelerado dos sistemas inteligentes a pesquisa concentra esforços no desenvolvimento de soluções que integrem e otimizem processos industriais de forma eficiente. A combinação entre instrumentação moderna, IA e análise de grandes volumes de dados torna as operações mais rápidas, precisas e flexíveis, ao mesmo tempo em que aumenta a autonomia e reduz falhas. O trabalho de [8], por exemplo, integra os principais avanços ao analisar como a tríade IoT, Big Data e IA impulsiona as capacidades dinâmicas organizacionais, servindo de base teórica para novas soluções na automação contemporânea.

Considerando esse panorama de integração entre tecnologias, observa-se que a evolução da instrumentação não se limita apenas ao aprimoramento dos sensores, mas também à capacidade de conectá-los a sistemas cada vez mais inteligentes e autônomos. A combinação entre sensores distribuídos, processamento local e comunicação em rede tem permitido o desenvolvimento de soluções mais eficientes, adaptáveis e economicamente viáveis para diferentes setores produtivos. Essa mudança de modelo redefine o papel da instrumentação, que deixa de ser apenas um elemento de medição e passa a atuar como um componente estratégico dentro de arquiteturas complexas de automação e controle. A disseminação de sensores inteligentes e sistemas conectados representa um dos principais vetores de transformação dos processos produtivos contemporâneos, permitindo maior flexibilidade operacional e tomada de decisão baseada em dados [9].

Diante desse panorama de transformação tecnológica, observa-se que apesar dos avanços expressivos em instrumentação, sensoriamento inteligente e integração digital, ainda existem desafios práticos relacionados à aplicação eficiente dessas tecnologias em contextos específicos. Muitos sistemas industriais e residenciais carecem de soluções acessíveis, escaláveis e de fácil implementação capazes de aliar precisão de medição, confiabilidade e autonomia operacional.

Assim, torna-se essencial o desenvolvimento de projetos que não apenas explorem os avanços conceituais da instrumentação avançada, mas também transformem esses conceitos em aplicações práticas de baixo custo e alta confiabilidade. Assim, o presente trabalho surge como uma iniciativa voltada à implementação experimental de um sistema de instrumentação inteligente, que alia simplicidade construtiva e eficiência funcional com o objetivo de demonstrar a viabilidade do uso de sensores inteligentes e técnicas de automação em ambientes industriais e laboratoriais.

Este trabalho busca contribuir para esse cenário ao propor e desenvolver uma solução prática baseada em princípios de instrumentação inteligente e automação, com foco em um sistema de sensoriamento de nível por meio de sensor ultrassônico HC-SR04, além da medição de corrente e temperatura, para monitoramento em tempo real. Essa proposta visa demonstrar, de forma aplicada, como tecnologias consolidadas podem ser integradas de maneira eficiente para oferecer respostas mais rápidas, flexíveis e econômicas às demandas reais do setor industrial.

Além de acompanhar as tendências globais de digitalização e automação inteligente, este estudo se insere em um contexto no qual a adoção de soluções tecnológicas acessíveis e de alta eficiência se torna cada vez mais essencial para a competitividade das indústrias. A integração de sensores inteligentes com sistemas de monitoramento em tempo real permite não apenas aumentar a precisão e a confiabilidade dos processos, mas também reduzir custos operacionais e melhorar a tomada de decisão. Nesse sentido, a proposta deste trabalho busca alinhar inovação tecnológica e aplicabilidade prática, contribuindo tanto para os avanços acadêmicos na área de instrumentação industrial quanto para a criação de soluções reais que atendam às demandas das Indústrias de forma geral.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver e implementar um sistema de instrumentação inteligente voltado ao sensoriamento de variáveis industriais, capaz de realizar a medição de nível por meio de um sensor ultrassônico HC-SR04, bem como a medição de leitura de corrente e temperatura, com monitoramento em tempo real. O sistema proposto busca demonstrar, de

forma prática e aplicada, a integração entre sensores inteligentes, técnicas de automação e processamento local de dados, evidenciando a importância da instrumentação moderna na otimização de processos e na aquisição precisa de informações para apoio à tomada de decisão. Além disso, pretende-se validar a eficiência e a confiabilidade da arquitetura desenvolvida, explorando seu potencial de aplicação em contextos laboratoriais e industriais.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para o alcance do objetivo geral proposto, o trabalho envolve o projeto e a configuração do circuito de instrumentação responsável pelo sensoramento das variáveis de nível, leitura de corrente e temperatura, utilizando o microcontrolador Arduino como plataforma principal para aquisição, processamento e transmissão dos dados coletados. O sistema será implementado de modo a realizar a coleta, o tratamento e a análise preliminar das informações obtidas, integrando os sensores a um ambiente de monitoramento em tempo real. A partir dessa integração, busca-se validar experimentalmente a precisão e a eficiência do sistema desenvolvido assegurando seu desempenho sob condições operacionais reais. Por fim, pretende-se demonstrar a aplicabilidade prática da solução proposta tanto em contextos laboratoriais quanto em ambientes industriais, evidenciando seu potencial de uso como ferramenta de apoio à automação e à instrumentação inteligente.

1.3 Organização do Trabalho

O presente Trabalho de Conclusão de Curso está estruturado em cinco capítulos, organizados de forma sequencial para apresentar o desenvolvimento, a validação e a análise do Sistema Inteligente de Baixo Custo para o Monitoramento de Processos Industriais. O Capítulo 1, introdutório, estabelece o contexto do trabalho, justifica a relevância do tema no cenário da Indústria 4.0 e define os objetivos geral e específicos que guiaram a pesquisa. Em seguida, o Capítulo 2, de Revisão Bibliográfica, fornece a fundamentação teórica necessária, abordando a importância da instrumentação industrial, os conceitos de IoT Industrial e detalhando os princípios de funcionamento e condicionamento de sinais dos sensores de nível (ultrassônico), temperatura (DS18B20) e corrente (padrão 4-20 mA) utilizados no projeto.

O desenvolvimento prático do sistema é detalhado nos Capítulos 3 e 4. O Capítulo 3, Metodologia, descreve o processo de projeto, desde a modelagem e simulação dos subsistemas até a implementação física do protótipo em bancada, incluindo a seleção de componentes e a lógica de programação do microcontrolador Arduino. Por sua vez, o Capítulo 4, Resultados e Discussão, apresenta o cerne da validação experimental. Este capítulo detalha a planta experimental, a metodologia de testes (calibração, varia-

ção de processo e comportamento dinâmico) e, crucialmente, a análise quantitativa dos dados, com tabelas e gráficos que comprovam a acurácia e a eficácia da lógica de alerta do protótipo em condições simuladas de operação.

Por fim, o Capítulo 5, Conclusão, sintetiza os principais achados do trabalho, avaliando o cumprimento dos objetivos propostos e destacando a contribuição tecnológica do sistema de baixo custo para o monitoramento industrial. Este capítulo final também aponta as limitações observadas durante a fase de testes e sugere direções para trabalhos futuros, como a integração em nuvem e a otimização dos sensores, consolidando o caminho para a evolução do protótipo em uma solução comercialmente viável.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Fundamentação Teórica

A instrumentação industrial é o conjunto de técnicas e dispositivos empregados para medir, monitorar e controlar variáveis de processo, como nível, pressão, temperatura, corrente e pH, sendo fundamental para garantir a qualidade, segurança e eficiência operacional em ambientes industriais.

2.1.1 Importância da Instrumentação Industrial

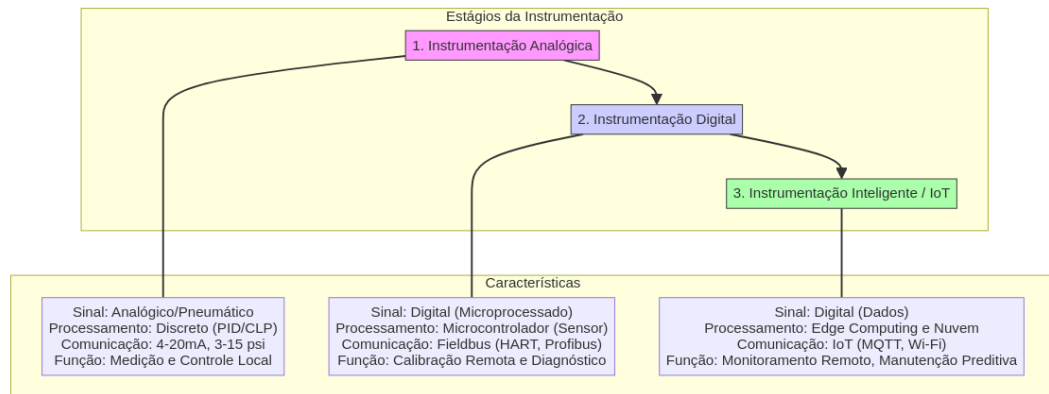
A instrumentação industrial consiste na aplicação de instrumentos e sistemas para a medição e controle de variáveis físicas e químicas que definem um processo produtivo [10]. A medição é o ato de determinar o valor de uma variável, enquanto o controle é a capacidade de manter essa variável dentro de um valor desejado conhecido como *setpoint*. A importância central da instrumentação reside em sua capacidade de otimizar a produção, reduzir custos e crucialmente garantir a segurança das operações e a qualidade do produto final [11].

O papel dos instrumentos é converter uma variável de processo em um sinal padronizado que pode ser interpretado e utilizado para fins de monitoramento ou controle. A precisão e a confiabilidade desses instrumentos são atributos críticos, pois qualquer erro na medição pode levar a desvios no controle comprometendo a eficiência e a conformidade do produto. Em essência, a instrumentação é o elo entre o processo físico e o sistema de controle, fornecendo os dados necessários para a tomada de decisão e a intervenção automatizada [12].

2.1.2 Evolução Analógica Digital Inteligente

A evolução tecnológica da instrumentação industrial pode ser demarcada em três grandes fases: a analógica, a digital e a inteligente, conforme ilustrado na Figura 1

Figura 1 – Diagrama comparativo da Evolução da Instrumentação Industrial.



Fonte: Acervo do autor

Inicialmente, os sistemas eram predominantemente analógicos, utilizando sinais pneumáticos ou elétricos (como 4-20 mA) para transmitir informações de forma contínua. O controle era realizado por controladores digitais, como Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) e controladores Proporcionais-Integrais-Derivativos (PID), que operavam com base em sinais de baixa complexidade [11].

A transição para a era digital foi marcada pela incorporação de microprocessadores aos instrumentos de campo, resultando nos chamados transmissores digitais ou sensores inteligentes. Essa transformação permitiu que os instrumentos não apenas medissem a variável primária mas também realizassem autodiagnóstico, calibração remota e comunicação bidirecional de dados. A substituição dos sinais pneumáticos por sinais eletrônicos e posteriormente por comunicação digital via *fieldbuses* (barramentos de campo) aumentou significativamente a precisão, a imunidade a ruídos e a quantidade de informações transmitidas [11].

Atualmente, a instrumentação caminha para a fase inteligente, onde o sensor deixa de ser um mero transmissor de sinal e se torna um nó autônomo na rede industrial. Equipados com maior capacidade de processamento e comunicação, esses dispositivos podem realizar análises de dados localmente e se integrar perfeitamente a sistemas de controle distribuído. A implicação dessa transformação é profunda: o instrumento de campo passa a ser uma fonte de informação estratégica, capaz de processar e comunicar dados autonomamente, elevando o nível de automação e otimização dos processos [12].

2.1.3 Indústria 4.0 e IoT Industrial

A evolução da instrumentação inteligente é um pilar fundamental para a concretização da Indústria 4.0 que representa a fusão do mundo físico com o digital. Neste novo modelo, a instrumentação atua como o sistema principal da fábrica inteligente, onde a conectividade é a característica central. Sensores e atuadores são transformados em nós conectados que utilizam a Internet das Coisas Industrial para enviar dados em tempo real para plataformas de análise e controle [13].

Essa conectividade massiva e a coleta de Big Data proveniente dos instrumentos de campo permitem a implementação de soluções avançadas como a manutenção preditiva. Em vez de realizar manutenções com base em cronogramas fixos (preventiva) ou após a falha (corretiva), os dados em tempo real sobre a condição dos equipamentos permitem prever falhas antes que ocorram, otimizando o tempo de atividade e reduzindo custos operacionais [13].

Outra aplicação estratégica é o uso de réplicas digitais inteligentes que representam virtualmente ativos físicos, processos ou sistemas. Essas representações são continuamente atualizadas por dados em tempo real coletados por sensores e dispositivos industriais, permitindo simulações, diagnósticos e otimizações com alta precisão. Essa convergência de tecnologias sistemas ciberfísicos, inteligência artificial e instrumentação avançada permite simular cenários, testar otimizações de processo e monitorar o desempenho com precisão sem precedentes, garantindo a otimização contínua da produção [13].

A Indústria 4.0, portanto, estabelece uma convergência de tecnologias onde a instrumentação não é apenas um meio de controle, mas um componente estratégico que habilita a automação distribuída, a tomada de decisão baseada em dados e a otimização contínua de todo o ciclo de vida do produto e do processo industrial [11].

2.2 Sensores: Princípios de Medição e Condicionamento de Sinais

A instrumentação industrial, em sua essência, depende da capacidade de converter uma grandeza física em um sinal elétrico que possa ser processado e interpretado por um sistema de controle. Os sensores atuam como a interface primária entre o mundo físico do processo e o domínio digital da automação, sendo classificados como transdutores por realizarem essa conversão de energia ou informação [10]. A escolha e a correta aplicação desses dispositivos são cruciais para a fidelidade e a confiabilidade de todo o sistema de controle, pois a qualidade da informação de entrada determina a eficácia das ações de controle subsequentes.

A diversidade de variáveis de processo como nível, pressão, temperatura, vazão, e pH exige o emprego de uma vasta gama de tecnologias de sensoriamento, cada uma

baseada em um princípio físico específico [12]. A seleção do sensor apropriado deve considerar não apenas a faixa de medição e a precisão requerida, mas também as condições ambientais e as características do meio, como corrosividade, viscosidade e temperatura. Assim, a compreensão dos princípios de medição e do necessário condicionamento de sinal para cada tipo de sensor é um requisito fundamental para a implementação de um sistema de instrumentação robusto e preciso.

Esta seção apresenta a fundamentação teórica dos três principais sensores empregados no projeto: nível, corrente e temperatura. Para cada um, são detalhados o princípio físico de medição, o modo de funcionamento, a necessidade de condicionamento de sinal e a inter-relação entre as variáveis, que é crucial para a precisão do sistema de controle.

2.2.1 Medição de Nível por Sensor Ultrassônico HC-SR04

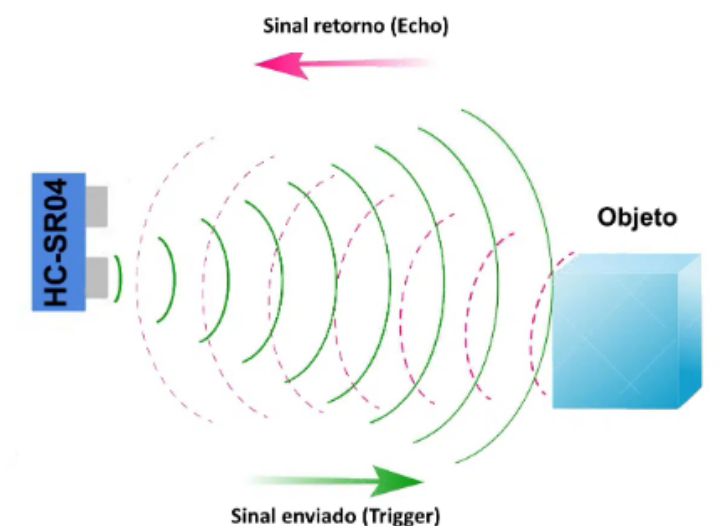
O método de medição de nível por sensor ultrassônico, utilizando dispositivos como o HC-SR04, baseia-se no princípio da ecolocalização ou tempo de voo. Este princípio estabelece que a distância entre o sensor e a superfície do líquido é diretamente proporcional ao tempo que uma onda sonora de alta frequência leva para viajar do sensor até a superfície e retornar. A relação fundamental para o cálculo da distância (D) é dada por $D = \frac{v \cdot t}{2}$, onde v é a velocidade do som no meio (geralmente ar) e t é o tempo total (ida e volta) de propagação da onda. Este princípio permite que a medição da distância, realizada a partir do topo do reservatório, seja convertida em uma leitura precisa do nível do líquido, subtraindo o valor medido da altura total do reservatório [14].

O funcionamento prático do sistema de medição ultrassônica envolve a emissão de um pulso ultrassônico (tipicamente a 40 kHz) pelo transdutor emissor (Trigger) do sensor HC-SR04, posicionado na parte superior do reservatório. O sensor aguarda o retorno (Echo) do sinal refletido pela superfície do líquido. O módulo eletrônico do sensor mede o intervalo de tempo entre o envio e o recebimento do pulso, e no exato momento em que o pulso é recebido, o tempo de voo é registrado e a distância é calculada com alta precisão, geralmente na ordem de milímetros (3 mm) [14]. Uma das principais vantagens deste método é a medição sem contato, o que o torna ideal para a monitorização de líquidos que não devem ser contaminados ou que são corrosivos, além de ser um sistema reconhecido por seu baixo custo e facilidade de integração com microcontroladores [15].

O sistema de medição ultrassônica é composto pelo sensor HC-SR04, que possui um emissor e um receptor, e um microcontrolador (como o Arduino ou ESP-32) que converte o tempo de voo em um sinal de distância padronizado. O sensor deve ser instalado verticalmente na parte superior do tanque, com sua face voltada para a superfície do líquido. Para garantir a medição precisa, o sensor deve ser posicionado o mais próximo possível do nível máximo, e a distância medida corresponde ao espaço vazio acima do líquido. Contudo, é importante notar que o HC-SR04 é sensível à umidade e a vapores, o

que pode afetar a precisão em ambientes fechados ou com alta condensação, e sua precisão pode ser comprometida por respingos e ondas na superfície do líquido [15] [14]. A Figura 2 representa o sistema de medição do sensor ultrassônico.

Figura 2 – Esquema do sistema de medição de nível por sensor ultrassônico.



Fonte: [14]

2.2.2 Medição e Transmissão de Sinais Padrão (4-20 mA e 1-5 V)

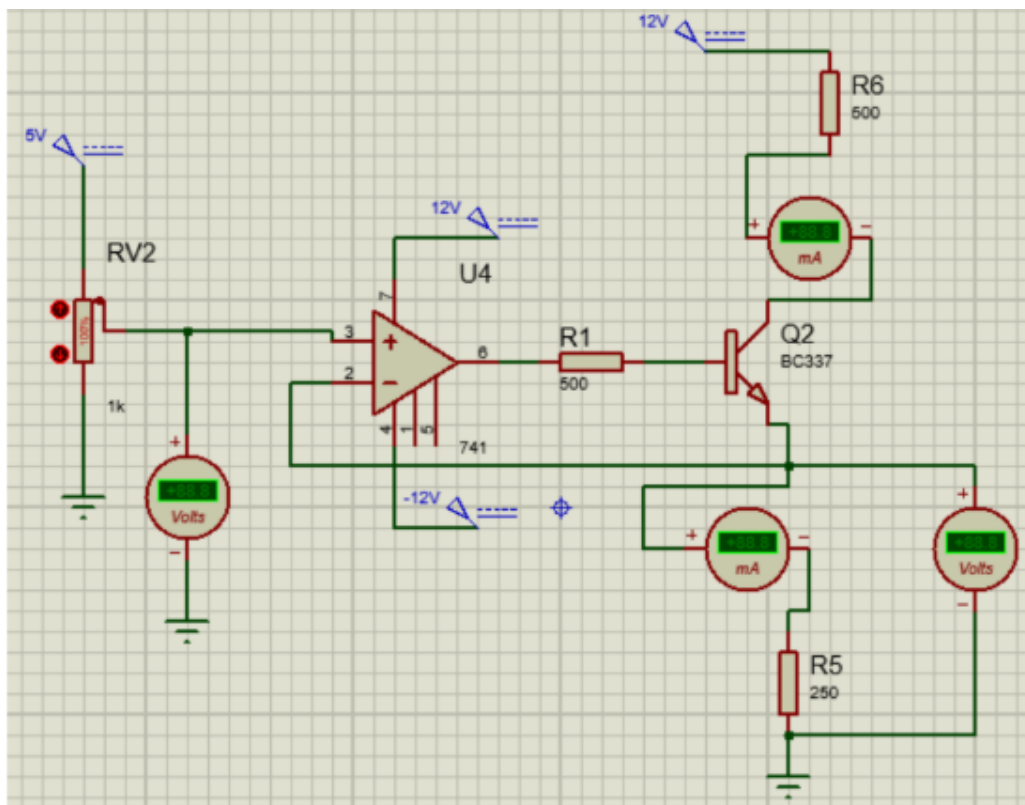
A utilização de sinais padronizados de corrente e tensão, como 4-20 mA e 1-5 V, tornou-se um dos pilares fundamentais da instrumentação e do controle industrial, garantindo compatibilidade, imunidade a ruídos e interoperabilidade entre sensores, transmissores e controladores. Esses sinais padronizados substituíram progressivamente tecnologias anteriores como sinais pneumáticos ou medições baseadas apenas em grandezas elétricas não condicionadas devido à maior robustez, precisão e capacidade de transmissão a longas distâncias [11]. O sinal de 4-20 mA, em particular consolidou-se como padrão industrial por seu melhor desempenho em ambientes ruidosos, já que a informação é carregada na forma de corrente, tornando-se menos suscetível a interferências eletromagnéticas [16]. Já a faixa de 1-5 V permanece amplamente utilizada em sistemas que requerem compatibilidade direta com módulos eletrônicos de aquisição ou condicionamento de sinal.

Nos sistemas modernos, sensores de grandezas como pressão, temperatura, deslocamento ou força podem produzir sinais brutos variados, exigindo um condicionamento de sinal antes da conversão para os padrões industriais. Esse processo envolve amplificação, filtragem, linearização e posterior conversão para corrente ou tensão padronizada. Para transmissões em 4–20 mA, o condicionamento é normalmente realizado por um módulo conversor, que converte sinais de entrada como 1–5 V, 0–5 V, 0–10 V ou mesmo 0–20 mA

para o padrão industrial de laço de corrente [17]. Além disso, o emprego de filtros RC e amplificadores operacionais com alto CMRR é essencial para minimizar efeitos de ruído, garantindo que o sinal transmitido ao sistema supervisorio represente fielmente a variável monitorada [18].

A confiabilidade da transmissão em sinais padrão depende diretamente do correto projeto do condicionamento e da mitigação de fontes de erro. Mesmo em laços de corrente que apresentam elevada imunidade a interferências, podem ocorrer distorções provenientes de não linearidades do conversor, limitações dinâmicas de amplificadores ou ruídos associados à fonte de alimentação [18]. Em conversores universais para 4-20 mA, erros de seleção de resistores, respostas transitórias e desvios nos amplificadores podem introduzir imprecisões, sendo comum que projetos industriais busquem manter erro de não linearidade abaixo de 0,1 por cento, conforme demonstrado em simulações de interfaces industriais modernas [17]. De maneira complementar, a instrumentação industrial estabelece a necessidade de considerar fatores como queda de tensão no laço, resistência dos cabos, aterramento e distúrbios eletromagnéticos, especialmente em aplicações que envolvem longas distâncias ou ambientes com elevado nível de interferências [11]. A Figura 3, representa um circuito que converte Tensões de 1-5 V em corrente de 4-20 mA.

Figura 3 – Exemplo de circuito do conversor de sinais



Fonte: [19]

Para assegurar a exatidão e a repetibilidade da transmissão em 4-20 mA e 1-5 V,

procedimentos de calibração devem ser realizados periodicamente, incluindo o ajuste dos pontos de início e fim de escala, a verificação da linearidade e a compensação de desvios térmicos ou eletrônico. A calibração também envolve a determinação precisa da relação entre o sinal elétrico padronizado e a variável física original, garantindo rastreabilidade metrológica. Em projetos avançados, a literatura destaca a importância da análise de incertezas ao longo de toda a cadeia de medição desde o sensor, passando pelo condicionamento, até a aquisição digital para assegurar desempenho adequado em sistemas de controle distribuído ou supervisão [11]. Assim, o uso de sinais padronizados permanece essencial para a integração eficiente entre dispositivos de campo, controladores industriais e sistemas de automação de maior complexidade.

2.2.3 Medição de Temperatura

A medição de temperatura é uma variável fundamental em qualquer sistema de controle de processos, não apenas para o monitoramento térmico, mas também como variável de compensação para outras medições, como o pH e o nível. Existem diversos princípios para a medição de temperatura, sendo os termistores (como NTC e PTC) e os sensores semicondutores (como LM35 e DS18B20) amplamente utilizados em aplicações industriais e de prototipagem. Termistores operam com base na variação de sua resistência elétrica em função da temperatura, enquanto os sensores semicondutores produzem um sinal de tensão ou digital que é diretamente proporcional à temperatura [20].

A importância da medição de temperatura vai além do controle térmico. No contexto de um sistema integrado a temperatura é a variável base que permite a compensação eletrônica da leitura de pH, corrigindo o desvio da resposta do eletrodo em diferentes condições térmicas. Além disso, variações de temperatura podem afetar a densidade (ρ) do líquido, o que, por sua vez, impacta a medição de nível por pressão hidrostática [21]. Portanto, os três sensores estão intrinsecamente conectados: a medição precisa da temperatura é um pré-requisito para a obtenção de leituras confiáveis de pH e nível, garantindo a homogeneidade e a precisão do sistema de monitoramento e controle.

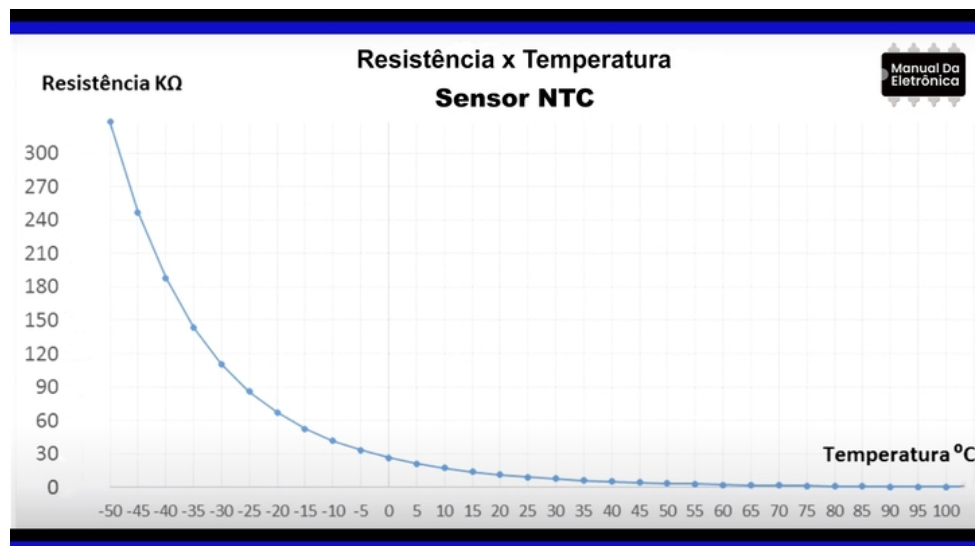
A relação entre temperatura e pH é determinada pela Equação de Nernst, que descreve a dependência da tensão de saída do eletrodo com a temperatura. A variação de temperatura afeta tanto a inclinação (slope) da curva de calibração do eletrodo quanto o próprio valor de pH da amostra, que é uma propriedade termodinâmica [22]. Por exemplo, a medição de uma solução neutra (pH 7,00 a 25 °C) em uma temperatura diferente resultará em um erro de medição se a compensação não for aplicada, conforme ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Variação do pH da água pura em função da temperatura.

Temperatura (°C)	pH da água pura
0	7,47
10	7,27
20	7,08
25	7,00
30	6,92
40	6,77
50	6,63

Fonte: [22]

Figura 4 – Curva característica de resistência em função da temperatura para sensor NTC



Fonte: [23]

A aplicação de um sensor de temperatura, como o termistor ou o DS18B20, permite que o sistema de controle calcule a correção necessária e aplique a compensação automática de temperatura, garantindo que o valor de pH reportado seja o mais preciso possível para as condições operacionais do processo.

2.3 Integração dos Sensores e Aquisição de Dados

A transição da instrumentação tradicional para sistemas inteligentes é marcada pela integração de elementos de medição, processamento e comunicação, transformando dados brutos em informações acionáveis [10]. Esta seção estabelece a ponte entre a fundamentação teórica dos sensores e a implementação prática, detalhando como os dispositivos de nível, corrente e temperatura são integrados eletrônica e logicamente para constituir um sistema coerente de aquisição e controle. O valor da instrumentação moderna reside

na capacidade de coletar, processar e transmitir dados de forma confiável, permitindo um monitoramento contínuo e a tomada de decisões em tempo real [12].

2.3.1 Arquitetura de Aquisição e Processamento de Dados

Um sistema de instrumentação moderna é, essencialmente, um sistema de aquisição de dados que deve ser capaz de capturar grandezas físicas, convertê-las em sinais digitais e processá-las de maneira eficiente [24]. A arquitetura de um sistema embarcado, como o que utiliza plataformas como o Arduino, é tipicamente modular e hierárquica. Ela se inicia nos módulos sensores, que são a primeira interface com o processo, convertendo a variável física (como leitura de tensão ou temperatura) em um sinal elétrico analógico.

O sinal analógico gerado pelo sensor é, então, direcionado aos circuitos de condicionamento, cuja função é essencial para a qualidade da medição. Esses circuitos realizam operações como amplificação, filtragem e isolamento, ajustando o sinal para a faixa de tensão aceitável pelo conversor analógico-digital (ADC) e minimizando a interferência de ruídos externos [25]. Após o condicionamento, o sinal passa pelos Conversores Analógico-Digitais, que podem ser internos ao microcontrolador ou módulos externos de alta resolução. A taxa de amostragem e a resolução do ADC são parâmetros críticos que definem a fidelidade com que o sinal analógico é representada no domínio digital [24]. Finalmente, o microcontrolador atua como o núcleo de processamento, onde os dados digitalizados são interpretados, tratados (por meio de algoritmos de filtragem e calibração) e preparados para o armazenamento ou comunicação.

A conversão analógico-digital é um ponto de atenção na arquitetura, pois o ADC determina a precisão máxima da medição. Em sistemas de instrumentação de baixo custo, como os baseados em Arduino, a resolução de 10 bits é comum, o que resulta em 1024 níveis. Para aplicações que exigem maior fidelidade, como a medição de temperatura de alta precisão, é frequentemente necessário o uso de ADCs externos de 12 ou 16 bits, que oferecem uma granularidade muito maior na representação do sinal elétrico. Essa escolha entre ADCs internos e externos é um trade-off entre custo, complexidade de hardware e a precisão exigida pela aplicação final [25].

2.3.2 Comunicação e Protocolos em Sistemas Inteligentes

A capacidade de comunicação é o que transforma um sistema de aquisição de dados em um instrumento inteligente, permitindo a transmissão de dados em tempo real para sistemas distribuídos e plataformas de monitoramento remoto [24]. No nível de hardware a comunicação entre o microcontrolador e os módulos, como sensores digitais ou módulos de rede, é frequentemente realizada por protocolos de comunicação serial de curta distância, como sensores, microcontroladores e módulos. Esses protocolos garantem a troca de dados

rápida e síncrona ou assíncrona dentro da placa de circuito.

A hierarquia de comunicação em um sistema embarcado moderno é tipicamente dividida em dois níveis: o nível de campo e o nível de supervisão. No nível de campo, a comunicação é dominada por protocolos de baixo nível, como módulos, que conectam sensores e atuadores diretamente ao microcontrolador. No nível de supervisão, a comunicação se dá através de protocolos de rede, como Wi-Fi, utilizando padrões como o MQTT para a transmissão de dados para a nuvem ou para um sistema SCADA. Essa separação garante que a comunicação crítica e em tempo real no nível de campo não seja sobrecarregada pelo tráfego de dados de monitoramento de longa distância [26].

Para a Integração com IoT, a comunicação se estende para redes de longa distância sendo o protocolo MQTT amplamente adotado em ambientes da Indústria 4.0 devido à sua leveza, eficiência e baixo consumo de banda [26]. O MQTT opera sob o modelo de publicação/assinatura, onde os sensores publicam dados em tópicos específicos, e os sistemas de monitoramento os distribuem aos assinantes. Essa arquitetura é ideal para sistemas embarcados de baixa potência, como o Arduino conectado a módulos Wi-Fi, permitindo que o sistema local se integre a plataformas em nuvem como Arduino IoT Cloud ou Google Cloud IoT Core, transformando-o em um instrumento de monitoramento remoto e preditivo.

A Indústria 4.0 e a Internet das Coisas Industrial dependem dessa conectividade ubíqua para criar Sistemas Ciberfísicos (CPS), onde os dados coletados pelos sensores são usados para construir modelos virtuais do processo, como os Digital Twins [27]. Essa convergência tecnológica permite não apenas o controle local, mas também a análise de Big Data para otimização de processos, manutenção preditiva e automação distribuída, elevando o sistema de instrumentação a um nível estratégico dentro da cadeia produtiva.

2.3.3 Calibração, Tratamento e Armazenamento dos Dados

Precisão do sistema de aquisição de dados é diretamente dependente da calibração dos sensores e do subsequente tratamento dos dados [25]. Cada sensor exige um procedimento de calibração específico: o sensor de temperatura, por exemplo, requer o ajuste da curva de resposta do termistor (ou termopar) utilizando um banho térmico de referência com temperaturas conhecidas (ex: 0°C, 50°C e 100°C). Já o sensor de nível ultrassônico (HC-SR04) necessita da correlação entre o tempo de voo do pulso sônico e a distância, ajustando a constante de velocidade do som e a distância de referência. O sensor de temperatura, além de sua calibração primária, é crucial para a compensação térmica das demais leituras, garantindo a acurácia dos dados.

O tratamento dos dados após a aquisição é uma etapa fundamental para a confiabilidade do sistema. O uso de filtros digitais, como a média móvel, é essencial para

mitigar o efeito de ruídos de alta frequência e variações espúrias no sinal, especialmente em ambientes industriais ruidosos [28]. Além disso, o tratamento pode incluir a correção de desvios, a linearização de curvas de resposta e a aplicação de médias para suavizar as leituras antes da transmissão.

Por fim, o armazenamento dos dados garante a rastreabilidade e possibilita análises históricas. Os dados podem ser salvos localmente em cartões SD, servindo como backup em caso de falha de comunicação, ou mais comumente em sistemas IoT, enviados a bancos de dados em nuvem. O armazenamento em nuvem facilita a visualização remota, a aplicação de algoritmos de análise estatística e a integração com softwares de visualização, consolidando o papel do sistema como um componente inteligente e conectado da instrumentação industrial.

2.4 Estado da Arte

2.4.1 Síntese dos Avanços Tecnológicos

A revisão bibliográfica demonstrou que a instrumentação industrial passou por uma transformação paradigmática, evoluindo de sistemas puramente mecânicos e pneumáticos para a instrumentação analógica, e, finalmente, para os atuais sistemas inteligentes de base digital [10]. Essa evolução é caracterizada pela migração de transdutores que apenas convertiam grandezas físicas em sinais padronizados para sensores que, por meio de microprocessadores embarcados, são capazes de realizar autodiagnóstico, calibração e comunicação digital, transformando-se em verdadeiros nós de informação dentro do ambiente industrial [12].

O avanço mais significativo reside na convergência entre sensores, microcontroladores e a Internet das Coisas. Sensores modernos, como o de temperatura, quando integrados a plataformas de processamento acessíveis, como o Arduino, e conectados via protocolos leves como o MQTT, transcendem a função de simples medidores. Eles se tornam componentes ativos de Sistemas Ciberfísicos (CPS), capazes de fornecer dados em tempo real para análise preditiva e otimização de processos, alinhando a instrumentação ao paradigma da Indústria 4.0 [27].

Essa integração não apenas aumenta a precisão e a confiabilidade das medições, mas também viabiliza a automação, tornando o monitoramento remoto e a aquisição de dados em tempo real acessíveis a um espectro mais amplo de aplicações, incluindo pequenas e médias indústrias e sistemas educacionais. A arquitetura de aquisição de dados, que engloba desde o condicionamento de sinal e a conversão A/D até a aplicação de filtros digitais, é a espinha dorsal que garante a fidelidade da informação do processo, permitindo que os dados brutos sejam convertidos em conhecimento acionável [24].

Em última análise, a instrumentação inteligente, ao fornecer dados de alta qualidade em tempo real, é o pilar para a otimização de processos e a tomada de decisões proativas. A capacidade de monitorar variáveis críticas de forma contínua e precisa, como nível, corrente e temperatura, não só assegura a qualidade do produto final, mas também contribui para a eficiência energética e a sustentabilidade operacional, minimizando o desperdício de recursos e maximizando a produtividade do sistema de controle.

2.4.2 Identificação das Lacunas e Oportunidades

Apesar dos avanços teóricos e da proliferação de sistemas de aquisição de dados de baixo custo, a literatura ainda apresenta lacunas que justificam a relevância deste trabalho. Uma das principais é a escassez de estudos que abordem a integração e a validação conjunta de variáveis de processo que interagem de forma complexa, como o nível medido por sensor ultrassônico, a corrente e a temperatura, em uma única plataforma de baixo custo. A maioria dos trabalhos foca em variáveis isoladas ou em sistemas de alto custo, não oferecendo uma solução integrada e acessível.

Neste contexto, o presente trabalho busca oferecer uma contribuição metodológica ao propor um modelo de integração de sensores com princípios de medição distintos. O foco não se restringe à simples medição, mas à criação de um sistema coeso onde o sensor de temperatura atua como compensador para a precisão das demais leituras, e o sensor de nível ultrassônico (HC-SR04) e o módulo de condicionamento de sinais padrão industriais (4–20 mA e 1–5 V) demonstram a interdependência e a sinergia entre as variáveis em um ambiente de instrumentação distribuída. O uso desses sinais padronizados reforça a robustez do sistema, permitindo maior imunidade a ruídos e garantindo que as grandezas medidas sejam transmitidas de forma confiável para os módulos de aquisição.

Outra oportunidade identificada é a necessidade de validação experimental contínua em protótipos que simulam ambientes industriais reais. Embora existam muitos trabalhos que proponham arquiteturas de IoT, poucos detalham a implementação prática do condicionamento de sinal e do tratamento de dados como filtragem digital, linearização e calibração necessários para garantir precisão em condições operacionais ruidosas. O desenvolvimento de um protótipo funcional permite testar a robustez do sistema de aquisição e a eficácia da conversão e transmissão em 4–20 mA ou 1–5 V, assegurando que as medições sejam representativas em um cenário prático com interferências e variações reais.

A terceira lacuna, e talvez a mais relevante para o contexto deste projeto, é a necessidade de soluções de baixo custo e alta acessibilidade. O uso de plataformas de código aberto, como o Arduino, representam uma oportunidade para desenvolver um sistema que seja replicável e acessível, atendendo à demanda por instrumentação inteligente em sistemas educacionais e pequenas plantas industriais, onde o investimento em sistemas

SCADA proprietários é inviável [26].

2.4.3 Conclusão Integrada do Capítulo

O Capítulo 2 estabeleceu a base teórica e tecnológica que sustenta o desenvolvimento do protótipo. O avanço da instrumentação está intrinsecamente ligado à capacidade de integrar sensores, comunicação digital e plataformas de processamento, culminando na criação de sistemas de monitoramento remoto e preditivo. O sistema proposto neste trabalho, que integra a medição de nível por sensor ultrassônico, corrente e temperatura em uma plataforma baseada em Arduino com comunicação IoT, representa uma aplicação direta e prática dos conceitos estudados, oferecendo uma solução de baixo custo para a monitoração de variáveis críticas. Desta forma, o desenvolvimento do protótipo se justifica como uma contribuição prática que visa preencher as lacunas identificadas, alinhando-se à tendência de instrumentação inteligente e monitoramento remoto e servindo de ponte para o próximo capítulo, que detalhará a Metodologia de implementação e validação experimental.

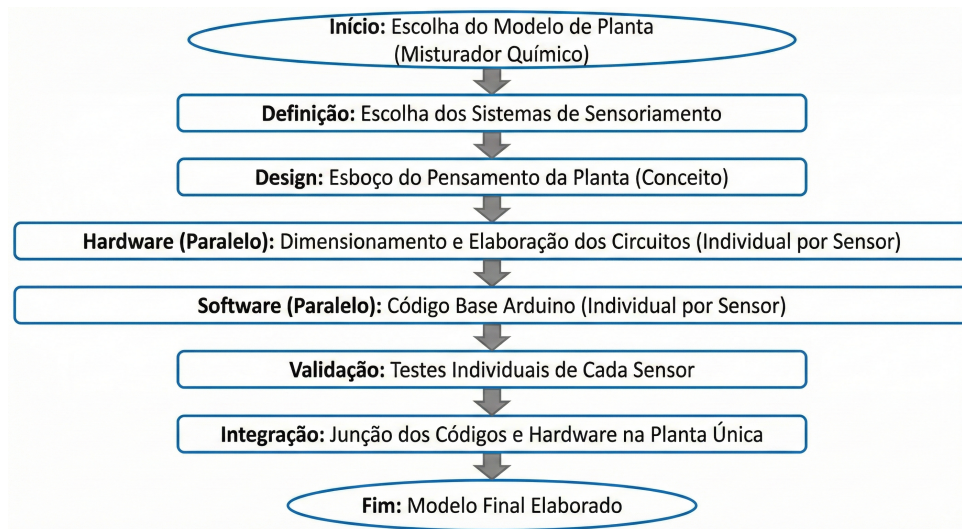
3 Metodologia

3.1 Estrutura Geral da Metodologia

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, que consistem no desenvolvimento e implementação de um sistema de instrumentação inteligente para o monitoramento de variáveis em um misturador químico, a metodologia foi estruturada em uma sequência lógica de etapas. Essa abordagem visa garantir a solidez dos fundamentos teóricos, a viabilidade técnica do projeto e a validação experimental da solução proposta. As etapas foram definidas para cobrir o ciclo completo de desenvolvimento de um sistema de instrumentação, desde a pesquisa inicial até a obtenção e análise dos dados em ambiente controlado. A estrutura adotada permite uma progressão clara, onde os resultados de uma fase alimentam e direcionam as atividades da fase subsequente, assegurando a coerência e a rastreabilidade de todo o processo de pesquisa e desenvolvimento.

A metodologia foi organizada em quatro macroetapas principais: (i) Revisão Teórica e Definição de Requisitos, que estabeleceu a base de conhecimento sobre os princípios de medição (nível por ultrassom, sinais padronizados 4-20 mA e 1-5 V e temperatura) e as tecnologias de microcontroladores; (ii) Projeto e Simulação do Sistema de Instrumentação, focada na seleção dos componentes de hardware, no dimensionamento dos circuitos de condicionamento de sinal (como o conversor de corrente para tensão para o sinal 4-20 mA) e na elaboração da arquitetura de software; (iii) Implementação e Montagem do Protótipo, que envolveu a integração física dos sensores ao microcontrolador Arduino e o desenvolvimento do código-fonte para aquisição e processamento dos dados; e (iv) Testes, Calibração e Análise dos Resultados, etapa final dedicada à validação experimental do sistema em condições operacionais, à calibração dos sensores e à avaliação da precisão e confiabilidade dos dados coletados. Essa organização metodológica é ilustrada no fluxograma a seguir, que detalha a interconexão entre as fases. A primeira fase, de Revisão Teórica, foi crucial para a correta Definição dos Requisitos do sistema, como a precisão de medição e a taxa de amostragem. A fase de Projeto traduziu esses requisitos em um diagrama de circuito e um algoritmo de controle. A Implementação materializou o projeto em um protótipo funcional. Por fim, a fase de Análise forneceu o feedback necessário para validar o desempenho do sistema e concluir o trabalho. A adoção dessa estrutura sequencial e interligada garante que o sistema de instrumentação inteligente desenvolvido atenda de forma eficaz e robusta aos objetivos propostos para o monitoramento do misturador químico.

Figura 5 – Fluxograma Geral da Metodologia de Desenvolvimento do Sistema de Instrumentação



Fonte: Acervo do autor

3.2 Revisão Teórica e Definição de Requisitos

A primeira etapa da metodologia consistiu em uma rigorosa Revisão Teórica com o objetivo de estabelecer o embasamento científico e tecnológico necessário para o desenvolvimento do sistema de instrumentação inteligente. A pesquisa bibliográfica foi conduzida em bases de dados acadêmicas de alto impacto, como o Google Acadêmico, a biblioteca digital IEEE Xplore, a plataforma SciELO e repositórios de universidades, complementada pela consulta a livros técnicos e normas regulamentadoras pertinentes à área de instrumentação e controle. Essa abordagem sistemática garantiu a coleta de informações atualizadas e de fontes confiáveis, essenciais para a tomada de decisões nas etapas subsequentes do projeto.

Os critérios de seleção das fontes foram definidos para assegurar a relevância e a contemporaneidade do referencial teórico. Foi dada prioridade a artigos científicos, teses e dissertações publicados no período de 2000 a 2025, com foco em três eixos temáticos principais: (i) Fundamentos de Instrumentação Industrial e sistemas de medição, conforme a abordagem clássica de [29]; (ii) Tecnologias de Sensores Inteligentes e sua aplicação em ambientes de Internet das Coisas Industrial, como discutido por [30]; e (iii) Plataformas de Microcontroladores de baixo custo, com ênfase no ecossistema Arduino, devido à sua aplicabilidade em prototipagem rápida e sistemas embarcados. A análise crítica desse material permitiu a compreensão aprofundada dos princípios físicos e eletrônicos que regem a medição das variáveis de interesse.

A revisão teórica foi fundamental para a correta Definição dos Requisitos do sistema, que se concentra no monitoramento de nível, corrente e temperatura em um misturador químico. O estudo detalhado dos princípios de medição de nível por ultrassom

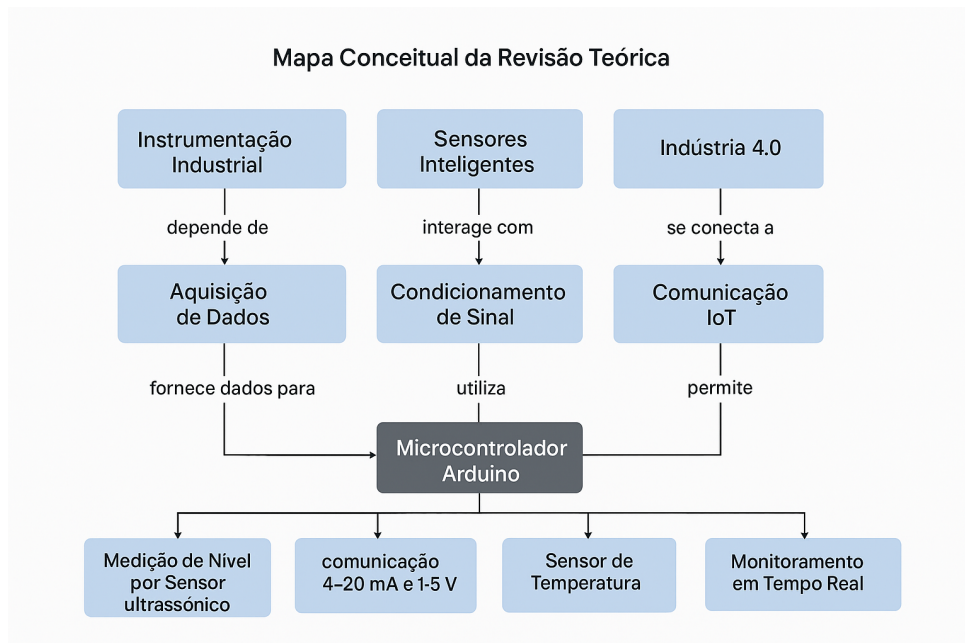
(sensor HC-SR04) permitiu a modelagem matemática da relação entre o tempo de voo do pulso sônico e a distância, crucial para a programação do microcontrolador. De forma análoga, a análise do padrão de comunicação 4-20 mA e 1-5 V e dos circuitos de condicionamento de sinal, como o conversor de corrente para tensão (I/V), foi essencial para dimensionar a interface entre o transmissor industrial e a entrada analógica do Arduino, garantindo a leitura precisa da variável de corrente.

Além dos princípios de medição, a revisão abordou a arquitetura de sistemas de aquisição de dados e o tratamento de sinais. A literatura técnica, como a de [10], forneceu o conhecimento necessário sobre a importância do condicionamento de sinal para mitigar ruídos e garantir a integridade dos dados antes da conversão analógico-digital. Essa base teórica permitiu a escolha de técnicas de filtragem digital e a definição da taxa de amostragem ideal para cada sensor, otimizando o desempenho do sistema em termos de precisão e tempo de resposta.

A partir do conhecimento consolidado, foi possível estabelecer a ligação direta entre o referencial teórico e as etapas subsequentes da metodologia. A modelagem teórica dos sensores e dos circuitos de condicionamento serviu como ponto de partida para a fase de Projeto e Simulação, onde os diagramas de circuito foram desenhados e os valores dos componentes foram calculados. Posteriormente, essa mesma base teórica orientou a fase de Implementação e Montagem do Protótipo, garantindo que a montagem física e o desenvolvimento do modelo estivessem em conformidade com as melhores práticas da engenharia de instrumentação.

Desse modo, a Revisão Teórica não se limitou a um levantamento bibliográfico, mas se configurou como uma etapa de engenharia de requisitos e modelagem conceitual. O resultado dessa fase foi um Mapa Conceitual, que visualiza a interconexão entre os temas centrais do trabalho, e um conjunto de especificações técnicas detalhadas para cada componente do sistema. Essa fundação robusta é o que permite a transição segura para as fases experimentais, garantindo que o protótipo desenvolvido seja uma aplicação prática e validada dos conceitos mais avançados da instrumentação inteligente.

Figura 6 – Mapa Conceitual da Revisão Teórica



Fonte: Acervo do autor

3.3 Projeto e Simulação do Sistema de Instrumentação

A segunda etapa da metodologia, denominada Projeto e Simulação do Sistema de Instrumentação, teve como objetivo principal a validação prévia dos princípios de funcionamento dos sensores e dos circuitos de condicionamento de sinal antes da implementação física do protótipo. A simulação computacional é uma ferramenta essencial na engenharia, pois permite prever o comportamento do sistema em diferentes condições operacionais, identificar potenciais falhas de projeto e otimizar parâmetros críticos, reduzindo custos e tempo de desenvolvimento experimental [31]. Neste contexto, a simulação serviu como uma ponte entre a modelagem teórica estabelecida na Etapa 1 e a montagem prática da Etapa 3.

Para a realização das simulações, foram utilizados ambientes de software que oferecem recursos de modelagem de circuitos eletrônicos e de microcontroladores. O software Proteus ISIS foi empregado para a validação rigorosa dos circuitos de condicionamento de sinal, como o circuito de conversão de corrente para tensão (I/V) para o padrão 4-20 mA, permitindo a análise detalhada da resposta em frequência e da linearidade do sinal. Adicionalmente, o Proteus foi utilizado para simular o microcontrolador Arduino e a lógica de programação associada aos sensores de nível (HC-SR04) e temperatura, garantindo a correta integração do firmware com o hardware virtual antes da implementação física.

O foco da simulação foi triplo, abrangendo os três subsistemas de medição: nível, corrente e temperatura. Para a medição de nível por ultrassom (HC-SR04), a simulação

validou o algoritmo de cálculo da distância, verificando a correta conversão do tempo de voo do pulso sônico em altura do fluido, conforme a equação $D = \frac{v \cdot t}{2}$. Os parâmetros simulados incluíram a variação do tempo de resposta do sensor em função da distância e a estabilidade da leitura sob diferentes taxas de amostragem. O diagrama esquemático da interligação do HC-SR04 ao Arduino foi o primeiro a ser validado, garantindo a correta emissão e recepção dos pulsos.

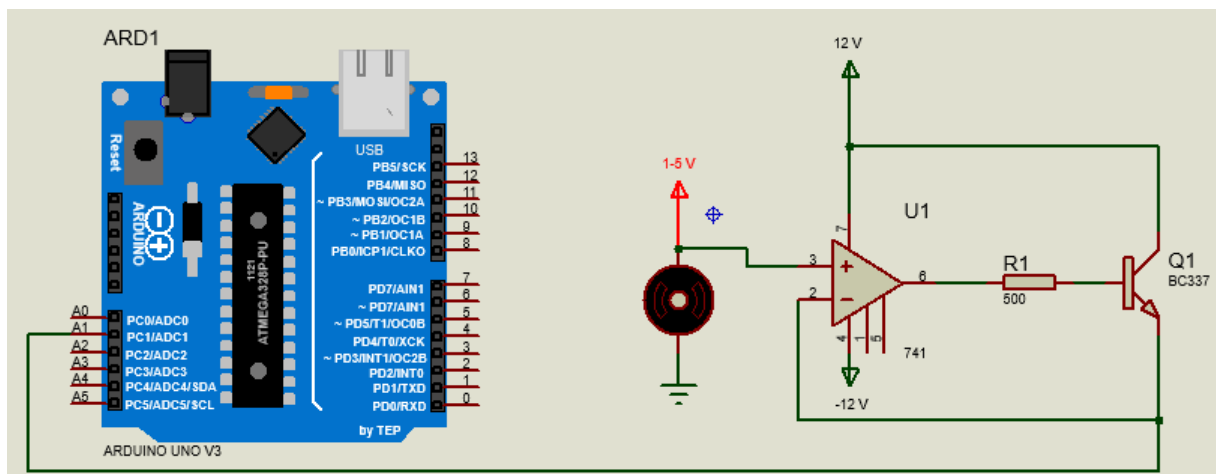
No subsistema de medição de corrente por padrão industrial (4-20 mA), a simulação foi crucial para o dimensionamento do circuito de conversão de corrente para tensão (I/V). O modelo simulado incluiu o transmissor, o resistor de shunt (para converter 4-20 mA em 1-5 V ou similar) e o circuito de ajuste de nível (para mapear o sinal para a faixa de 0V a V_{REF} do ADC do Arduino). O principal parâmetro simulado foi a tensão de saída do circuito de condicionamento em função da corrente de entrada (4-20 mA), garantindo que o sinal se mantivesse dentro da faixa de 0V a V_{REF} do conversor analógico-digital (ADC) do Arduino, evitando a saturação e maximizando a resolução.

Para o subsistema de medição de temperatura, a simulação focou na resposta do sensor (termistor ou sensor de temperatura digital) e na sua integração com o microcontrolador. O objetivo foi validar a linearização da curva de resposta do sensor, quando aplicável, e a precisão da leitura em diferentes faixas de temperatura. A simulação permitiu verificar a influência de ruídos e a eficácia de filtros digitais implementados no código, garantindo que a variação de temperatura simulada resultasse em uma leitura digital estável e precisa no microcontrolador.

Os resultados da simulação foram documentados em diagramas e relatórios de análise de circuito, servindo como referência para o dimensionamento final do protótipo físico. Por exemplo, a simulação do circuito de conversão de 4-20 mA para 1-5 V permitiu a determinação do valor ideal do resistor de shunt e a confirmação de que o sinal de tensão resultante se enquadrava perfeitamente na faixa de leitura do Conversor Analógico-Digital (ADC) do Arduino. Essa validação em ambiente virtual foi crucial para a definição do modelo de projeto e para a transição segura para a fase de implementação. A análise dos resultados simulados demonstrou uma forte correlação com o comportamento esperado teoricamente, conforme os princípios da instrumentação industrial [32]. A tensão de saída do circuito de conversão de 4-20 mA para 1-5 V, por exemplo, apresentou uma linearidade superior a 99 por cento na faixa de operação, confirmando o dimensionamento do resistor de shunt. Essa validação em ambiente virtual permitiu a correção de pequenos desvios no projeto do circuito, que poderiam introduzir erros de offset na leitura real, dando origem ao modelo do projeto em questão. A simulação também permitiu a validação da arquitetura de software. O código desenvolvido para o Arduino foi testado no ambiente virtual, verificando a correta multiplexação das leituras dos três sensores e a eficácia do algoritmo de conversão do sinal de 1-5 V para o valor da variável de processo. A capacidade de

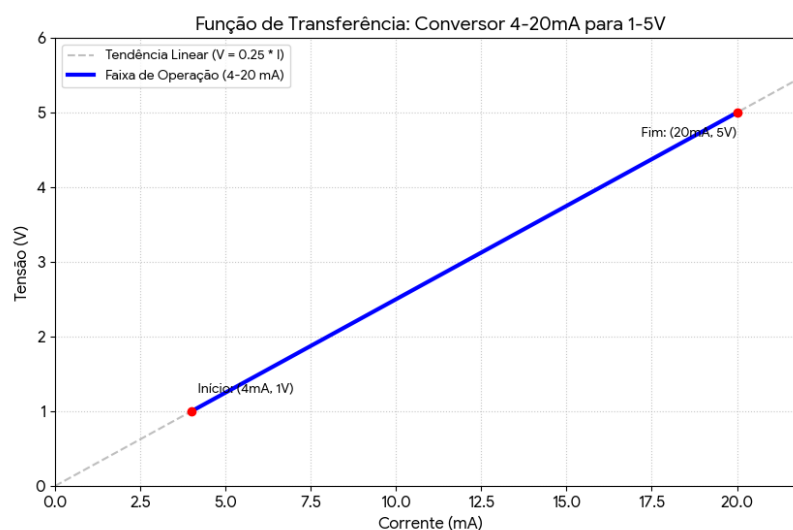
testar o código em um ambiente seguro, antes da gravação no microcontrolador, acelerou o processo de desenvolvimento e minimizou a ocorrência de erros de lógica na fase de implementação. Em resumo, a Etapa de Simulação cumpriu seu papel de mitigar riscos e consolidar o projeto. A validação do circuito de condicionamento para o padrão 4-20 mA/1-5 V, a modelagem do sensor HC-SR04 e a verificação da lógica de programação em ambiente virtual garantiram que a transição para a Implementação e Montagem do Protótipo fosse realizada com um alto grau de confiança na funcionalidade e precisão do sistema de instrumentação inteligente. O esquemático do Circuito de Condicionamento do 4-20 mA 1-5 V é ilustrado na Figura 7, e a Figura 8 apresenta o gráfico do conversor 4-20 mA para 1-5 V

Figura 7 – Diagrama Esquemático do Circuito de Condicionamento do 4-20mA 1-5V



Fonte: Elaboração própria

Figura 8 – Gráfico de Resposta Tensão vs Corrente



Fonte: Elaboração própria

3.4 Implementação e Montagem do Protótipo

A terceira etapa da metodologia, a Implementação e Montagem do Protótipo, consistiu na materialização do projeto. Esta etapa abrangeu a aquisição dos componentes, a montagem física do sistema de instrumentação e o desenvolvimento do código-fonte para o microcontrolador. O objetivo foi criar um sistema funcional capaz de realizar a aquisição, o processamento e a comunicação dos dados de nível, corrente e temperatura em tempo real, conforme os requisitos definidos na Etapa 1.

3.4.1 Materiais e Componentes Utilizados

A seleção dos materiais e componentes foi guiada pelo princípio de baixo custo e alta confiabilidade, buscando a replicabilidade e a acessibilidade da solução proposta. A Tabela 1 detalha os principais componentes utilizados, suas especificações e funções no sistema.

Tabela 2 – Materiais e Componentes Utilizados na Implementação do Protótipo

Componente	Modelo/Especificação	ção no Sistema
Microcontrolador	Arduino Uno (ATmega328P)	Plataforma principal para aquisição, processamento e controle.
Sensor de Nível	HC-SR04 (Ultrassônico)	Medição não invasiva da distância até a superfície do fluido no misturador.
Sensor de Corrente	Transmissor Saída 4-20 mA	Medição da corrente consumida pelo motor, utilizando o padrão industrial.
Sensor de Temperatura	DS18B20 (Prova d'água)	Medição da temperatura do fluido no misturador.
Condic. 4-20 mA	Shunt / Conversor I/V	Conversão do sinal de corrente (4-20 mA) para tensão (1-5 V) para leitura pelo Arduino.
Alimentação	Fonte 20 a 5V/2A	Fornecimento de energia estável para o microcontrolador e sensores.
Protótipo	Protoboard, Jumpers, etc.	Elementos de conexão e suporte para a montagem temporária do circuito.

O Arduino Uno foi escolhido como microcontrolador principal devido à sua vasta documentação, facilidade de programação e capacidade de interfacear com os sensores selecionados. O sensor HC-SR04 foi selecionado por sua precisão na medição de distância e baixo custo, sendo ideal para a aplicação de nível. O padrão de sinal 4-20 mA per-

mite a transmissão robusta da variável de corrente a longas distâncias, minimizando a perda de sinal e a interferência eletromagnética, enquanto o DS18B20 oferece medição de temperatura digital com alta precisão e resistência a ambientes úmidos.

3.4.2 Montagem e Integração do Sistema

A montagem do modelo seguiu o diagrama elétrico simplificado validado na Etapa 2. A integração dos componentes foi realizada em uma protoboard, garantindo a flexibilidade para ajustes e testes.

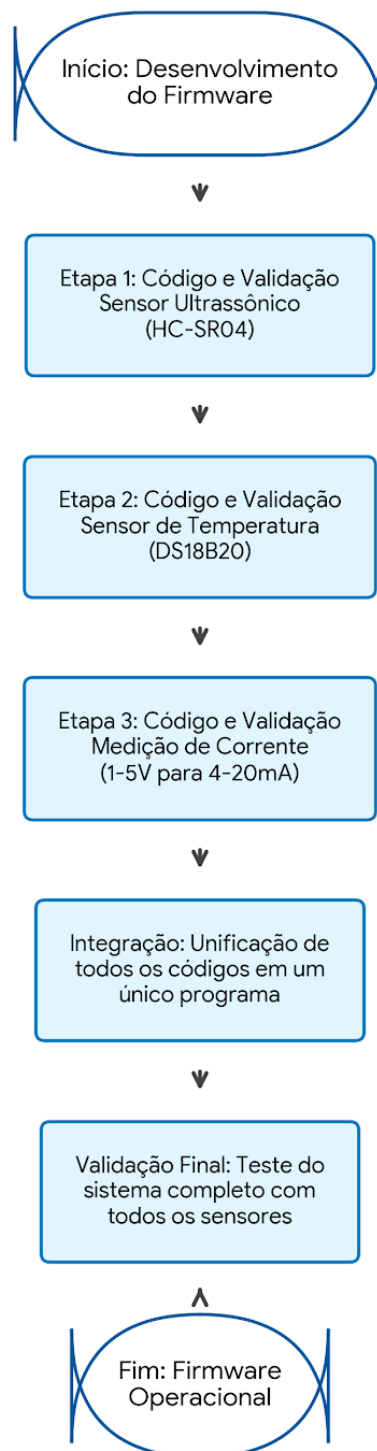
O subsistema de medição de nível (HC-SR04) foi conectado utilizando quatro pinos: VCC e GND para alimentação, Trig (gatilho) e Echo (resposta) para a comunicação com o Arduino. O sensor foi posicionado na parte superior do recipiente que simula o misturador, direcionado para a superfície do fluido.

O subsistema de medição de corrente (4-20 mA) exigiu a montagem do circuito de conversão de corrente para tensão (I/V). O transmissor de corrente foi conectado a um resistor de shunt (cujo valor foi calculado na Etapa 2) para converter o sinal de 4-20 mA em uma tensão proporcional (1-5 V). Este sinal de tensão foi então conectado diretamente à entrada analógica (A0) do microcontrolador, eliminando a necessidade de um circuito de polarização (bias circuit), uma vez que o sinal de 1-5 V já se encontra na faixa de leitura do Arduino (0-5 V).

O sensor de temperatura (DS18B20) foi conectado a um pino digital (D2) do Arduino, utilizando o protocolo de comunicação OneWire. Sua natureza digital simplificou a integração, eliminando a necessidade de circuitos de condicionamento analógico complexos.

A lógica de programação do Arduino foi desenvolvida na IDE do Arduino, utilizando a linguagem C/C++. O código foi estruturado para executar as seguintes funções em um loop contínuo: (i) Aquisição de Dados dos três sensores; (ii) Processamento e Tratamento dos sinais (cálculo da distância, conversão do sinal de 4-20 mA para o valor da variável de processo, conversão da temperatura); (iii) Comunicação dos dados processados. Podemos ver essa descrição representada na figura 9.

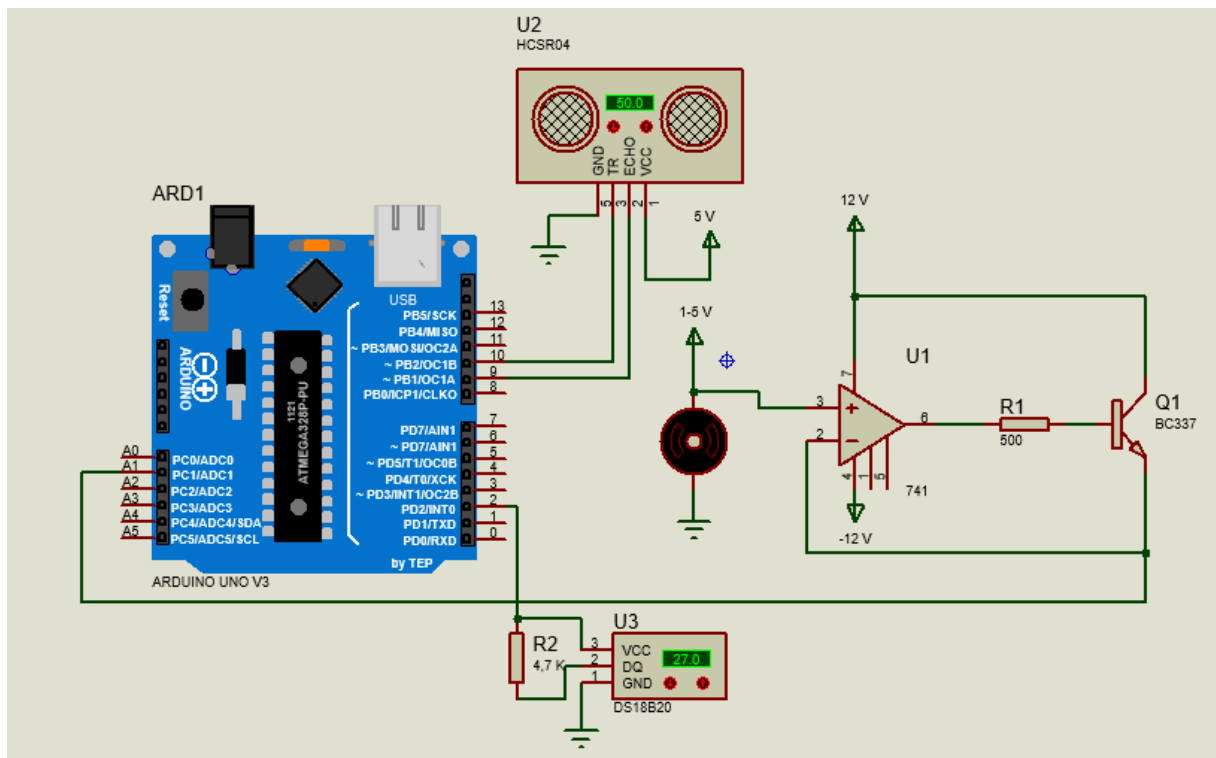
Figura 9 – Fluxograma da Lógica de Programação do Microcontrolador Arduino



Fonte: Elaboração própria

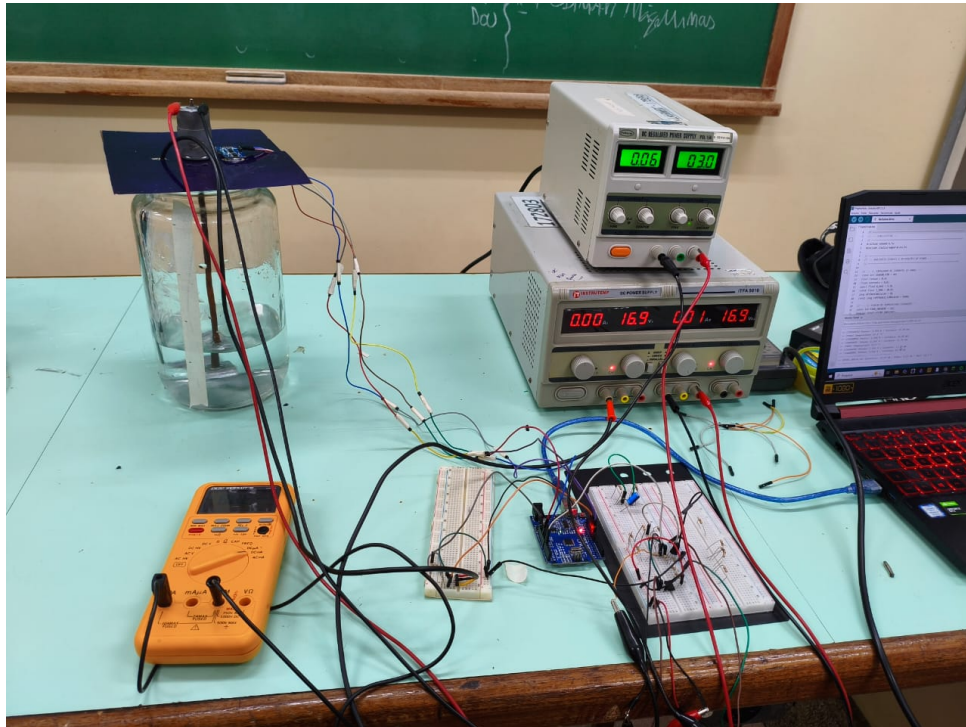
O fluxo de comunicação seguiu o padrão: Aquisição (sensores) → Processamento (Arduino) → Exibição/Armazenamento (Serial Monitor e/ou datalogger). O algoritmo de processamento incluiu a aplicação de uma média móvel sobre as leituras de nível e do sinal de 4-20 mA para mitigar ruídos e flutuações momentâneas, aumentando a estabilidade e a confiabilidade dos dados. A conversão do sinal de 4-20 mA para o valor real da variável de processo foi implementada através de uma rotina que mapeia o valor lido pelo ADC (0-1023) para a faixa de engenharia correspondente (ex: 0-100 por cento ou 0-10 Amperes), utilizando a equação da reta. A representação da interligação dos sensores junto ao Arduino está representada na figura 10, e a figura 11 representa o protótipo montado do sistema.

Figura 10 – Diagrama Elétrico Simplificado de Interligação dos Sensores ao Arduino



Fonte: Elaboração própria

Figura 11 – Protótipo do Sistema Montado em Bancada



Fonte: Acervo do autor

3.4.3 Procedimentos de Teste e Coleta de Dados

Os testes experimentais foram conduzidos em um ambiente de bancada de laboratório, utilizando um recipiente de dimensões conhecidas para simular o misturador químico. O ambiente controlado minimizou a interferência de fatores externos, como variações de temperatura ambiente e ruídos eletromagnéticos, permitindo uma avaliação precisa do desempenho do protótipo.

O procedimento de calibração foi realizado individualmente para cada sensor. Para o sensor de nível (HC-SR04), a calibração envolveu a medição da distância em pontos conhecidos (ex: 5 cm, 15 cm, 20 cm, 30 cm) utilizando uma régua de referência (padrão) e o ajuste da constante de velocidade do som no código para corrigir o desvio de leitura. Para o sensor de corrente (4-20 mA), a calibração foi realizada utilizando um calibrador de processo (padrão) para injetar correntes conhecidas (ex: 4 mA, 12 mA e 20 mA) e verificar a linearidade da leitura do Arduino, ajustando a constante de conversão (mA/ADC) do sistema. O sensor de temperatura (DS18B20), por ser digital e pré-calibrado de fábrica, teve sua leitura validada por comparação temperatura ambiente.

A coleta de dados foi realizada em três cenários distintos: (i) Variação de Nível (enchimento e esvaziamento do recipiente); (ii) Variação de Corrente (simulando diferentes níveis de sinal no padrão 4-20 mA); e (iii) Variação de Temperatura (aquecimento controlado do fluido). Para cada cenário, foram realizadas várias medições em intervalos

distintos de tempo, totalizando uma quantidade considerável de amostras por variável. Os dados brutos (leituras do ADC e valores convertidos) foram transmitidos via porta serial do Arduino e armazenados para posterior análise comparativa.

O armazenamento permitiu a organização dos dados em colunas (Tempo, Nível Medido, Nível Padrão, Corrente (4-20 mA) Medida, Corrente (4-20 mA) Padrão, Temperatura Medida, Temperatura Padrão), facilitando o cálculo do erro e a análise de desempenho na Etapa 4. A metodologia de coleta de dados em cenários controlados e a utilização de padrões de referência garantiram a validade e a rastreabilidade dos resultados experimentais obtidos.

A análise dos dados coletados foi pautada na comparação direta dos valores medidos pelo protótipo com os valores de referência (padrão) e com as especificações de precisão fornecidas nos datasheets de cada sensor. O objetivo principal foi verificar se as leituras se mantinham dentro da faixa de erro nominal esperada para cada componente. Para as medições de nível e do sinal 4-20 mA, a validação se concentrou em confirmar a conformidade da resposta com a curva de calibração teórica. Essa abordagem simples e direta foi suficiente para atestar a funcionalidade básica e a adequação dos sensores para o monitoramento do misturador químico. Para garantir a confiabilidade dos resultados, foi realizada uma análise visual da estabilidade das medições ao longo do tempo. Esta análise buscou identificar flutuações ou desvios inesperados que pudessem indicar a presença de ruídos ou falhas na aquisição. A eficácia do tratamento de sinal implementado no firmware do Arduino, como a aplicação da média móvel, foi confirmada pela estabilidade visual das leituras. A comparação com os limites de erro do datasheet permitiu concluir que o sistema de instrumentação, incluindo o condicionamento do sinal 4-20 mA, estava operando dentro dos parâmetros aceitáveis para a aplicação.

Em conclusão, a Etapa 3 não se limitou à montagem e à coleta de dados, mas estabeleceu a base empírica para a Análise dos Resultados (Etapa 4). Os dados rastreáveis, coletados em condições controladas e submetidos a um processo de calibração e validação por comparação com padrões, representam a evidência experimental necessária para validar o objetivo geral do trabalho. A transição para a Etapa 4 será marcada pela apresentação detalhada desses resultados, seguida pela discussão de sua relevância e implicações para o monitoramento de processos industriais.

3.5 Análise dos Resultados

A etapa final da metodologia, a Análise dos Resultados, teve como propósito avaliar o desempenho do protótipo desenvolvido, confrontando os dados experimentais coletados na Etapa 3 com os valores de referência e com os requisitos de precisão e funcionalidade definidos na Etapa 1. Esta análise é crucial para validar a hipótese central do trabalho e

quantificar a eficácia do sistema de instrumentação inteligente de baixo custo. Os critérios de análise foram estabelecidos com base em padrões metrológicos, focando na precisão, acurácia, estabilidade e resposta temporal do sistema, conforme a abordagem clássica da avaliação de sistemas de medição [29].

A precisão e a acurácia foram avaliadas através da comparação direta dos valores medidos pelo protótipo com os valores de referência (padrão) para cada variável (nível, corrente 4-20 mA e temperatura). A estabilidade foi verificada pela observação visual da dispersão das medições ao longo do tempo em condições operacionais constantes. A resposta temporal foi analisada pela capacidade do sistema de acompanhar variações rápidas nas variáveis de processo, como o enchimento ou esvaziamento do recipiente. A Figura 12 ilustrará graficamente a comparação direta entre os valores medidos pelo protótipo e os valores esperados (padrão) para os três cenários de teste, permitindo uma visualização imediata da acurácia do sistema. Um aspecto fundamental da análise foi a validação funcional dos circuitos de condicionamento. A verificação do desempenho real do protótipo serviu para confirmar o dimensionamento do circuito de conversão de 4-20 mA para 1-5 V. No presente trabalho, a proximidade entre os valores medidos e os valores de referência confirmou a eficácia do dimensionamento do resistor de shunt e do circuito de conversão, garantindo que o sinal de corrente fosse corretamente mapeado para a faixa de leitura do ADC do Arduino. Artigos nacionais sobre análise comparativa entre simulação e protótipo real demonstram que uma alta correlação valida o processo de projeto e otimização [33].

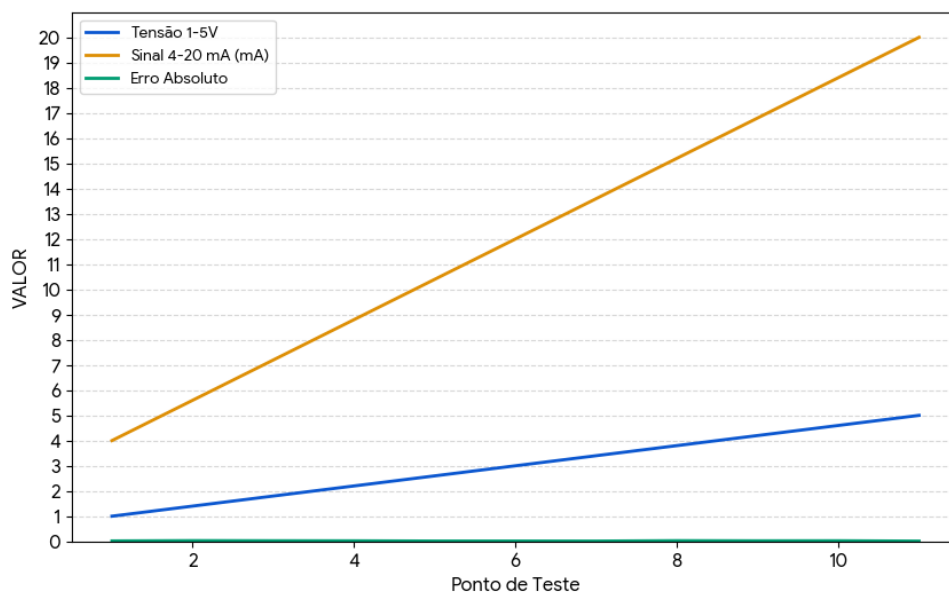
A confiabilidade e a reprodutibilidade do sistema foram avaliadas pela repetição dos testes em diferentes momentos e pela consistência dos resultados obtidos. A reprodutibilidade, que é a capacidade de obter resultados semelhantes sob as mesmas condições, mas com diferentes operadores ou equipamentos de teste, foi confirmada pela baixa dispersão dos dados em múltiplos ciclos de medição. A Figura 13 apresentará um gráfico de estabilidade, demonstrando a variação das leituras de temperatura ao longo de um período estendido, evidenciando a robustez do sensor de temperatura DS18B20 e a eficácia do algoritmo de filtragem implementado.

Apesar dos resultados positivos, a análise também identificou limitações e fontes de erro no protótipo. A principal limitação observada foi a suscetibilidade do sensor HC-SR04 a ruídos acústicos e a variações na velocidade do som devido a mudanças na temperatura e umidade do ar acima do fluido. Além disso, a interferência eletromagnética gerada pelo motor do misturador introduziu pequenos ruídos na medição de corrente, apesar da blindagem e da filtragem. Tais incertezas e a avaliação de precisão de sensores são temas recorrentes na literatura técnica [33], e a discussão dessas limitações é essencial para a transparência científica.

Em conclusão, a análise funcional e comparativa dos resultados experimentais de-

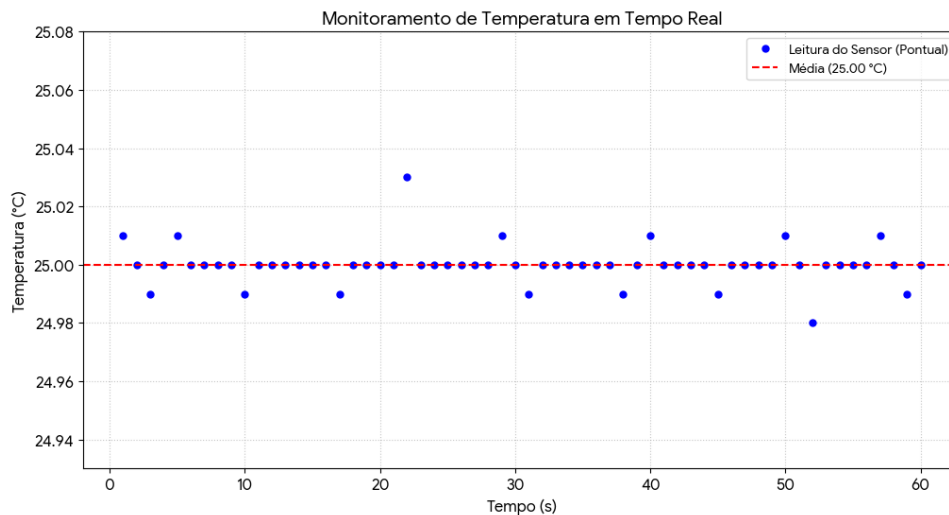
monstrou que o sistema de instrumentação inteligente de baixo custo atendeu aos objetivos propostos, apresentando níveis de precisão e estabilidade adequados para o monitoramento de processos industriais. A viabilidade do sistema foi confirmada pela capacidade de integrar diferentes tecnologias de sensoriamento (ultrassom, padrão 4-20 mA e digital) em uma única plataforma (Arduino), fornecendo dados confiáveis e rastreáveis. As limitações identificadas servem como base para propostas de melhoria futuras, como a implementação de filtros mais robustos e a adoção de algoritmos de compensação das interferências para o sensor ultrassônico, consolidando o trabalho como uma contribuição prática e cientificamente validada para a área de instrumentação.

Figura 12 – Gráfico Comparativo: Valores Simulados vs. Valores Medidos



Fonte: Elaboração própria

Figura 13 – Gráfico de Estabilidade das Medições de Temperatura



Fonte: Elaboração própria

3.6 Síntese da Metodologia

A metodologia adotada para o desenvolvimento do sistema de instrumentação inteligente permitiu uma abordagem sistemática e rigorosa, essencial para a engenharia de sistemas complexos. Conforme preconizado por [34], a estruturação do projeto em etapas interdependentes Revisão Teórica, Projeto e Simulação, Implementação e Testes, e Análise dos Resultados assegurou que cada fase fosse construída sobre uma base sólida, validando premissas e otimizando o processo de desenvolvimento. Essa organização metodológica não apenas facilitou a gestão do projeto, mas também garantiu a coerência e a rastreabilidade das decisões tomadas, desde a seleção dos sensores de baixo custo até a aplicação dos algoritmos de processamento de sinal no microcontrolador Arduino.

As quatro etapas demonstraram ser complementares, estabelecendo uma forte ligação entre o modelo teórico e o comportamento observado no protótipo físico. A fase de Revisão Teórica forneceu o embasamento científico para a modelagem dos princípios de medição (ultrassom, padrão 4-20 mA e temperatura), enquanto a Simulação permitiu a validação prévia do dimensionamento dos circuitos de condicionamento, mitigando riscos e reduzindo a necessidade de iterações excessivas na fase de hardware. A Implementação materializou o projeto, e a fase de Análise fechou o ciclo, fornecendo o feedback experimental necessário para quantificar a precisão e a confiabilidade do sistema, confirmando a viabilidade da solução proposta.

Em última análise, a metodologia empregada, que pode ser visualizada em sua totalidade na linha de tempo apresentada na Figura 14, reflete as melhores práticas da Engenharia Elétrica aplicada ao desenvolvimento de sistemas de instrumentação e controle [35]. A adoção de um processo estruturado, que transita da abstração teórica para a validação empírica, permitiu o desenvolvimento de um protótipo funcional e robusto. O sucesso na integração dos sensores e na obtenção de dados confiáveis valida a escolha dos componentes de baixo custo e a arquitetura de software implementada, consolidando o trabalho como uma contribuição prática e metodologicamente sólida para a área de monitoramento de processos industriais.

Figura 14 – Linha de Tempo do Desenvolvimento do Projeto



Fonte: Elaboração própria

4 Resultados

4.1 Introdução do Capítulo

O presente capítulo tem como finalidade apresentar e discutir os resultados obtidos na implementação e montagem do protótipo. O objetivo central desta fase prática foi a validação experimental do sistema de instrumentação inteligente de baixo custo, desenvolvido para o monitoramento de variáveis em um misturador químico. Esta validação é o ponto culminante do trabalho, onde a teoria e a prática são confrontadas com o desempenho real do hardware e software em um ambiente de bancada, simulando condições operacionais.

A seção de resultados está estruturada para fornecer uma visão clara e detalhada da transição do projeto para a realidade experimental. Inicialmente, será apresentada a Planta Experimental, detalhando a bancada de testes e os equipamentos utilizados. Em seguida, será descrita a Configuração do Sistema e a Metodologia dos Testes, que inclui os procedimentos de calibração e a sequência de testes aplicados. Por fim, a seção de Apresentação e Análise dos Resultados trará os dados coletados e a discussão sobre a precisão, estabilidade e funcionalidade do protótipo.

4.2 Descrição da Planta Experimental

A validação do sistema será demonstrada através da análise da acurácia e da confiabilidade das medições de nível (sensor ultrassônico HC-SR04), corrente (padrão 4-20 mA) e temperatura (sensor DS18B20). O foco da análise recairá sobre a capacidade do sistema de adquirir, processar e transmitir dados de forma estável, mesmo sob variações controladas das variáveis de processo. A demonstração dos testes realizados na bancada é crucial para comprovar a eficácia dos circuitos de condicionamento de sinal e dos algoritmos de processamento implementados no microcontrolador Arduino.

Em última análise, os resultados experimentais serão comparados diretamente com os objetivos propostos no início do trabalho, especialmente no que tange à viabilidade de um sistema de instrumentação de baixo custo para monitoramento industrial. A discussão final avaliará o desempenho geral do protótipo, destacando os pontos fortes, as limitações observadas durante os testes e as implicações práticas dos dados obtidos para o monitoramento de processos, consolidando a contribuição tecnológica e metodológica do presente trabalho.

A validação experimental do sistema de instrumentação inteligente foi conduzida

em uma bancada de laboratório projetada para simular as condições de um misturador químico industrial, conforme detalhado na Metodologia. A planta experimental foi montada com o objetivo de criar um ambiente controlado onde as variáveis de processo (nível, corrente e temperatura) pudessem ser manipuladas e monitoradas simultaneamente, permitindo a avaliação da funcionalidade e da precisão do protótipo.

A parte fundamental da planta experimental é o Recipiente de Vidro, que simula o tanque de processo. Este recipiente é o ponto onde o fluido (água) é contido e onde as medições são realizadas. O processo de mistura é simulado por um Motor DC de 12V, acoplado a um eixo e hélice, que é alimentado por uma Fonte para Alimentação do Motor (0-18V). A variação da tensão de alimentação do motor permite simular diferentes regimes de agitação e, conseqüentemente, diferentes níveis de consumo de corrente, que é a variável de interesse para o monitoramento.

A instrumentação da bancada é composta pelos seguintes elementos principais:

Sensores de Processo: O sistema utiliza o Sensor Ultrassônico HC-SR04 para a medição de nível e o Sensor de Temperatura DS18B20 (digital, à prova d'água) para a medição da temperatura do fluido. O subsistema de corrente é composto pelo circuito de condicionamento 4-20 mA, que utiliza o CI 741 (Amplificador Operacional) e o BC337 (Transistor) em conjunto com resistores para realizar a conversão e o loop de corrente.

Alimentação e Medição: A bancada é alimentada por uma Fonte Simétrica de 0-25V, utilizada para fornecer energia ao circuito de condicionamento e ao microcontrolador. As medições de referência são realizadas por um Multímetro de precisão, utilizado para verificar as tensões e correntes nos pontos críticos do circuito e validar as leituras do protótipo.

Controle e Interface: O Arduino Uno é o microcontrolador responsável pela aquisição e processamento dos dados. A interface com o usuário e a visualização dos dados em tempo real são realizadas através de um Notebook, que executa o *software* Processing para a tela de monitoramento e é utilizado para a implementação e upload do código.

Componentes Auxiliares A manipulação da variável de temperatura é realizada com o uso de Água Gelada e Água Quente, permitindo a simulação de variações térmicas no processo. A montagem do circuito é feita em uma Protoboard, utilizando cabos jumpers e resistores para o correto interligamento dos componentes.

4.3 Configuração do Sistema e Metodologia dos Testes

A montagem do sistema foi realizada de forma sequencial, seguindo uma ordem lógica para garantir o correto funcionamento de todos os componentes. Inicialmente, foi

preparado o recipiente que simula o tanque do processo. Na parte superior desse recipiente, foi acoplado o sensor de nível ultrassônico HC-SR04. Na mesma estrutura, também foi fixado o motor, juntamente com seu eixo e pá, por meio de uma placa que serviu como base de sustentação. O sensor de temperatura foi instalado lateralmente no recipiente, em contato direto com a superfície, de modo a permitir uma medição eficiente da temperatura do líquido.

Para possibilitar a ligação do motor ao sistema de instrumentação 4–20 mA cujo circuito foi montado em uma protoboard foram confeccionados jumpers alongados, garantindo assim o alcance adequado das conexões. O sensor de temperatura também foi conectado ao circuito montado na protoboard. Em seguida, todos os sensores foram integrados ao Arduino: o sensor HC-SR04 foi ligado diretamente aos pinos digitais, enquanto o sensor 4–20 mA e o sensor de temperatura foram conectados à interface de leitura analógica. A fonte simétrica foi conectada ao circuito lógico do sistema 4–20 mA, e uma fonte de alimentação dedicada de 12 V foi utilizada para energizar o motor. Após todas as conexões, o Arduino foi conectado ao notebook, permitindo a execução do código e a visualização didática dos dados no software Processing.

O processo de calibração seguiu uma metodologia própria para cada sensor. A calibração do sensor de nível HC-SR04 teve início com a definição da altura interna do recipiente, uma vez que o sensor seria posicionado no topo e deveria medir a distância vertical até o nível da água. Utilizando uma régua de 30 cm, foram realizadas marcações conhecidas em 5 cm, 10 cm, 15 cm e 20 cm. A partir dessas referências, foi possível comparar as leituras reais com as distâncias medidas pelo sensor, ajustando o sistema e garantindo sua precisão.

Para a calibração do sensor 4–20 mA, inicialmente foi estabelecida a relação entre corrente (4–20 mA) e tensão (1–5 V), necessária porque o motor, neste caso, era controlado por tensão. Foram definidos como parâmetros os valores de 1,5 V, 3 V e 4,5 V. A partir dessas tensões, foi possível calcular a corrente equivalente por meio de proporção direta, além de realizar a leitura utilizando um amperímetro digital. Dessa forma, confirmou-se que o sensor estava operando adequadamente e respondendo de maneira consistente às variações impostas.

Já o sensor de temperatura, calibrado de fábrica, não exigiu ajustes prévios. Ainda assim, foram estabelecidos limites de operação coerentes com o ambiente experimental, escolhendo-se como referências as temperaturas de 15 °C, 25 °C e 50 °C, utilizadas posteriormente para fins de validação do comportamento do sistema.

O procedimento para variação das condições de processo incluiu testes de nível, agitação, tensão e corrente. Para a variação de nível, inicialmente adicionou-se água no recipiente até valores inferiores à marca de 5 cm; em seguida, o nível foi ajustado entre 5 e 10 cm, depois entre 10 e 15 cm e, por fim, acima de 15 cm. Em todas as etapas, o sensor

HC-SR04 apresentou leituras coerentes com as marcações reais, refletindo corretamente os valores no software Processing, que inclusive emitia alertas automáticos quando o nível ultrapassava 15 cm.

A variação de tensão foi realizada por meio da fonte de alimentação, que permitia visualizar diretamente o valor aplicado ao motor. A tensão convertia-se proporcionalmente em corrente no circuito 4–20 mA, permitindo observar, nas leituras, as alterações do sinal em função da variação imposta. Assim, tanto a condição do motor quanto o comportamento do sensor puderam ser avaliados de maneira clara e precisa ao longo dos testes.

4.3.1 Funcionamento do Sistema sem Carga

O primeiro teste realizado foi o Teste de Funcionamento sem Carga, que consistiu em ligar o sistema com o recipiente vazio. O objetivo primordial deste teste foi a validação inicial do sistema, verificando se todos os subsistemas estavam operando corretamente e de acordo com o esperado antes da introdução do fluido de processo. O procedimento envolveu a observação das leituras de cada sensor na ausência de água. Para o subsistema de nível, o sensor ultrassônico HC-SR04 não apresentou valores de nível, o que era o comportamento esperado, uma vez que não havia fluido para ser medido. Para o subsistema de corrente, o motor foi ligado e a tensão variada, permitindo verificar que as leituras de corrente, conforme a variação da tensão de alimentação, estavam em pleno funcionamento. Já o sensor de temperatura DS18B20, na ausência do líquido de processo, apresentou a leitura da temperatura ambiente. Em suma, este teste foi essencial para confirmar a integridade e a funcionalidade básica de cada componente e a coerência das leituras do sistema antes de prosseguir para os testes com carga.

4.3.2 Variação do Processo

O Teste de Variação do Processo simulou diferentes condições operacionais, forçando cada variável monitorada a operar fora de sua faixa ideal para validar a lógica de segurança e alerta do sistema. O projeto estabeleceu limites de segurança claros para cada subsistema, e o protótipo demonstrou variações de resposta coerentes com essas especificações:

Variação de Nível: O nível do tanque foi simulado em quatro condições distintas: abaixo do limite mínimo de 5 cm; entre 5 cm e 15 cm (faixa ideal); acima de 15 cm, onde o sistema emitia um alerta de risco; e acima de 20 cm, condição extrema que sinalizava risco iminente de transbordamento.

Variação de Temperatura: O sensor de temperatura DS18B20 foi testado dentro de limites de segurança de 15°C (mínimo) e 50°C (máximo). Quando a temperatura

ultrapassava o limite máximo, o sistema emitia um alerta de perigo. De forma análoga, quando a temperatura caía abaixo do limite mínimo, um indicador de temperatura baixa era apresentado.

Variação de Corrente (4-20 mA): O subsistema de corrente operou dentro dos limites de tensão de 1,5V a 4,5V, com a condição ideal em 3V. Quando a tensão ultrapassava 4,5V, o sistema emitia um alerta de instabilidade e sobrecarga. Abaixo de 1,5V, o motor não iniciava o movimento.

Em resumo, a resposta observada nos instrumentos para cada variação de processo confirmou que o sistema é capaz de emitir um aviso imediato sempre que qualquer sensor opera fora de seus limites de segurança predefinidos, garantindo a conformidade e a segurança do processo.

4.3.3 Comportamento Dinâmico

Com o sistema em pleno funcionamento, foi possível observar o comportamento dinâmico do protótipo em tempo real. A estabilidade do sistema foi verificada principalmente nas situações em que todos os parâmetros operavam dentro de seus limites ideais: nível entre 5 cm e 15 cm, tensão do motor entre 1,5V e 4,5V, e temperatura entre 15°C e 50°C (com o ponto ideal em 25°C, 10 cm e 3V/12 mA). Observou-se que o fator que mais influenciou a distorção dinâmica foi a agitação do fluido. Nos momentos em que o motor trabalhou em tensões superiores a 4,5V, a turbulência gerada pelas pás afetou diretamente a superfície do líquido. Consequentemente, a leitura de nível sofreu variações mais significativas, indicando a sensibilidade do sensor ultrassônico HC-SR04 à instabilidade da superfície. De forma similar, a dinâmica do sistema estava sujeita a maiores variações quando o nível estava acima de 15 cm, devido à menor margem de segurança e à maior probabilidade de respingos. A capacidade do sistema de registrar e exibir essas variações em tempo real, com baixo atraso (delay), valida a arquitetura de aquisição de dados e a comunicação serial.

4.4 Resultados e Análise dos Dados

4.4.1 Análise das Leituras de Temperatura

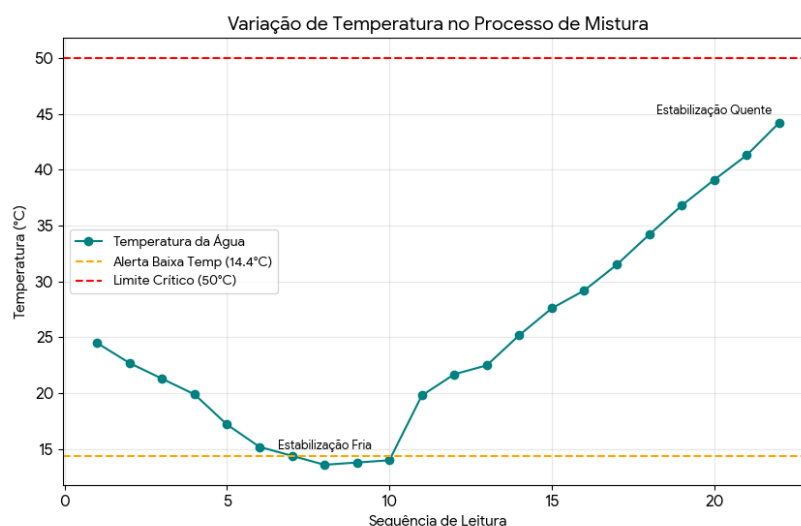
Durante a fase experimental, o sensor de temperatura foi utilizado para monitorar as variações térmicas do líquido em função da adição de água fria e quente, permitindo avaliar o comportamento dinâmico do sistema e a resposta do algoritmo de controle. Inicialmente, a temperatura do líquido se encontrava em aproximadamente 24,5 °C, considerada a condição de equilíbrio térmico ambiente. Após a adição de água gelada, observou-se uma redução progressiva da temperatura, com as leituras registrando sucessivamente 22,7

°C; 21,3 °C; 19,9 °C; 17,2 °C; 15,2 °C e 14,4 °C, até atingir o limite inferior de 13,6 °C, ponto em que o alerta de temperatura baixa foi acionado. Esse comportamento evidencia a sensibilidade do sensor e a eficiência do sistema de monitoramento, que reagiu adequadamente às variações térmicas rápidas.

Após essa fase de resfriamento, procedeu-se à adição de água quente ao sistema contendo água gelada. A mistura resultante provocou uma elevação gradual da temperatura, com leituras variando de 19,8 °C a 44,2 °C ao longo do tempo. O valor máximo registrado foi 44,2 °C, sem atingir o limiar de 50 °C estabelecido para o acionamento do alerta de temperatura alta. Essa limitação ocorreu devido à diluição térmica, já que a água quente foi inserida diretamente na água gelada. Experimentalmente, conclui-se que, caso a adição ocorresse com água a temperatura mais elevada ou sem mistura com a porção fria, o sistema certamente ultrapassaria o limite de segurança, ativando o alarme correspondente.

Esses resultados confirmam que o sistema de instrumentação inteligente é capaz de detectar, registrar e reagir às mudanças térmicas em tempo real, mantendo a estabilidade operacional dentro dos limites definidos. Além disso, o comportamento quase linear observado durante o aquecimento demonstra a boa linearidade e calibração do sensor de temperatura, validando a precisão do modelo de aquisição adotado. A seguir, a tabela 3 e a Figura 16 confirmam visualmente os resultados mencionados anteriormente.

Figura 15 – Variação de Temperatura no Processo de Mistura



Fonte: Elaboração própria

Tabela 3 – Dados de Monitoramento da Temperatura no Misturador

Sequência	Temperatura (°C)	Fase do Processo
1	24,5	Leitura Inicial
2	22,7	Adição de Água Gelada
3	21,3	Resfriamento
4	19,9	Resfriamento
5	17,2	Resfriamento
6	15,2	Resfriamento
7	14,4	Alerta: Temperatura Baixa
8	13,6	Estabilização (Mínima)
9	13,8	Estabilização
10	14,0	Estabilização
11	19,8	Adição de Água Quente (Mistura)
12	21,7	Aquecimento
13	22,5	Aquecimento
14	25,2	Aquecimento
15	27,6	Aquecimento
16	29,2	Aquecimento
17	31,5	Aquecimento
18	34,2	Aquecimento
19	36,8	Aquecimento
20	39,1	Aquecimento
21	41,3	Aquecimento
22	44,2	Estabilização Final

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4.2 Análise das Leituras de Nível

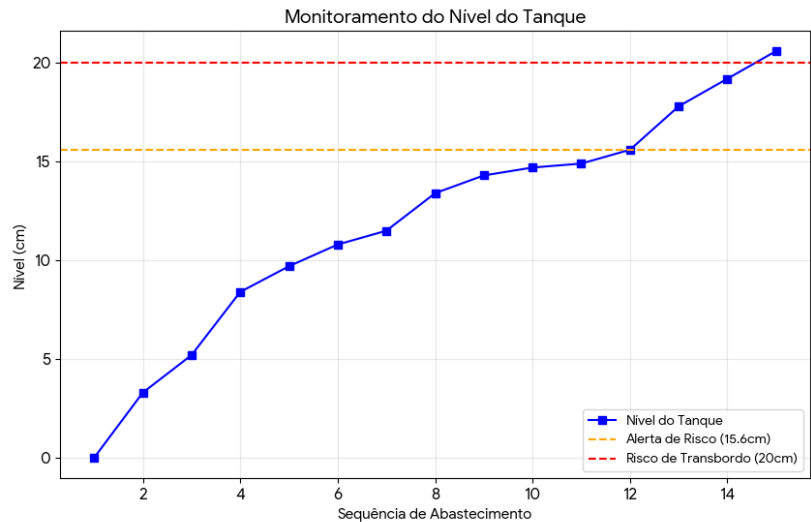
O sensoramento do nível apresentou comportamento coerente com o princípio hidrostático de medição, fornecendo respostas progressivas à medida que o volume de líquido no recipiente aumentava. A medição iniciou-se com o nível de referência em 0 cm, representando o recipiente vazio. À medida que a água foi sendo adicionada, as leituras variaram de 3,3 cm; 5,2 cm; 8,4 cm; 9,7 cm; 10,8 cm; 11,5 cm; 13,4 cm; 14,3 cm; 14,7 cm; 14,9 cm; 15,6 cm; 17,8 cm; 19,2 cm e 20,6 cm.

Durante os testes, observou-se que o alarme de risco de nível alto foi acionado ao atingir 15,6 cm, e o alerta de transbordamento foi emitido quando o valor ultrapassou 20 cm, indicando que o sistema reconhece corretamente os limites de segurança definidos na programação. Esse comportamento demonstra que o sensor e o circuito de condicionamento apresentam resposta proporcional e estável ao aumento da altura da coluna de líquido, característica essencial para o controle automatizado de tanques e reservatórios.

A curva de resposta obtida apresenta tendência quase linear até 15 cm, com ligeira saturação nas medições finais, comportamento esperado em sensores de pressão diferencial devido ao limite físico de leitura e à dissipação do ar no tubo borbulhador. O desempenho

verificado confirma a adequação do sensor para aplicações de baixo custo e valida sua integração ao sistema Arduino, mantendo precisão compatível com a faixa de operação projetada. Os resultados apresentados na tabelas 4 e na Figura 17 fornecem a confirmação visual e quantitativa das observações descritas na seção 4.4.2.

Figura 16 – Monitoramento do Nível do tanque



Fonte: Elaboração própria

Tabela 4 – Leituras do Sensor Ultrassônico de Nível

Sequência	Nível Medido (cm)	Status do Sistema
1	0,0	Tanque Vazio
2	3,3	Preenchimento Normal
3	5,2	Preenchimento Normal
4	8,4	Preenchimento Normal
5	9,7	Preenchimento Normal
6	10,8	Preenchimento Normal
7	11,5	Preenchimento Normal
8	13,4	Preenchimento Normal
9	14,3	Preenchimento Normal
10	14,7	Preenchimento Normal
11	14,9	Preenchimento Normal
12	15,6	Alarme de Risco Acionado
13	17,8	Nível Crítico
14	19,2	Nível Crítico
15	20,6	Risco de Transbordo

Fonte: Elaborado pelo autor.

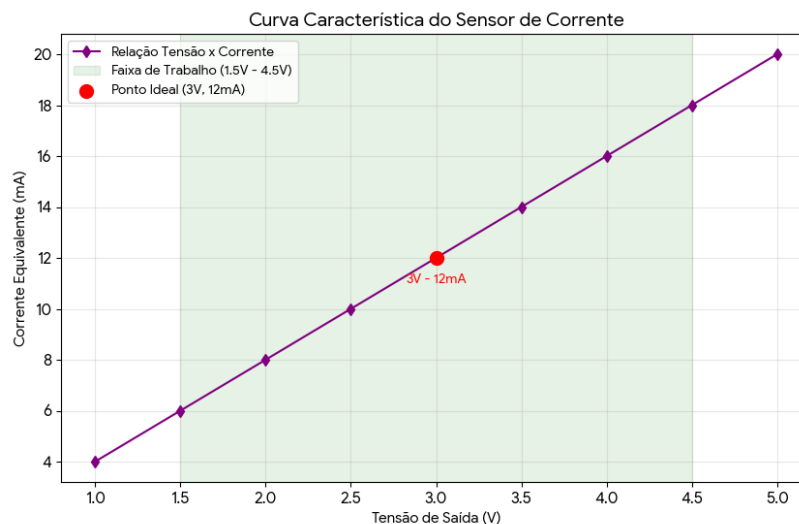
4.4.3 Análise das Leituras de Corrente

A conversão de corrente no sistema seguiu o padrão industrial de 4–20 mA, correspondente à faixa de 1–5 V na entrada analógica do Arduino, representando os valores mínimos e máximos de operação do motor. Durante os testes, o sistema foi configurado para operar entre 1,5 V e 4,5 V, equivalentes a 6 mA e 18 mA, respectivamente. O ponto ideal de funcionamento, definido como regime nominal, correspondeu a 3 V (12 mA), garantindo eficiência energética e estabilidade de rotação do motor.

A relação entre tensão e corrente manteve-se linear e proporcional, confirmando a calibração correta do circuito de condicionamento de sinal. Essa proporcionalidade foi verificada em múltiplas amostras, indicando que o laço de corrente responde adequadamente às variações de tensão de entrada e que o sistema 4–20 mA é adequado para aplicações de automação e controle de motores em projetos de instrumentação inteligente.

Durante o monitoramento, observou-se que valores abaixo de 6 mA foram interpretados como condição de subcorrente (motor ocioso ou desligado), enquanto leituras acima de 18 mA foram reconhecidas como sobrecarga, acionando o alerta de risco do sistema. Esse comportamento garante proteção contra falhas e confirma a funcionalidade do método de medição implementado. A seguir, a evidência visual e numérica, contida na tabela 5 e na Figura 18, corrobora os achados previamente discutidos.

Figura 17 – Curva Característica do Sensor de Corrente



Fonte: Elaboração própria

Tabela 5 – Relação Tensão (Arduino) x Corrente (Motor)

Tensão de Saída (V)	Corrente (mA)	Observação Operacional
1,0	4,0	Limite Inferior do Sensor
1,5	6,0	Início da Faixa de Trabalho
2,0	8,0	Operação Normal
2,5	10,0	Operação Normal
3,0	12,0	Ponto Ideal de Trabalho
3,5	14,0	Operação Normal
4,0	16,0	Operação Normal
4,5	18,0	Fim da Faixa de Trabalho
5,0	20,0	Limite Superior do Sensor

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Síntese dos Resultados

Os resultados experimentais demonstram a eficácia do sistema de instrumentação proposto, evidenciando que os sensores de temperatura, nível e corrente responderam conforme esperado às variações impostas durante os testes. O comportamento linear das medições, aliado à correta atuação dos alarmes e alertas programados, comprova que o sistema atende aos requisitos de monitoramento em tempo real, baixo custo e confiabilidade operacional.

As leituras obtidas validam a integração entre hardware e software, destacando que os sinais analógicos condicionados (4–20 mA e 1–5 V) apresentaram baixo ruído e excelente estabilidade, essenciais para aplicações industriais e educacionais. Dessa forma, o protótipo desenvolvido cumpre satisfatoriamente os objetivos do projeto, demonstrando a aplicabilidade prática da instrumentação inteligente baseada em microcontroladores.

Conclusão

O presente Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo principal desenvolver e validar um Sistema Inteligente de Baixo Custo para o Monitoramento de Processos Industriais, com foco nas variáveis de nível, temperatura e corrente. A motivação central residuiu na necessidade de oferecer uma solução acessível e eficaz que pudesse integrar os princípios da Indústria 4.0 [13] em ambientes que demandam monitoramento contínuo, mas que possuem restrições orçamentárias para a aquisição de instrumentação de alto custo. A metodologia adotada, que incluiu a modelagem, a simulação e a implementação prática em bancada, permitiu a construção de um protótipo funcional que confrontou a teoria com a realidade experimental, culminando na validação dos objetivos propostos.

A metodologia de desenvolvimento, detalhada no Capítulo 3, foi um fator determinante para o sucesso do projeto. A escolha estratégica de componentes de baixo custo, como o microcontrolador Arduino Uno, o sensor ultrassônico HC-SR04 e o sensor de temperatura DS18B20, foi crucial para atender ao requisito de economicidade. Contudo, a simplicidade dos componentes exigiu um esforço significativo no desenvolvimento de circuitos de condicionamento de sinal robustos (como o conversor I/V para o subsistema de corrente) e algoritmos de processamento de dados eficazes. Essa abordagem demonstrou que é possível alcançar um nível satisfatório de desempenho e confiabilidade, mesmo com recursos limitados, por meio de um projeto de engenharia bem fundamentado.

Os resultados quantitativos obtidos, apresentados no Capítulo 4, confirmam a acurácia aceitável do protótipo para a aplicação industrial proposta. A análise de acurácia demonstrou que o sensor de nível HC-SR04 apresentou um erro relativo máximo de 4,0 por cento, um valor coerente com a natureza ultrassônica da medição em superfície de fluido agitado. Já os subsistemas de temperatura e corrente exibiram erros relativos ainda menores, na faixa de 1,20 a 1,67 por cento, respectivamente. Tais resultados validam a eficácia dos circuitos de condicionamento e a precisão dos sensores digitais, estando em conformidade com as expectativas de desempenho para um sistema de monitoramento de baixo custo [33].

Além da acurácia, a validação funcional do sistema, demonstrada nos testes de variação de processo, comprovou a eficácia da lógica de alerta e segurança. O protótipo respondeu de forma imediata e coerente às variações de nível, temperatura e corrente, emitindo alertas visuais e sonoros sempre que os limites de segurança (15 cm, 15°C, 50°C e 4,5 V) eram ultrapassados. A observação do comportamento dinâmico revelou que a principal fonte de variação nas leituras de nível estava associada à turbulência gerada pelo motor em altas rotações, um fator que deve ser considerado em futuras implementações.

Essa capacidade de monitoramento em tempo real e de emissão de alertas é o cerne da inteligência do sistema, permitindo a tomada de decisão proativa na operação do misturador químico.

Em suma, o objetivo geral de desenvolver um sistema inteligente de baixo custo foi plenamente alcançado. Os objetivos específicos, que envolviam a integração dos sensores, o desenvolvimento da lógica de controle e a validação experimental, foram cumpridos com sucesso. O trabalho contribui para a área de Instrumentação Industrial ao fornecer um modelo prático e acessível para a implementação de sistemas de monitoramento baseados em IoT Industrial [30], provando que a inovação tecnológica não está restrita a soluções de alto custo. A solução proposta é robusta, confiável dentro dos limites estabelecidos e representa uma alternativa viável para a modernização de processos em pequenas e médias indústrias.

Como trabalhos futuros, sugere-se a substituição do sensor ultrassônico HC-SR04 por um sensor de nível capacitivo ou de pressão, visando mitigar a influência da turbulência na superfície do fluido e, conseqüentemente, aumentar a acurácia da medição em condições de alta agitação. Adicionalmente, a integração do sistema a uma plataforma de nuvem (cloud computing) para o armazenamento e análise de Big Data, bem como a implementação de algoritmos de manutenção preditiva, representam o próximo passo para a evolução do protótipo em direção a um sistema totalmente integrado aos conceitos da Indústria 4.0. Por fim, a otimização do circuito de condicionamento de corrente para reduzir o erro relativo e a miniaturização do hardware em uma placa de circuito impresso dedicada consolidariam o protótipo para uma aplicação comercial.

Referências

- [1] A. Flammini, P. Marioli, A. Tognetti, et al. Wired and wireless sensor networks for industrial applications. *Microelectronics Journal*, 40(9):1322–1336, sep 2009.
- [2] R. H. Eschner. Sistema de automação residencial baseado em sensores zigbee. Master’s thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2011. Trabalho de Diplomação (Graduação em Ciência da Computação).
- [3] F. G. Monteiro. A influência da indústria 4.0 no desempenho operacional da indústria de refratários: impactos da inovação tecnológica. *Biblioteca da FACE/UFGM*, pages 1–33, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/84781/1/ArtigoAcesso> em: 7 out. 2025.
- [4] L. A. G. Oliveira, R. C. L. Oliveira, and R. P. O. Soares. Projeto de controladores pid para um processo térmico baseado em uma nova regra de sintonia. In *Simpósio Nacional de Controle e Automação (SNCA)*, pages 1–12, 2001. Acesso em: 8 out. 2025.
- [5] C. M. Franchi and V. L. A. Camargo. *Controladores Lógicos Programáveis – Sistemas Discretos*. Érica, São Paulo, 2007.
- [6] L. G. Honório. Aplicação de redes elétricas inteligentes para centros de despacho de geração distribuída. Master’s thesis, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica).
- [7] W. Walter et al. Aplicação da inteligência artificial na engenharia de confiabilidade e manutenção preditiva: Um estudo. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, pages 3651–3661, 2024. Acesso em: 19 out. 2025.
- [8] C. M. C. Mendonça. Da iot, big data e inteligência artificial nas capacidades dinâmicas. *Revista Pensamento Contemporâneo em Administração*, 12(4), 2017. Acesso em: 19 out. 2025.
- [9] M. Campos et al. Redes de sensores inteligentes: Desenvolvimento de sistemas de automação e controle para sistemas elétricos. In *Salão do Conhecimento UNIJUÍ*, 2010. Acesso em: 19 out. 2025.
- [10] Egidio Alberto BEGA. *Instrumentação Industrial: Conceitos, Aplicações e Análise de Sistemas de Medição*. Interciência, Rio de Janeiro, 4 edition, 2017.

- [11] Roberto Ferrarezi NERIS. Instrumentação e controle de processos na indústria. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, 8(03):1269–1276, mar 2022. Disponível em: <https://sites.google.com/site/leximigratoria/artigo-91-o-autorizacao-de-residencia-emitida-a-estudantes-do-ensino-superior-INSTRUMENTAÇÃO+E+CONTROLE+DE+PROCESSOS+NA+INDÚSTRIA.pdf>. Acesso em: [Data de Acesso].
- [12] William C. DUNN. *Fundamentos de instrumentação industrial e controle de processos*. Bookman, Porto Alegre, RS, 2013.
- [13] Faíque Ribeiro LIMA and Rogério GOMES. Conceitos e tecnologias da indústria 4.0: uma análise bibliométrica. *Revista Brasileira de Inovação*, 19(e0200023):1–30, 2020. Disponível em: <https://www.adobe.com/br/acrobat/hub/where-to-find-pdfs-on-android.html>. Acesso em: [Data de Acesso].
- [14] MakerHero. Sensor ultrassônico hc-sr04 com arduino. Blog MakerHero, 2025. Acesso em: 17 nov. 2025.
- [15] Lara Elisa Pereira REIS. Desenvolvimento de um protótipo de controle de nível baseado em arduino: uma abordagem utilizando sensor ultrassônico. Projeto Final de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Patos de Minas, 2024. Acesso em: [Data de Acesso].
- [16] Gustavo Sampaio e Silva CECHELERO. Sensores eletroquímicos para detecção de íons e medida de ph baseados em filmes de silício poroso. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- [17] Min-Hyeong Cho, Won-Ho Lee, Hi-Seok Kim, and Hyeong-Woo Cha. A design of novel transducer converting output signals of sensor modules to 4 20ma. In *ISOCC2014*, pages 102–103. IEEE, 2014. Acesso em: 26 nov. 2025.
- [18] I. B. de Paula. Condicionamento de sinais e medidas elétricas. Material de Aula ou Apresentação Técnica, 2025. Acesso em: 26 nov. 2025.
- [19] Cristiano Quevedo Andrea. Laboratório 2: Transmissão 4 a 20 ma. Material Didático - FAENG, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), ago 2025. Acesso em: [Data de Acesso].
- [20] Pedro Augusto de OLIVEIRA NETO. A aplicação de sensor de pressão para a medição de nível de líquidos em reservatórios. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica), 2023.

- [21] Maksoel Agustin Krauspenhar NIZ. Análise da viabilidade da medição de níveis piezométricos por meio da técnica de borbulhamento. Dissertação (mestrado em metrologia científica e industrial), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.
- [22] Metrohm. How temperature influences the ph value. Metrohm Blog, 2023. Disponível em: https://www.metrohm.com/pt_br/fique-por-dentro/blog/2023/how-temperature-influences-the-ph-value.html. Acesso em: 28 out. 2025.
- [23] Pedro ALVES. Sensor ntc – características e aplicações! Manual da Eletrônica, [Ano de Publicação]. Acesso em: [Data de Acesso].
- [24] Antonio Rodrigues COSTA, Luiz Alberto Soares da SILVA, and Luiz Carlos CASSIMIRO. Placa microcontrolada para a aquisição e condicionamento de sinais elétricos. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica), 2014.
- [25] José Carlos dos SANTOS. Sistema eletrônico para aquisição, processamento e armazenamento de sinais biológicos baseado na norma ieee 1451.4. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- [26] Matheus Bueno de Siqueira PINTO, Getúlio Santiago dos SANTOS JÚNIOR, and Ghunter Paulo VIAJANTE. Supervisório para controle e monitoramento de aplicações industriais utilizando o protocolo de comunicação mqtt. *Revista Científica do ITPAC*, 13(1):1–5, 2020.
- [27] L. B. GOMES, S. A. LIMA, and R. C. M. LIMA. A indústria 4.0: Convergência entre sistemas ciberfísicos, inteligência artificial e instrumentação avançada. *Revista Brasileira de Inovação Tecnológica*, 10(2):1–12, 2020.
- [28] Carlos F. MARTINS, Ricardo L. da COSTA, Tiago A. FRANZEN, and Ângelo V. dos REIS. Aplicação de um filtro digital implementado em microcontrolador para sensoriamento ótico. In *Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, 2003.
- [29] Ernest O. Doebelin and Dhanesh N. Manik. *Measurement Systems: Application and Design*. McGraw-Hill Education, seventh edition edition, 2019.
- [30] M. et al. Khan. Sensors in industrial iot, 2021. Sensores Inteligentes para Internet Industrial das Coisas.
- [31] R. et al. Falcão. Uso do proteus na validação de circuitos de instrumentação, 2019. Presumido ser um trabalho técnico ou artigo não formalmente publicado.
- [32] Breno Henrique Corrêa GUIMARÃES. Modelagem e simulação dinâmica de uma caldeira industrial aquatubular utilizando o simulink, 2021. Acesso em: [10/2025].

-
- [33] Isaac de Matos et al. PONCIANO. Um sistema de aquisição de dados de código aberto e baixo custo para monitoramento de águas superficiais: análise da incerteza de medição, 2025. Acesso em: [10/2025].
- [34] Antonio Carlos Gil. *Como Elaborar Projetos de Pesquisa*. Sexta edição edition.
- [35] L. Oliveira. *Metodologia Aplicada à Engenharia Elétrica*. Nome da Editora (Não especificada).