REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

AUTOMAÇÃO DE TANQUE DE MISTURA INDUSTRIAL DESTINADO A MULTIPROCESSOS POR BATELADA

AUTOMATION OF INDUSTRIAL MIXING TANKS FOR MULTI-PROCESS BATCH OPERATION

AUTOMATIZACIÓN DE TANQUES DE MEZCLA INDUSTRIAL DESTINADOS A MULTIPROCESOS POR LOTES

Lucas de Oliveira Estevam
Mestre em Engenharia Química
Universidade de Uberaba, Brasil
E-mail: lucas.estevam@edu.uniube.br
Orcid:0000-0002-4412-6591

Raian Souza Sena
Graduando em Engenharia Elétrica
Instituto Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail: raian.sena@estudante.iftm.edu.br
Orcid:0009-0004-3988-1439

Lúcio Rogério Júnior
Doutorando e Docente em Engenharia Elétrica
Instituto Federal do Triângulo Mineiro, Brasil
E-mail:luciorogerio@iftm.edu.br
Orcid: 0000-0002-7840-5863

José Roberto Delalibera Finzer
Doutor e Docente PPGEQ - Engenharia Química
Universidade de Uberaba, Brasil
E-mail: jose.finzer@uniube.br
Orcid:0000-0001-6139-3619

Edilberto Pereira Teixeira
Doutor e Docente PPGEQ - Engenharia Química
Universidade de Uberaba, Brasil
E-mail: edilberto.teixeira@uniube.br
Orcid: 0000-0003-3953-2891

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

Resumo

A automação de processos industriais tem se mostrado fundamental para o aumento da eficiência, qualidade e confiabilidade na engenharia química. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a construção de um tanque de mistura automatizado destinado a multiprocessos por batelada, utilizando tecnologias acessíveis e de baixo custo. O equipamento foi projetado com auxílio de softwares de modelagem e construído em aço inoxidável, garantindo resistência química e condições adequadas de sanitização. Diferentes impulsionadores foram empregados para atender distintos tipos de mistura, promovendo eficiente homogeneização do conteúdo. O sistema de automação foi desenvolvido a partir do microcontrolador ATmega328P, responsável pelo controle dos motores de agitação, resistências elétricas de aquecimento, válvulas, sensores de temperatura e nível, além da sinalização sonora do equipamento. Uma interface homem-máquina, composta por display alfanumérico, foi incorporada ao sistema para facilitar a operação e o monitoramento do processo em tempo real. Após o desenvolvimento do hardware e software, foram realizados testes em bancada para validação dos recursos implementados. Os resultados demonstraram operação confiável e satisfatória, evidenciando a eficiência do controle térmico, da agitação e da automação do sistema. O protótipo mostrou-se adequado para aplicações em escala experimental na produção de compostos químicos, cosméticos e farmacêuticos. Conclui-se que o uso de tecnologias simples, acessíveis e de fácil implementação possibilita o desenvolvimento de sistemas automatizados eficientes, capazes de atender às necessidades de fabricantes de máquinas, pequenas empresas e centros de pesquisa, reduzindo custos operacionais e aumentando a produtividade, além de apresentar potencial para futuras expansões e integração com sistemas supervisórios.

Palavras-chave: Automação industrial; Tanque de mistura; Processos em batelada; ATmega328P; Engenharia química.

Abstract

Industrial process automation has become essential for increasing efficiency, quality, and reliability in chemical engineering. This work presents the development and construction of an automated mixing tank designed for multiprocess batch operations using accessible and low-cost technologies. The equipment was designed with the aid of modeling software and built in stainless steel, ensuring chemical resistance and proper sanitation conditions. Different impellers were employed to meet distinct mixing requirements, promoting efficient homogenization of the contents. The automation system was developed using the ATmega328P microcontroller, responsible for controlling agitation motors, electric heating resistors, valves, temperature and level sensors, as well as the equipment's audible signaling system. A human-machine interface composed of an alphanumeric display was incorporated into the system to facilitate operation and real-time process monitoring. After the development of the hardware and software, bench tests were carried out to validate the implemented features. The results demonstrated reliable and satisfactory operation, highlighting the efficiency of

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

thermal control, agitation, and system automation. The prototype proved suitable for experimental-scale applications in the production of chemical, cosmetic, and pharmaceutical compounds is concluded that the use of simple, accessible, and easy-to-implement technologies enables the development of efficient automated systems capable of meeting the needs of machine manufacturers, small companies, and research centers, reducing operational costs and increasing productivity, while also presenting potential for future expansions and integration with supervisory systems.
Keywords: Industrial automation; Mixing tank; Batch processes; ATmega328P; Chemical engineering.

Resumen

La automatización de procesos industriales se ha convertido en un factor esencial para aumentar la eficiencia, la calidad y la confiabilidad en la ingeniería química. Este trabajo presenta el desarrollo y la construcción de un tanque de mezcla automatizado destinado a multiprocesos por lotes, utilizando tecnologías accesibles y de bajo costo. El equipo fue diseñado con el apoyo de software de modelado y construido en acero inoxidable, garantizando resistencia química y condiciones adecuadas de sanitización. Se emplearon diferentes impulsores para atender distintos tipos de mezclas, promoviendo una eficiente homogeneización del contenido. El sistema de automatización fue desarrollado a partir del microcontrolador ATmega328P, responsable del control de los motores de agitación, resistencias eléctricas de calentamiento, válvulas, sensores de temperatura y nivel, además de la señalización sonora del equipo. Una interfaz hombre-máquina compuesta por una pantalla alfanumérica fue incorporada al sistema para facilitar la operación y el monitoreo del proceso en tiempo real. Después del desarrollo del hardware y software, se realizaron pruebas de banco para validar las funcionalidades implementadas. Los resultados demostraron una operación confiable y satisfactoria, evidenciando la eficiencia del control térmico, de la agitación y de la automatización del sistema. El prototipo mostró ser adecuado para aplicaciones a escala experimental en la producción de compuestos químicos, cosméticos y farmacéuticos. Se concluye que el uso de tecnologías simples, accesibles y de fácil implementación permite el desarrollo de sistemas automatizados eficientes, capaces de satisfacer las necesidades de fabricantes de máquinas, pequeñas empresas y centros de investigación, reduciendo costos operativos y aumentando la productividad, además de presentar potencial para futuras expansiones e integración con sistemas de supervisión.
Palabras clave: Automatización industrial; Tanque de mezcla; Procesos por lotes; ATmega328P; Ingeniería química.

1. Introdução

A automação industrial constitui um elemento essencial para o aprimoramento e a modernização dos sistemas produtivos, contribuindo significativamente para o

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

aumento da eficiência operacional, da confiabilidade dos processos e da redução dos custos associados à produção. Apesar de os conceitos fundamentais da automação terem sido concebidos antes da Revolução Industrial, foi durante esse período que a utilização de sistemas mecanizados se intensificou no ambiente industrial, promovendo ganhos expressivos de produtividade e consolidando os fundamentos dos atuais sistemas automatizados (GUARNIERI, 2010). Posteriormente, com a evolução da eletrônica e o desenvolvimento dos dispositivos semicondutores ao longo do século XX, foram introduzidos os microcontroladores e os controladores lógicos programáveis (CLPs), ampliando as capacidades de controle, monitoramento e flexibilidade dos processos industriais, além de proporcionar maior precisão operacional (PECKOL, 2019; STENZEL, 2003).

Nas últimas décadas, a crescente disponibilidade de tecnologias embarcadas de baixo custo tem contribuído para a expansão das aplicações de automação em máquinas e processos industriais. Os microcontroladores modernos passaram a integrar funcionalidades avançadas de processamento, aquisição de sinais e comunicação, viabilizando o desenvolvimento de soluções automatizadas com elevado desempenho técnico e custos reduzidos. Essa evolução tecnológica tem favorecido a implementação de sistemas acessíveis e eficientes, adequados às demandas de diversos segmentos da indústria (SANDEEP et al., 2015; RESENDE et al., 2021).

No âmbito da engenharia química, os tanques de mistura são amplamente empregados em operações de homogeneização e na condução de reações químicas, podendo ser configurados para funcionamento contínuo ou em regime de batelada (SANTOS; VASCONCELOS, 2002). Entre essas configurações, os sistemas em batelada apresentam vantagens relacionadas à simplicidade de operação, à versatilidade de uso e à facilidade de implementação tanto em ambientes laboratoriais quanto em aplicações industriais (LEVENSPIEL, 2000). Nesses sistemas, os mecanismos de agitação e mistura são fundamentais para assegurar condições adequadas de transferência de massa, uniformidade da composição e controle dos parâmetros reacionais (HAYES, 2001). Além disso, a escolha do tipo de impulsor deve considerar as propriedades físicas do fluido e os

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

requisitos específicos do processo, uma vez que esse componente exerce influência direta sobre a eficiência da mistura e a qualidade final do produto obtido (MENEGALLI; TELIS; ROMERO, 2016).

Apesar da relevância desses sistemas, observa-se que diversas soluções de automação aplicadas a tanques industriais ainda apresentam altos custos de implementação e de manutenção, o que limita sua adoção por pequenas empresas, fabricantes de equipamentos e instituições de pesquisa. Nesse cenário, a adoção de tecnologias amplamente disponíveis e de baixo custo surge como uma alternativa viável e promissora para o desenvolvimento de sistemas automatizados mais acessíveis, sem comprometer a eficiência operacional (SANTOS; ROGERIO JUNIOR, 2020).

Diante disso, este trabalho apresenta o desenvolvimento e a implementação de um sistema automatizado para controle de um tanque de mistura operando em múltiplos processos em regime de batelada, tendo como unidade central de processamento o microcontrolador ATmega328P. O sistema proposto realiza o acionamento de atuadores como motores, resistências elétricas e válvulas, além da leitura de sensores utilizados para monitoramento das variáveis de processo. Adicionalmente, é incorporada uma interface homem-máquina (IHM), com o intuito de simplificar a operação e a supervisão do sistema. O objetivo consiste em propor uma solução de baixo custo, confiável e de fácil implementação, apta a atender demandas de automação tanto em ambientes industriais quanto experimentais, com ênfase nos setores químico, cosmético e farmacêutico.

É importante destacar que esta pesquisa se concentra no desenvolvimento de um protótipo funcional em escala piloto, destinado à validação da arquitetura mecânica, eletrônica e do sistema embarcado de controle. Embora o projeto tenha sido concebido considerando conceitos amplamente empregados na automação industrial, a etapa apresentada neste artigo corresponde à validação funcional dos principais subsistemas do equipamento, constituindo uma plataforma para futuras implementações e ensaios em condições operacionais mais representativas do ambiente industrial.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

2. Revisão da Literatura

Os tanques de mistura consistem em equipamentos destinados à realização de reações químicas e operações de homogeneização sob condições controladas de operação (SANTOS & VASCONCELOS, 2002).

Segundo Levenspiel (2000), esses sistemas podem ser classificados quanto ao modo de operação em contínuo ou em batelada. No modo contínuo, o equipamento opera com fluxo constante de entrada e saída de material, o que permite a manutenção do regime em estado estacionário, no qual variáveis como vazão, temperatura e concentração permanecem aproximadamente constantes ao longo do tempo (HAYES, 2001). Esse tipo de configuração é amplamente aplicado em estudos relacionados à cinética de reações heterogêneas, devido à sua estabilidade operacional e previsibilidade dinâmica (LEVENSPIEL, 2000).

Os tanques operados em regime de batelada caracterizam-se pelo armazenamento dos reagentes no interior do reator, com realização da mistura sem a presença de fluxo contínuo de entrada e saída durante o processo, podendo ainda empregar diferentes configurações de agitadores e operar sob condições de pressão ou vácuo (ROBERTS, 2010). De acordo com Levenspiel (2000), a simplicidade operacional desses sistemas favorece sua adaptação e aplicação em escalas laboratoriais, facilitando sua utilização em estudos experimentais e de desenvolvimento de processos.

2.1. Modelo de agitadores

Os impulsores, também denominados agitadores, são elementos fundamentais para a promoção da mistura e da homogeneização em reatores, sendo selecionados de acordo com as propriedades reológicas do fluido, especialmente sua viscosidade, bem como as condições específicas do processo (MENEGALLI; TELIS; ROMERO, 2016). Esses dispositivos podem ser empregados em aplicações envolvendo fluidos de baixa, média ou alta viscosidade, conforme sua geometria e regime de operação. A escolha apropriada do impulsor depende de informações de desempenho e do objetivo operacional do sistema, podendo estar relacionada à intensificação da

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

agitação, à melhoria da transferência de massa ou à otimização da troca térmica no processo.

Os impulsores podem ser classificados conforme o padrão de escoamento que promovem no interior do reator, sendo geralmente divididos em três categorias principais: fluxo axial, quando o movimento do fluido ocorre paralelamente ao eixo de rotação; fluxo radial, quando o escoamento se desenvolve perpendicularmente ao eixo; e fluxo tangencial, caracterizado pela indução de movimento rotacional predominante no meio. Além dessa classificação baseada na direção do escoamento, os impulsores também podem ser diferenciados em função do nível de turbulência que são capazes de gerar no sistema, o que impacta diretamente a eficiência do processo de mistura.

A seleção do tipo de impulsor deve levar em consideração propriedades do fluido, como viscosidade e densidade, além do comportamento esperado para o regime de mistura, de modo a assegurar a eficiência operacional do sistema. Adicionalmente, o desenvolvimento de novos equipamentos deve respeitar as características hidrodinâmicas e os padrões de escoamento associados a cada configuração de impulsor. A validação da eficácia desses dispositivos é geralmente realizada por meio de ensaios em escala laboratorial, permitindo a avaliação de seu desempenho antes da aplicação em escala ampliada.

2.2. Agitação e Mistura

Os processos de agitação e mistura desempenham papel essencial na manutenção da homogeneidade do meio reacional, na intensificação da transferência de massa e no adequado controle das condições operacionais em reatores químicos (HAYES, 2001). Nesse contexto, a seleção do tipo de impulsor está diretamente relacionada às características físico-químicas do fluido e aos objetivos específicos do processo, exercendo influência significativa sobre a cinética da reação e sobre a qualidade do produto obtido (MENEGALLI; TELIS; ROMERO, 2016).

O dimensionamento de sistemas de agitação baseia-se no princípio da similaridade, o qual envolve a aplicação de critérios de similaridade geométrica,

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

cinemática e dinâmica, permitindo a extrapolação de resultados obtidos em escala laboratorial para aplicações em escala industrial. A potência necessária ao sistema está associada a parâmetros como viscosidade e densidade do fluido, velocidade de rotação do agitador e características geométricas do tanque e do impulsor. Para fluidos com comportamento newtoniano, essa relação pode ser expressa de forma geral por meio da Equação (1):

$$P_0 = f(\rho, \mu, N, D_a, D_t, H_a, w_d) \quad (1)$$

Aplicando análise dimensional, obtêm-se os números adimensionais de potência, Reynolds e Froude:

$$N_{P_0} = \frac{P_0}{N^3 D_a^5 \rho} \quad (2)$$

$$N_{Re} = \frac{D_a^2 N \rho}{\mu} \quad (3)$$

$$N_{Fr} = \frac{N^2 D_a^2}{g} \quad (4)$$

Assim, o número de potência pode ser descrito como:

$$P_0 = f(N_{\mathrm{Re}}, N_{Fr}, \frac{Dt}{Da}, \frac{Ha}{Da}, \frac{HL}{Da}, \frac{Wd}{Da}) \quad (5)$$

Em projetos padrão, utilizam-se relações geométricas como:

$$\frac{D_t}{D_a} = 3, \frac{H_a}{D_a} = 1, \frac{H_L}{D_a} = 3, \frac{W_d}{D_t} = 0{,}1 \quad (6)$$

As curvas que relacionam N_{P_0} e N_{Re} determinam o regime de escoamento. Em regime laminar ($N_{Re} < 10$) consideramos a Equação (7):

$$N_{P_0} = \frac{K_p}{N_{Re}} \quad (7)$$

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

Para a região turbulenta, $N_{P_0} = K_p$. Agitadores para fluidos viscosos seguem correlações empíricas, como helicoidal (8) e âncora (9):

$$N_{P_o} = \frac{150}{Re}\left(\frac{H_i}{D}\right)^{-0,28}\left(\frac{p}{D}\right)^{-0,53}\left(\frac{h}{D}\right)\left(\frac{W}{D}\right)^{0,33} {n_b}^{0,54} \quad (8)$$

$$N_{P_o} = \frac{85}{Re}\left(\frac{H_i}{T}\right)^{-0,31}\left(\frac{h}{D}\right)^{0,48} \quad (9)$$

Essas equações orientam a seleção adequada do impulsor e a estimativa de potência para garantir eficiência, segurança e reprodutibilidade em operações industriais de mistura.

3. Material e Métodos

O tanque de mistura desenvolvido foi concebido para atender demandas de agroindústrias em operações de planta piloto, apresentando capacidade nominal de 5 litros. Além disso, o equipamento também pode ser empregado em processos químicos e físico-químicos nos setores farmacêutico, alimentício e químico. Em função de sua configuração construtiva simplificada, o sistema permite sua adaptação para aplicações em escala laboratorial de forma facilitada.

O desenvolvimento do tanque de mistura automatizado foi conduzido a partir da definição de requisitos funcionais e construtivos, estabelecidos de acordo com a aplicação pretendida em escala piloto para atividades de ensino, pesquisa e desenvolvimento tecnológico. Esses requisitos nortearam as decisões relacionadas ao dimensionamento mecânico, seleção dos componentes eletroeletrônicos e desenvolvimento da arquitetura de controle. A Tabela 1 apresenta os principais requisitos de projeto considerados durante o desenvolvimento do equipamento.

Os requisitos apresentados serviram como referência para todas as etapas do desenvolvimento, permitindo avaliar o atendimento das funcionalidades previstas durante os testes de integração realizados em bancada. Considerando que o presente trabalho descreve o desenvolvimento de um protótipo funcional, a verificação concentrou-se principalmente na validação das funções de automação e

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

controle, enquanto a caracterização completa do desempenho operacional do equipamento constitui uma etapa subsequente da pesquisa.

Tabela 1: Requisitos de projeto do tanque de mistura automatizado

Requisito	Valor ou especificação	Justificativa	Método de verificação
Volume útil	5 L	Escala piloto para laboratório	Medição geométrica do tanque
Material em contato com o produto	Aço inox AISI 316L	Resistência química e facilidade de higienização	Inspeção do projeto mecânico
Faixa de temperatura	Ambiente até 100 °C	Aquecimento de produto	Testes do sistema de aquecimento
Controle de temperatura	ON-OFF com histerese	Simplicidade, baixo custo e robustez	Validação por *firmware*
Sensor de temperatura	PT100	Elevada precisão e estabilidade	Leitura funcional pelo controlador
Controle de agitação	Motores CC com controle PWM	Ajuste contínuo de velocidade	Ensaios funcionais
Interface com operador	Display LCD e botões	Configuração local dos parâmetros	Testes de operação
Monitoramento de nível	Sensor por eletrodos	Proteção contra operação s/ água	Ensaios de bancada
Alimentação do controle	5 VCC / 24 VCC	Compatibilidade c/ eletrôn. embarcada	Teste funcional

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

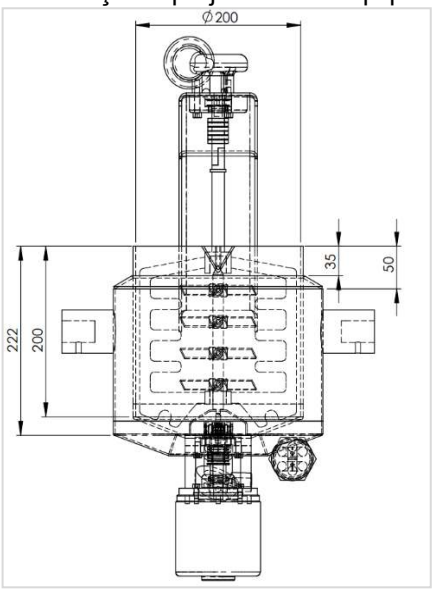
A construção do equipamento foi realizada com chapas de aço inoxidável AISI 316L nas regiões em contato direto com os reagentes, enquanto o aço inoxidável AISI 304 foi empregado nas demais estruturas, visando assegurar condições adequadas de higiene e minimizar a ocorrência de reações indesejadas. Adicionalmente, as superfícies internas e externas foram submetidas a polimento mecânico, com o objetivo de aumentar a durabilidade do sistema e facilitar os procedimentos de limpeza e sanitização.

O desenvolvimento iniciou-se com a modelagem do equipamento em software CAD, definindo dimensões e parâmetros de montagem. O reator resultante possui volume de 5 litros, 222 mm de altura, 200 mm de diâmetro e peso aproximado de 20 kg. Também foi projetada uma base estrutural de 1000 mm de largura e 1300 mm de altura para suportar o conjunto (Figura 1).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

Figura 1: Esboço do projeto 2D do equipamento.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.1. Construção do Equipamento

Nesta etapa, foi iniciada a fabricação física do equipamento. Primeiramente, as chapas de aço inoxidável foram conformadas em formatos cilíndricos interno e externo por meio de processo de calandragem. Em seguida, as extremidades foram unidas por meio de soldagem do tipo MIG, garantindo a integridade estrutural do conjunto, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2: Montagem 3D do reator e suporte



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

As chapas utilizadas apresentam espessuras de 3 mm para o costado interno e 2 mm para a camisa externa. Após a montagem do cilindro interno, procedeu-se à soldagem da camisa externa, formando um espaço anular destinado à circulação de água quente ou fria, utilizado no controle térmico do processo. Na região superior do equipamento foi instalado um sistema dosador responsável pela descarga do produto, permitindo inclinação de até 140°. O conjunto é suportado por uma base metálica estrutural, a qual também incorpora compartimentos destinados ao armazenamento, conforme ilustrado na estrutura interna da base.

Para o sistema de aquecimento, foram projetadas duas entradas destinadas à instalação de resistências elétricas posicionadas entre o costado interno e a camisa externa, de forma a evitar o contato direto com o produto processado, assegurando condições adequadas de higiene e sanitização. A medição de temperatura é realizada por meio de um sensor do tipo PT100, instalado na região inferior do tanque e em contato direto com o meio reacional, possibilitando a obtenção de leituras precisas durante a operação do sistema.

O sistema de agitação é composto por um agitador central dotado de dois conjuntos de impulsores, sendo um impulsor do tipo âncora, destinado a aplicações envolvendo fluidos de média e alta viscosidade, e um conjunto de pás inclinadas internas, utilizado para condições de baixa e média viscosidade, conforme recomendações para adequada homogeneização do sistema (LEVENSPIEL, 2000; HAYES, 2001). Esse conjunto é acionado por um motor com redutor montado na tampa superior do equipamento. Adicionalmente, foi implementado um segundo sistema de agitação do tipo turbina, acionado por um motor de corrente contínua de 24 VCC e potência de 250 W, instalado na região inferior do tanque, com vedação garantida por meio de selo mecânico.

O sistema de controle térmico opera por meio da circulação de água entre o costado interno e a camisa externa do tanque. No modo de aquecimento, o fluido permanece confinado nesse interstício e é aquecido por meio das resistências elétricas instaladas no sistema. Já na etapa de resfriamento, ocorre a renovação contínua da água, sendo o processo regulado por uma válvula solenoide e

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

supervisionado por um sensor de nível, garantindo o controle adequado das condições térmicas de operação.

Após a conclusão da fabricação mecânica e da montagem dos principais componentes do equipamento, foram conduzidas etapas de validação compatíveis com o estágio de desenvolvimento do protótipo. Os ensaios experimentais concentraram-se na verificação funcional do sistema eletrônico de controle, incluindo a leitura do sensor de temperatura PT100, o monitoramento do sensor de nível, o acionamento das resistências elétricas, válvulas e motores por meio dos respectivos circuitos de interface, bem como a validação da lógica de controle implementada no microcontrolador ATmega328P. Parte desses testes foi realizada em bancada, utilizando cargas e dispositivos representativos do sistema final, permitindo verificar a correta integração entre *hardware* e *firmware* antes da operação completa do equipamento. Dessa forma, a presente pesquisa caracteriza-se como uma validação funcional do módulo de automação e de seus subsistemas, enquanto a avaliação integrada do reator operando continuamente com fluidos reais constitui uma etapa subsequente do desenvolvimento tecnológico.

3.2. Desenvolvimento do sistema de controle eletrônico

O sistema proposto é constituído por uma integração entre elementos de hardware e software, podendo ser dividido em três etapas principais: o projeto e a simulação do circuito eletrônico, o desenvolvimento e a fabricação da placa de circuito impresso (PCB) e a implementação do firmware no microcontrolador. Essa estrutura modular permite maior organização do processo de desenvolvimento, além de facilitar a validação e a implementação do sistema como um todo.

A Figura 3 apresenta a arquitetura geral do sistema proposto, evidenciando a integração entre os principais componentes e os elementos de entrada e saída conectados ao controlador eletrônico. Adicionalmente, são descritos os principais componentes de hardware empregados no desenvolvimento do sistema, os quais compõem a estrutura física e funcional do projeto.

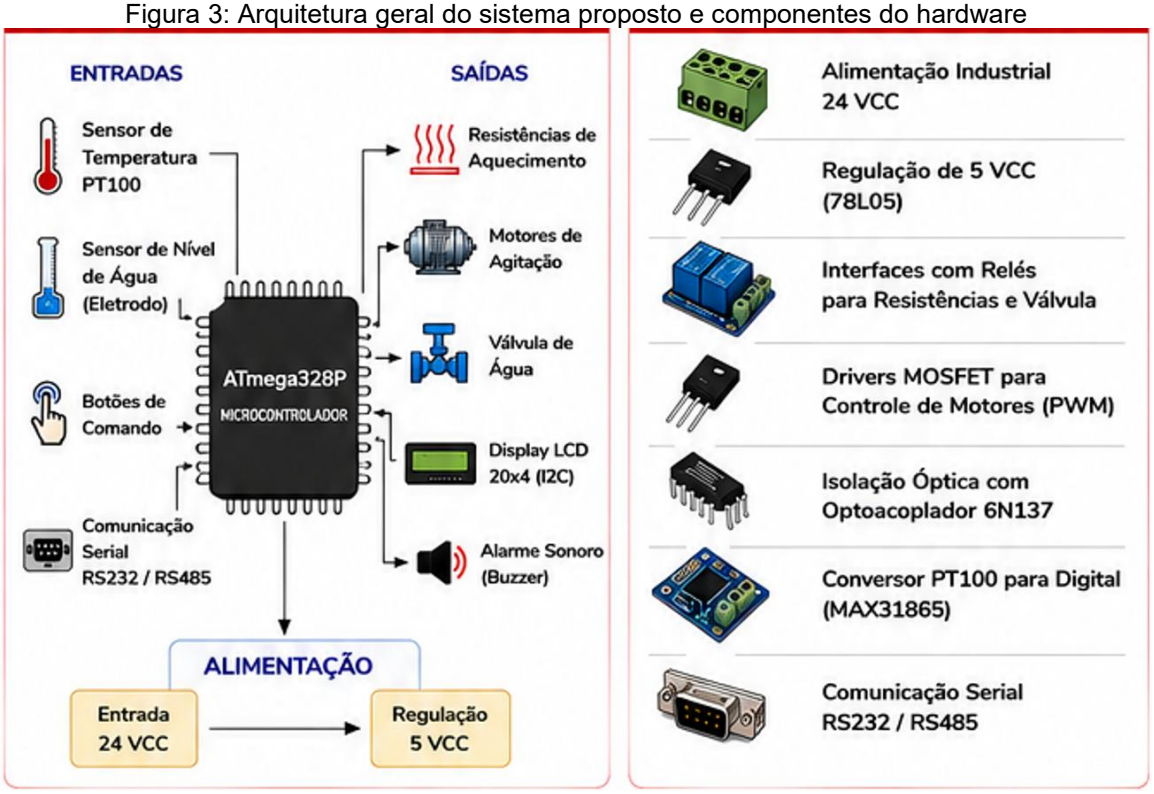
O sistema proposto é constituído por uma arquitetura integrada de hardware e software, a qual pode ser dividida em três etapas principais: o projeto e a simulação

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

do circuito eletrônico, a fabricação da placa de circuito impresso (PCB) e o desenvolvimento do firmware do microcontrolador

Figura 3: Arquitetura geral do sistema proposto e componentes do hardware



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A estrutura geral dessa configuração é apresentada na Figura 4, a qual ilustra de forma simplificada os principais elementos de entrada e saída conectados ao sistema de controle.

O circuito eletrônico desenvolvido tem como elemento central o microcontrolador ATmega328P, uma plataforma de 8 bits que dispõe de oito entradas analógicas e quatorze pinos de entrada/saída digitais, sendo seis deles capazes de operar como saídas PWM. Adicionalmente, o dispositivo integra interfaces de comunicação serial e conversores analógico-digitais (ADC) com resolução de 10 bits, ampliando sua capacidade de aquisição e processamento de sinais (BLUM, 2016).

A seleção do microcontrolador ATmega328P foi realizada considerando os requisitos funcionais do sistema proposto, cujo objetivo consiste no desenvolvimento

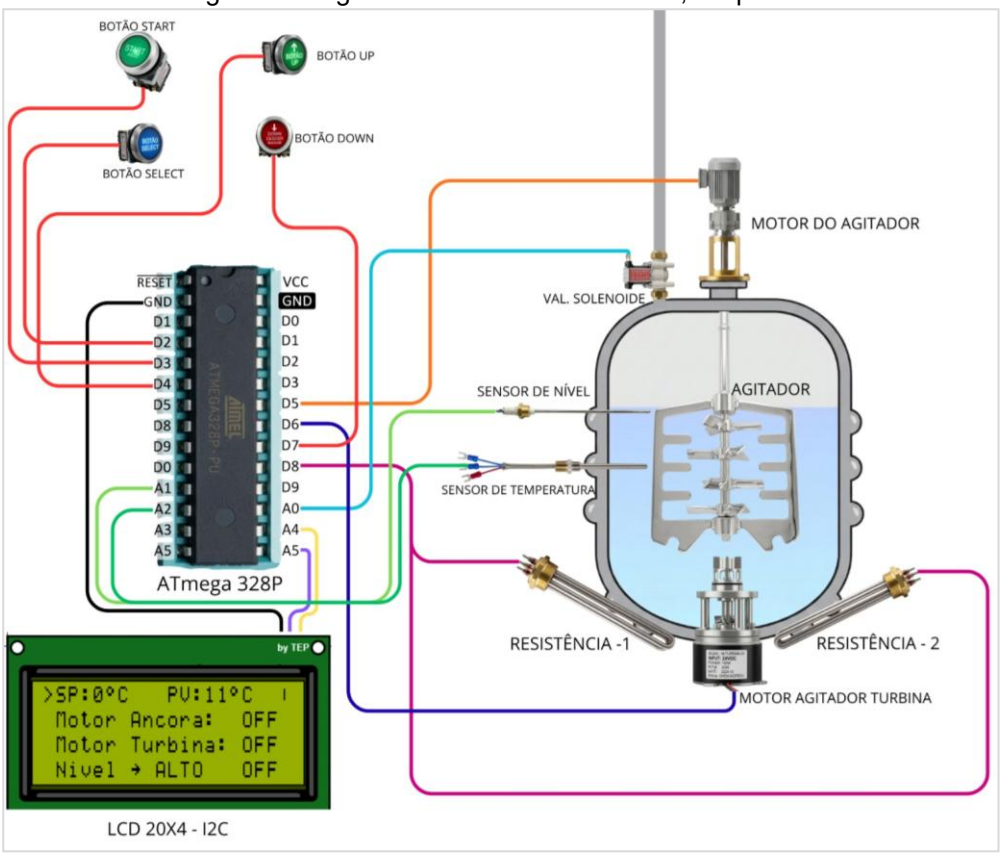
REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

de um módulo de automação de baixo custo destinado à operação de um tanque de mistura em escala piloto. Esse dispositivo apresenta capacidade computacional compatível com as funções de aquisição de sinais, processamento de algoritmos de controle, acionamento de atuadores e interfaceamento com dispositivos de comunicação, atendendo às necessidades da aplicação sem demandar recursos de processamento mais complexos. Embora CLPs apresentem elevada robustez, certificações industriais e recursos avançados de diagnóstico, sua utilização implica custos significativamente superior, tanto em *hardware* quanto em *software* e expansão de módulos de entrada e saída.

Conectados ao microcontrolador, encontram-se diversos periféricos de entrada, incluindo um sensor de nível do tipo eletrodo, botões de acionamento utilizados para configuração e comandos operacionais, um sensor de temperatura do tipo termorresistência (PT100) e uma interface de comunicação serial padrão RS232/485.

Figura 4: Diagrama do sistema controlado, simplificado.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

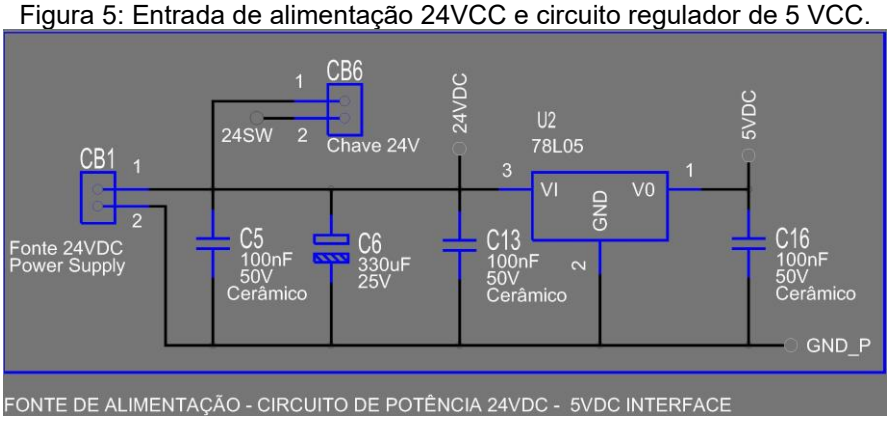
Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

Os dispositivos de saída controlados pelo ATmega328P são compostos por dois circuitos de acionamento (drivers) para controle dos motores por meio de modulação por largura de pulso (PWM), um display LCD alfanumérico 4x20 com comunicação via protocolo I2C, um sinalizador sonoro do tipo *buzzer* ativo e três circuitos de interface com relés eletromecânicos destinados ao acionamento das resistências de aquecimento e da válvula de entrada de água.

Com o objetivo de melhor descrever o hardware de controle proposto neste trabalho, são apresentados a seguir os principais blocos que compõem o circuito eletrônico. Considerando que o projeto foi desenvolvido visando atender padrões industriais, foi adotada uma alimentação de entrada de 24 VCC, em conformidade com os níveis de extrabaixa tensão.

Um regulador de tensão linear integrado do tipo 78L05 é empregado para a obtenção de 5 VCC estabilizados, responsáveis pela alimentação de todo o circuito de controle. Ressalta-se que a linha de 24 VCC é utilizada para o acionamento dos motores do misturador e da turbina, enquanto a alimentação em 220 VCA é destinada às resistências de aquecimento. O respectivo circuito é apresentado na Figura 5.

Figura 5: Entrada de alimentação 24VCC e circuito regulador de 5 VCC.



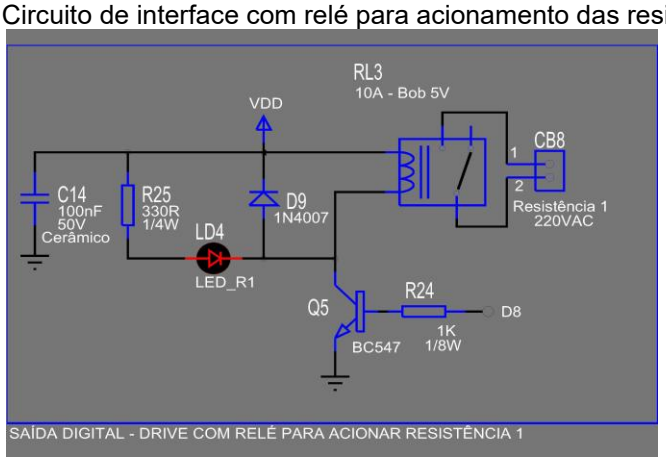
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O circuito de acionamento das resistências é implementado por meio de relés eletromecânicos, conforme ilustrado na Figura 6. Nesse estágio, o transistor bipolar de junção (TBJ) do modelo BC547 é utilizado como elemento de chaveamento, atuando na interface entre o circuito de controle e o circuito de potência, promovendo o devido isolamento elétrico entre essas etapas (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

Figura 6: Circuito de interface com relé para acionamento das resistências.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Operando como diodo de roda livre (do inglês, *Freewheeling diode FWD*), o diodo D9 tem a função de fornecer um caminho alternativo para a corrente armazenada na bobina durante o desligamento do transistor bipolar de junção (TBJ). A ausência desse componente pode ocasionar danos ao transistor, uma vez que a força contra eletromotriz gerada pelo indutor pode atingir valores significativamente superior à tensão de alimentação do circuito (MALVINO; BATES, 2011).

O resistor R25 é utilizado como elemento limitador de corrente para o Led (LD4) e pode ser calculado através da Equação (10):

$$R_{Led} = \frac{V_{DD} - V_{Led}}{I_{Led}} \quad (10)$$

Onde:

$R_{Led} =$ resistor limitador de corrente do led;

$V_{DD} =$ tensão de alimentação do circuito de controle (5V);

$V_{Led} =$ queda de tensão direta do led;

$I_{Led} =$ corrente do led (Tip. entre 10 e 20mA).

O resistor da base do TBJ (R24) tem o valor definido para garantir a saturação, de acordo com as Equações (11), (12), e (13):

$$\mathrm{I_c} = \mathrm{I_{Led}} + \mathrm{I_{bob}} \quad (11)$$

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

$$I_B = \frac{I_c}{B_{eta}} \quad (12)$$

$$R_{base} = \frac{V_{in} - V_{BE}}{I_B} \quad (13)$$

Onde:

I_c = corrente de coletor do transistor BJT;

I_{Led} = corrente que vem do ramo do led LD4;

I_{bob} = corrente que vem do ramo da bobina;

I_B = corrente de base / corrente saída do uC;

B_{eta} = ganho do projetista (Tip. entre 10 e 30);

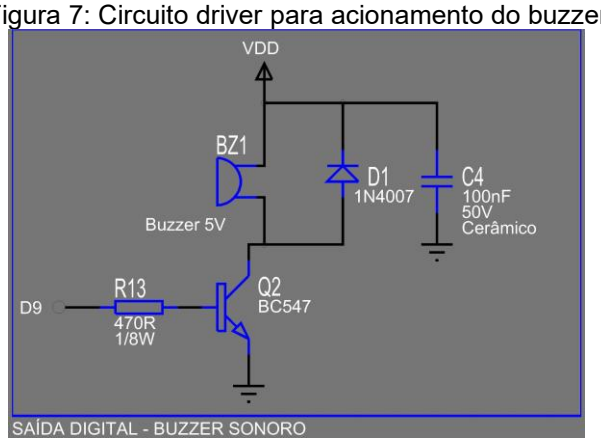
R_{base} = resistência de base do transistor BJT Q5;

V_{in} = tensão de saída do uC ou entrada de R24;

V_{BE} = queda de tensão da junção base − emissor.

O *buzzer* é utilizado como elemento de sinalização sonora, sendo acionado por meio de um circuito driver baseado em transistor BJT, com o objetivo de reduzir a corrente exigida da saída digital do microcontrolador e garantir a adequada proteção do pino de controle, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7: Circuito driver para acionamento do buzzer.



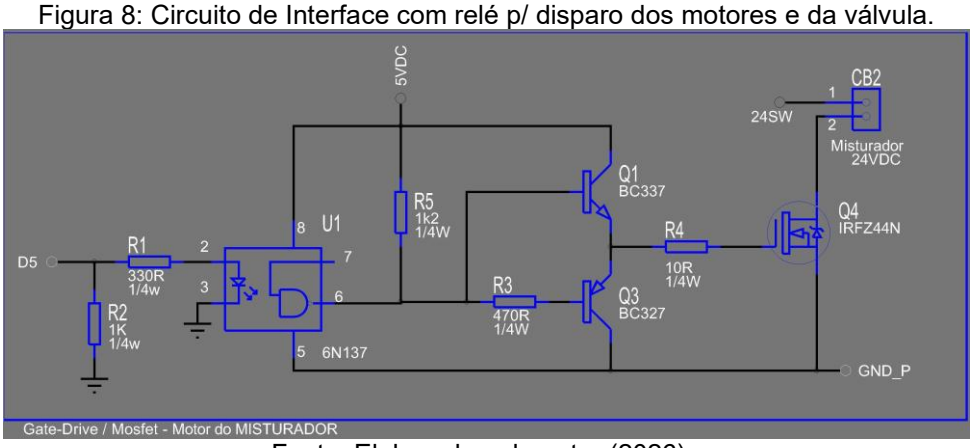
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A configuração do circuito de controle responsável pelo acionamento dos motores de corrente contínua, utilizados no sistema de mistura e na turbina, é apresentada na Figura 8.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

Figura 8: Circuito de Interface com relé p/ disparo dos motores e da válvula.

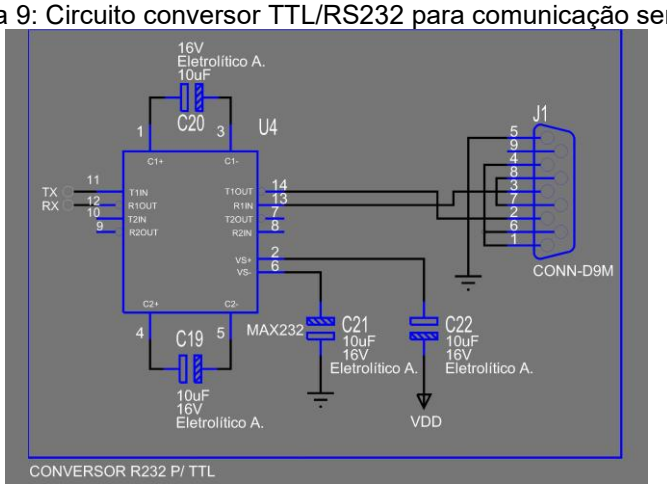


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O arranjo proposto emprega um transistor MOSFET de potência como elemento de chaveamento, sendo seu sinal de acionamento condicionado por dois transistores bipolares de junção (TBJs), identificados como Q1 e Q3, que atuam na interface de comando do estágio de potência.

Com o objetivo de preservar a integridade do estágio lógico, o sinal de modulação por largura de pulso (PWM) é isolado galvanicamente do circuito de potência por meio do optoacoplador 6N137, o qual possui capacidade de operação em taxas de transmissão de até 10 MBd (VISHAY, 2016). A utilização do transistor MOSFET é justificada por sua aptidão para comutação em altas frequências e por apresentar baixa dissipação de potência, contribuindo para o aumento da eficiência global do sistema (AHMED, 2000; RASHID, 1999). A estrutura da interface de comunicação serial, baseada no protocolo RS232, é apresentada na Figura 9.

Figura 9: Circuito conversor TTL/RS232 para comunicação serial.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

No que se refere ao subsistema de monitoramento de nível por eletrodos, foi adotada a implementação de um *shield* dedicado, conforme ilustrado na Figura 10. Essa arquitetura integra um comparador de tensão responsável pelo condicionamento e processamento do sinal analógico proveniente dos eletrodos, permitindo a detecção adequada do nível do fluido no sistema.

Figura 10: *Shield* eletrônico para sensor de nível para eletrodo.

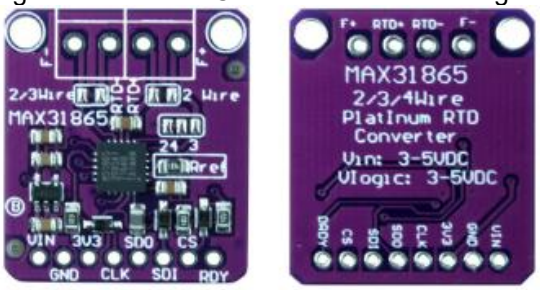


Fonte: Acervo dos autores (2026).

A integração do sensor PT100 ao sistema é realizada por meio de um módulo conversor para RTD (*Resistance Temperature Detector*), conforme apresentado na Figura 11. Esse subsistema emprega o circuito integrado MAX31865, responsável por converter a variação de resistência característica do sensor analógico do tipo PT100 em um sinal digital proporcional à temperatura medida.

A transferência dessas informações ao controlador central ocorre por meio do protocolo de comunicação SPI (*Serial Peripheral Interface*), o que proporciona maior robustez ao sistema, com elevada imunidade a ruídos e confiabilidade na transmissão de dados.

Figura 11: Módulo Conversor RTD Para Digital.



Fonte: Acervo dos autores (2026).

Após a etapa de elaboração do esquema eletrônico, foi desenvolvido o layout da placa de circuito impresso (PCI), conforme apresentado na Figura 12. Em

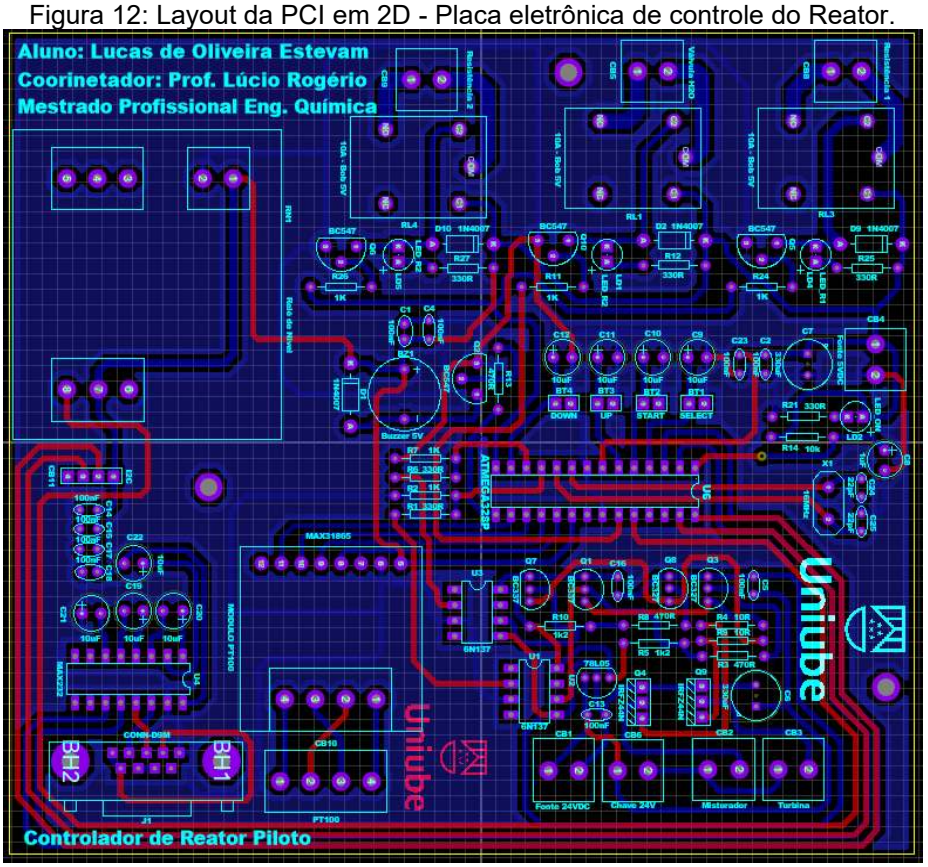
REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

seguida, a placa foi submetida aos processos de fabricação e montagem, incorporando todos os componentes eletrônicos que compõem o sistema proposto.

O protótipo foi implementado em uma arquitetura de dupla face (*double-layer*), com trilhas distribuídas em ambas as faces da placa e utilização de furos metalizados, além da aplicação de máscara de solda com o objetivo de proporcionar proteção mecânica e galvânica. Para o interfaceamento dos sinais de controle e dos circuitos de potência, foram utilizados conectores do tipo borne, garantindo conexões mais seguras e confiáveis entre os módulos do sistema.

Figura 12: Layout da PCI em 2D - Placa eletrônica de controle do Reator.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Um aspecto relevante no desenvolvimento do hardware consiste na utilização do microcontrolador ATmega328P de forma independente, em substituição ao uso de plataformas de prototipagem pré-montadas, como o Arduino. Embora o emprego de módulos de desenvolvimento seja amplamente difundido em etapas iniciais de projeto, a integração direta do componente à placa de circuito impresso (PCI) foi adotada por apresentar vantagens significativas para a aplicação proposta.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

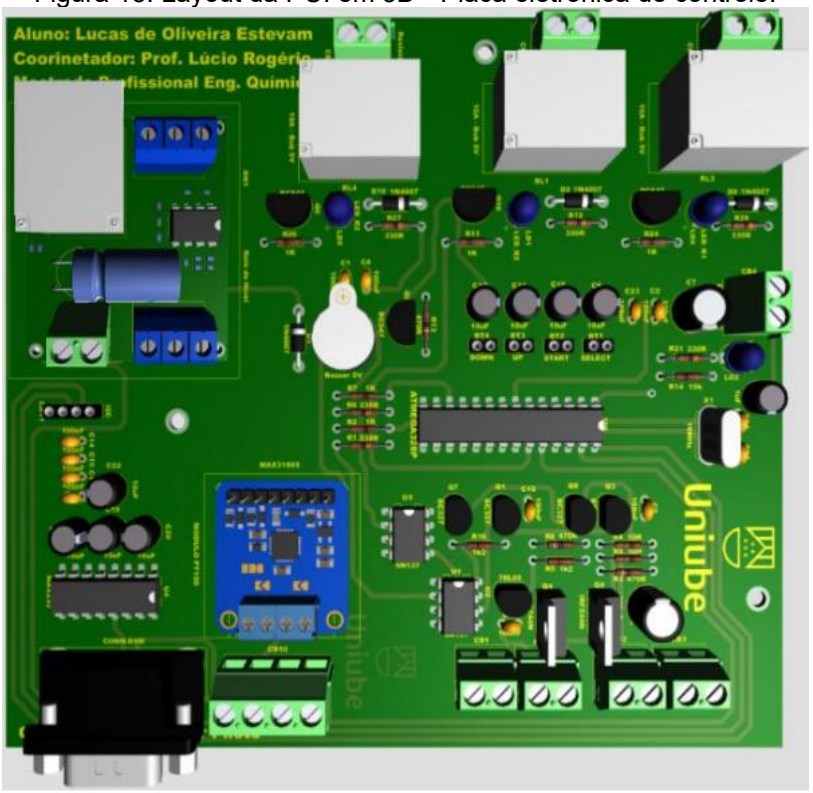
Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

Entre os principais benefícios dessa abordagem, destacam-se:

- Otimização de espaço: possibilita a redução da área ocupada pelo circuito, permitindo uma disposição mais compacta e eficiente dos componentes;
- Viabilidade econômica: contribui para a redução do custo final da unidade de controle, ao eliminar recursos e periféricos adicionais presentes em plataformas comerciais;
- Rigor de projeto: confere ao sistema um caráter mais próximo de soluções industriais, aumentando o nível de robustez e adequação a requisitos de engenharia e confiabilidade.

A modelagem tridimensional do layout do sistema é apresentada na Figura 13, enquanto a placa física em processo de montagem e soldagem dos componentes é exibida na Figura 14. No modelo representado na Figura 13, o microcontrolador ATmega328P é identificado pelo circuito integrado em encapsulamento DIL28, posicionado na região central da placa de circuito impresso.

Figura 13: Layout da PCI em 3D - Placa eletrônica de controle.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

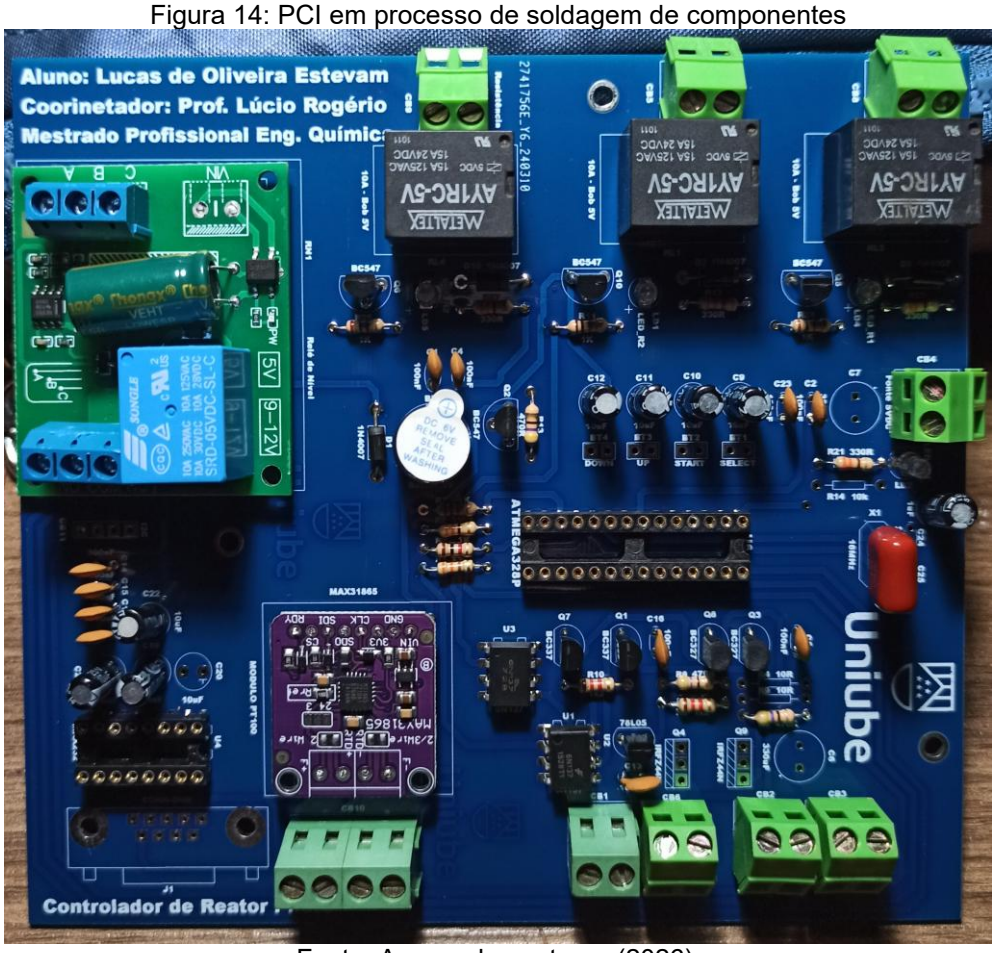
REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

A programação do microcontrolador ATmega328P foi realizada por meio do ambiente de desenvolvimento integrado (*Integrated Development Environment – IDE*) Arduino (MONK, 2017). Trata-se de uma plataforma de código aberto (open source) que oferece uma interface simplificada baseada na linguagem C++, além de disponibilizar um amplo conjunto de bibliotecas e ferramentas que auxiliam no processo de desenvolvimento, depuração e transferência do código para o hardware embarcado.

O firmware desenvolvido é responsável pelo gerenciamento integral das funcionalidades do sistema, realizando a aquisição dos sinais provenientes dos dispositivos de entrada, como sensores e botões, e executando o controle dos atuadores e elementos de saída. Entre esses dispositivos, destacam-se os motores, as resistências de aquecimento, as válvulas de controle de fluxo e o display LCD, os quais são operados de forma coordenada pelo microcontrolador.

Figura 14: PCI em processo de soldagem de componentes



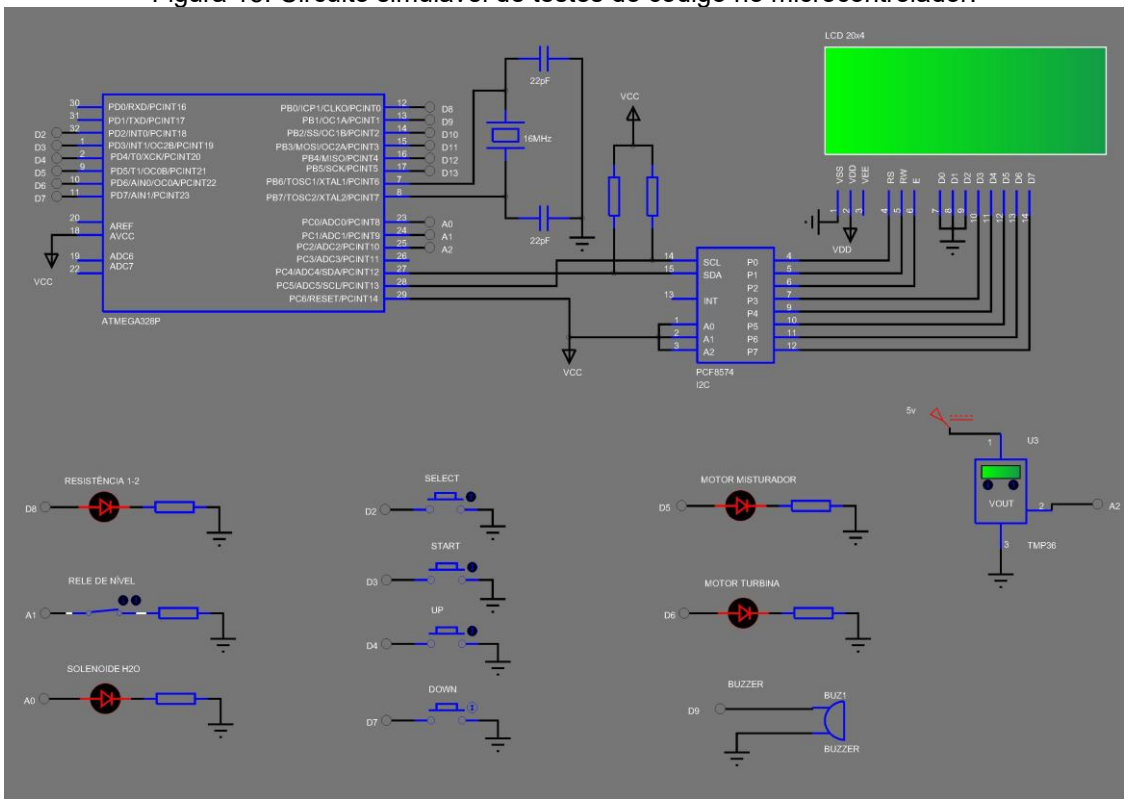
Fonte: Acervo dos autores (2026).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

A metodologia adotada no desenvolvimento seguiu um ciclo iterativo de melhorias e ajustes implementados por meio de programação. Antes da fabricação da placa de circuito impresso (PCI), a arquitetura lógica do sistema foi validada por meio de testes em ambiente de simulação, com o objetivo de garantir a consistência e a integridade do projeto. O esquema eletrônico utilizado na simulação do firmware é apresentado na Figura 15.

Figura 15: Circuito simulável de testes do código no microcontrolador.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

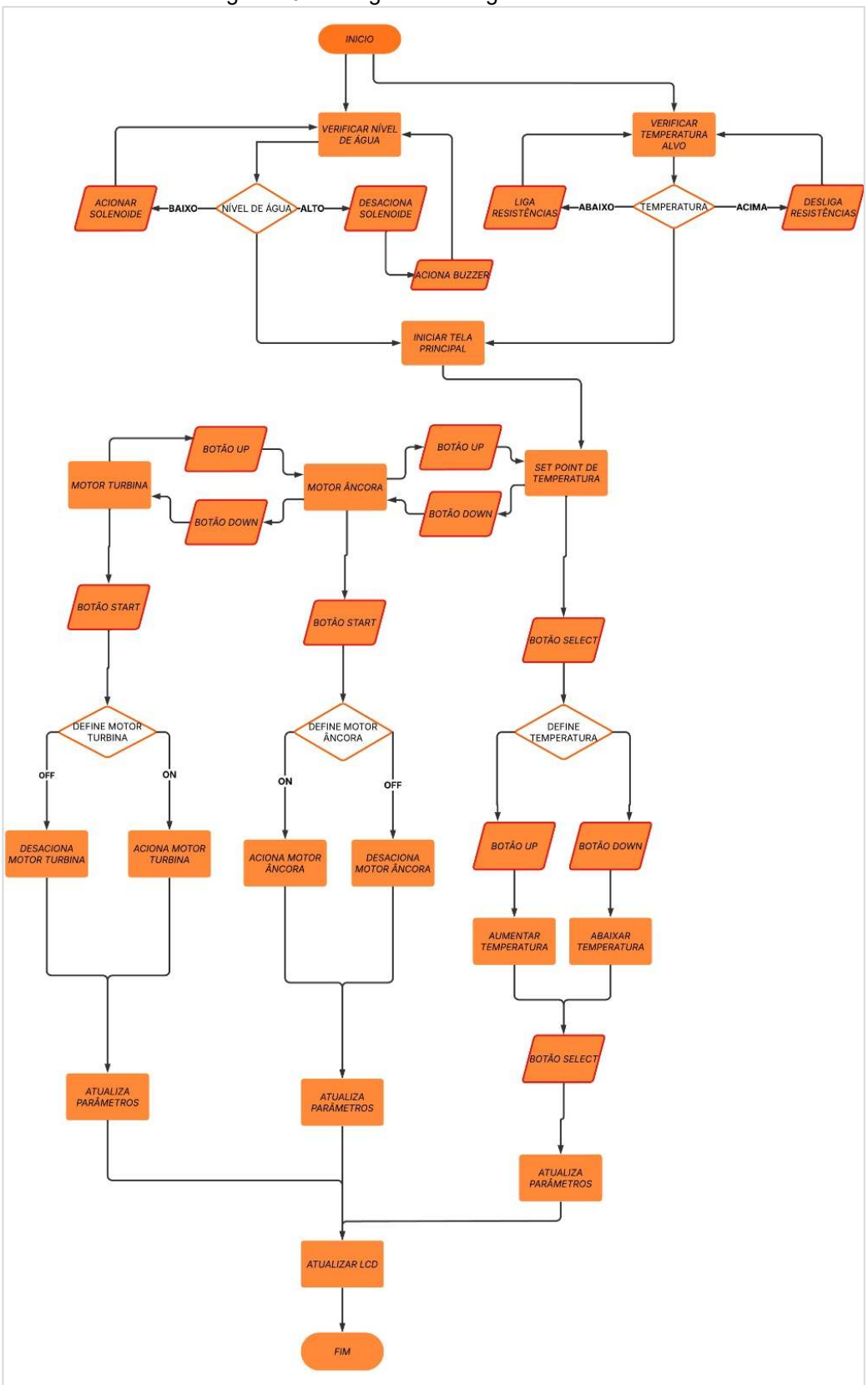
Na Figura 16 é apresentado um fluxograma simplificado do algoritmo de controle implementado no microcontrolador ATmega328P. O sensor de nível do tipo eletrodo garante que o reator opere apenas com presença de água na camisa do tanque; caso contrário, a válvula diafragma é acionada pela saída A0 até atingir o nível adequado.

Por meio dos botões *UP* e *DOWN*, é possível selecionar funções e parâmetros, enquanto o botão *START* habilita a operação. A temperatura de referência (*set point*) também pode ser ajustada pelo usuário por meio dos mesmos botões.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

Figura 16: Fluxograma do algoritmo resumido.



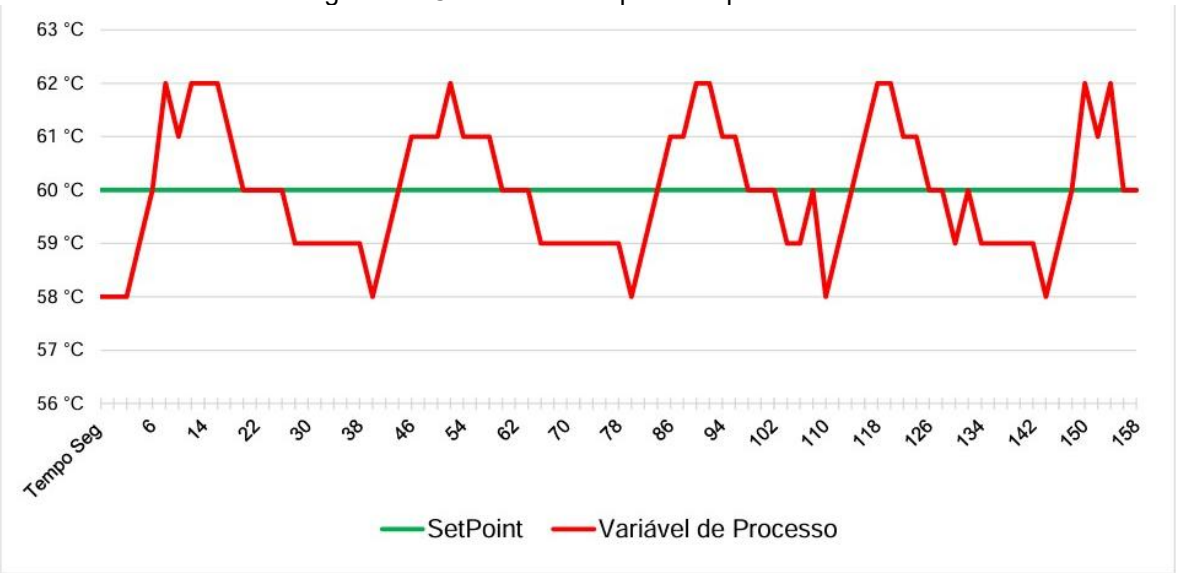
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

O controle de temperatura é realizado por meio de uma estratégia do tipo liga-desliga (*ON-OFF*) com histerese, garantindo uma faixa de variação aproximada de 2°C, conforme ilustrado na Figura 17. As resistências de aquecimento são comandadas por uma única saída do microcontrolador e alimentadas em 220 VCA.

Figura 27: Controle de temperatura por histerese



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Durante os testes funcionais realizados em bancada foi verificada a correta atuação da lógica de controle, incluindo a leitura contínua da temperatura, o acionamento das resistências, a indicação das condições operacionais no display LCD e o disparo do alarme sonoro para condições de temperatura acima do limite de segurança previamente estabelecido. Esses ensaios tiveram como objetivo validar o funcionamento do algoritmo embarcado e a integração entre sensores, atuadores e *firmware*.

Ressalta-se que a caracterização quantitativa do desempenho térmico do equipamento, envolvendo parâmetros como tempo de aquecimento, tempo de resfriamento, sobressinal (*overshoot*), erro em regime permanente e estabilidade térmica para diferentes condições de operação, não constitui o objetivo desta etapa do desenvolvimento. Esses ensaios serão realizados após a integração definitiva do módulo eletrônico ao reator físico, permitindo a avaliação do comportamento térmico do sistema completo sob condições reais de operação.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

3.3. Considerações sobre segurança elétrica e operacional

O desenvolvimento do sistema eletrônico considerou requisitos básicos de segurança elétrica compatíveis com a etapa de prototipagem do equipamento. A arquitetura adotada foi dividida em dois níveis de tensão: uma seção de baixa tensão, destinada ao processamento dos sinais do microcontrolador ATmega328P e dos sensores, alimentada em 5 VCC, e uma seção de potência responsável pelo acionamento das cargas em 24 VCC e 220 VCA.

O isolamento funcional entre os circuitos de controle e os dispositivos de potência foi realizado por meio de módulos de acionamento a relé, reduzindo o acoplamento direto entre a eletrônica embarcada e as cargas de maior potência. Além disso, a placa de circuito impresso foi projetada de forma a manter separação física entre as trilhas de baixa tensão e aquelas destinadas ao acionamento das cargas em corrente alternada, minimizando a possibilidade de interferências eletromagnéticas e aumentando a segurança operacional do sistema.

Como medida adicional de proteção, o *firmware* incorpora rotinas que impedem o acionamento das resistências elétricas na ausência de água na camisa térmica, condição monitorada continuamente pelo sensor de nível. Em situações de temperatura acima do limite estabelecido pelo usuário, o sistema interrompe automaticamente o aquecimento, aciona um alarme sonoro e apresenta uma mensagem de advertência na interface homem-máquina, contribuindo para a prevenção de condições anormais de operação.

Ressalta-se que o equipamento desenvolvido constitui um protótipo experimental destinado à pesquisa e ao desenvolvimento tecnológico. Dessa forma, aspectos relacionados à certificação normativa, compatibilidade eletromagnética, ensaios dielétricos, grau de proteção do painel e conformidade integral com normas aplicáveis à fabricação de máquinas industriais serão considerados em etapas futuras de aperfeiçoamento do projeto, quando da evolução para um produto destinado à operação contínua em ambiente industrial.

4. Resultados e Discussão

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

Neste capítulo são apresentados os resultados dos cálculos de potência do sistema de agitação do reator piloto, considerando as características geométricas do tanque, o tipo de impulsor utilizado, as propriedades do fluido e os regimes de escoamento envolvidos. Adicionalmente, é realizada uma análise do efeito do aumento da viscosidade do fluido, considerada dez vezes superior à da água, sobre a potência requerida pelo sistema.

4.1. Dados e Parâmetros Utilizados

Os cálculos foram realizados considerando os seguintes parâmetros corrigidos, conforme descrito no projeto do equipamento:

- Diâmetro interno do tanque (Dt): 0,200 m;
- Altura entre o fundo e o agitador (hf): 0,020 m;
- Diâmetro do agitador tipo âncora (Da): 0,195 m;
- Altura do líquido (H): 0,220 m;
- Densidade do fluido (ρ): 1000 kg/m³;
- Viscosidade do fluido (μ): 0,010 Pa·s (10× a viscosidade da água);
- Velocidade de rotação analisada (N): 45 rpm.

4.2. Metodologia de Cálculo

O cálculo da potência requerida baseia-se nas relações clássicas da agitação mecânica, considerando os números adimensionais de Reynolds (Re) e de potência (Po). As expressões utilizadas são apresentadas a seguir, correspondendo ao número de Reynolds (14), ao número de potência (15) e à potência requerida (16).

$$Re = \frac{(\rho \cdot N \cdot D^2)}{\mu} \tag{14}$$

$$Po = \frac{P}{(\rho \cdot N^3 \cdot D^5)} \tag{15}$$

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

$$P = Po \cdot \rho \cdot N^3 \cdot D^5 \quad (16)$$

Para fluidos altamente viscosos (escoamento laminar), pode-se adotar a forma simplificada da equação (17).

$$P = K \cdot \mu \cdot N^2 \cdot D^3 \quad (17)$$

onde K é uma constante dependente da geometria do impulsor

4.3. Cálculo do Número de Reynolds

Foi calculado o valor de Re considerando a velocidade de 45 rpm e a viscosidade do fluido 10 vezes maior que a da água (Tabela 2).

Tabela 2: Cálculo número de Reynolds

Velocidade (rpm)	**N (s^{-1})**	**Reynolds (Re)**
45	0,75	2852

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Considerando a classificação normalmente empregada para sistemas de agitação mecânica, o valor obtido caracteriza um regime de transição entre os escoamentos laminar e turbulento. Nessa faixa, os efeitos viscosos e inerciais influenciam simultaneamente o comportamento hidrodinâmico do sistema, justificando a utilização da correlação baseada no número de potência (Po) para a estimativa da potência requerida pelo agitador.

4.4. Cálculo da Potência

Os valores de potência obtidos na Tabela 3 correspondem à potência teórica requerida para a agitação do fluido nas condições geométricas e operacionais consideradas neste estudo. Para o impulsor tipo âncora, com diâmetro de 0,195 m e velocidade de rotação de 45 rpm, foram estimadas potências entre aproximadamente 0,036 W e 0,357 W, em função do número de potência adotado.

Esses resultados indicam que, do ponto de vista estritamente hidrodinâmico, a demanda energética para a mistura de um volume de aproximadamente 5 litros é

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

relativamente baixa. Entretanto, a seleção do motor de acionamento não deve ser baseada apenas na potência teórica calculada, pois a aplicação prática envolve fatores adicionais, como torque de partida, atrito mecânico, perdas no redutor, variações de viscosidade, possíveis cargas não newtonianas e margem de segurança operacional. O torque requerido no eixo do agitador pode ser estimado pela relação: (18):

$$T = \frac{P}{2\pi N} \tag{18}$$

onde T é o torque no eixo (N·m), P é a potência requerida (W) e N é a velocidade de rotação (s^{-1}). Considerando o valor máximo calculado de P = 0,357 W e N = 0,75 s^{-1}, obtém-se (19):

$$T = \frac{0{,}357}{2\pi \,.\, 0{,}75} = 0{,}076\ Nm \tag{19}$$

Embora o torque teórico estimado seja baixo, a adoção de um motor com potência nominal superior é recomendada para garantir operação estável, capacidade de partida sob carga, compensação de perdas mecânicas e possibilidade de operação com fluidos de maior viscosidade. Dessa forma, a faixa de potência nominal entre 10 W e 50 W foi mantida como recomendação de projeto para o sistema de acionamento, não como resultado direto do cálculo hidrodinâmico, mas como critério de engenharia voltado à robustez e confiabilidade operacional do equipamento.

Foram adotados valores típicos de Po na faixa de 0,3 ≤ Po ≤ 3,0 para o impulsor tipo âncora, de forma a avaliar a influência dessa constante sobre a potência calculada (Tabela 3).

Tabela 3: Regime esperado de acordo com a Potência

Número de Potência (Po)	Potência teórica (W)	Torque estimado (Nm)
0,3	0,0357	0,0076
1,0	0,1189	0,0252
3,0	0,3568	0,0757

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

Os resultados obtidos mostram potências teóricas de agitação inferiores a 3 W, coerentes com sistemas de pequeno volume. Contudo, a potência nominal do motor deve considerar fatores adicionais de projeto, como torque de partida, perdas mecânicas e margem de segurança operacional.

4.5. Discussão dos resultados

O desenvolvimento do sistema foi realizado em etapas sequenciais, incluindo a elaboração do esquemático eletrônico, a simulação dos circuitos, o projeto e a fabricação da placa de circuito impresso (PCI), o desenvolvimento do firmware, a montagem dos componentes eletrônicos, a energização do sistema e a execução de testes de bancada. Após a conclusão dessas fases, foram realizados testes de integração entre os elementos eletroeletrônicos do reator e o módulo de controle, sendo inicialmente utilizado um protótipo físico simplificado para representar o sistema do equipamento.

A análise do número de Reynolds indicou que o fluido opera em uma faixa de transição entre os regimes laminar e turbulento, tornando o escoamento sensível a variações de viscosidade e velocidade de agitação. Os cálculos de potência evidenciaram baixo consumo energético do sistema, bem como capacidade adequada para a homogeneização de líquidos com viscosidade até dez vezes superior à da água. Para aplicações envolvendo fluidos mais densos ou com comportamento não newtoniano, recomenda-se a adoção de motores com maior torque e sistemas de controle de velocidade mais robustos. Os resultados obtidos validam a metodologia de dimensionamento empregada e confirmam a coerência entre as dimensões do tanque, a seleção dos impulsores e a potência requerida para uma operação de mistura eficiente.

No processo de homogeneização, a combinação dos impulsores do tipo âncora e turbina proporcionou uma mistura eficiente em diferentes faixas de viscosidade, sem a formação significativa de aglomerados. O emprego de motores controlados por modulação por largura de pulso (PWM) permitiu o ajuste preciso da rotação, ampliando a flexibilidade operacional do sistema. O microcontrolador ATmega328P, em conjunto com o circuito eletrônico desenvolvido, apresentou desempenho

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

confiável no acionamento de motores, relés, válvulas e sensores.

No controle térmico, o sistema manteve a temperatura dentro da faixa especificada, por meio do acionamento de resistências elétricas associado ao sensor PT100 de alta precisão. A estratégia de controle do tipo *ON-OFF* com histerese garantiu estabilidade térmica adequada, enquanto o sistema de resfriamento, baseado no uso de válvula solenoide e fluxo contínuo de água, apresentou boa eficiência na redução da temperatura.

A interface homem-máquina (IHM) desenvolvida apresentou operação intuitiva, permitindo ao usuário a configuração prática e eficiente de parâmetros como temperatura, velocidade de agitação e tempos de processo. Adicionalmente, o sistema eletrônico demonstrou robustez e capacidade de expansão, possibilitando futuras implementações, como a integração com sistemas supervisórios por meio de comunicação serial RS232.

Embora parte dos testes tenha sido realizada em bancada devido à indisponibilidade do reator físico completo nesta etapa do trabalho, os resultados obtidos indicam que o controlador eletrônico desenvolvido atende aos requisitos de projeto, apresentando operação funcional, confiável e segura. Dessa forma, o tanque de mistura automatizado demonstrou-se uma alternativa eficiente, versátil e economicamente viável para aplicações experimentais nos setores químico, cosmético e farmacêutico, além de apresentar potencial para futuras aplicações em escala industrial.

Durante os ensaios de bancada foram avaliadas as principais funcionalidades do módulo eletrônico desenvolvido, visando verificar a integração entre *hardware* e *firmware* e o correto funcionamento dos dispositivos de entrada e saída. Os testes contemplaram a leitura do sensor de temperatura PT100, o monitoramento do sensor de nível, o acionamento das resistências elétricas, o controle dos motores por modulação por largura de pulso (PWM), o acionamento da válvula solenoide e a operação da interface homem-máquina (IHM). Todos os comandos enviados pelo microcontrolador foram executados conforme a lógica implementada no *firmware*, não sendo observadas falhas de comunicação entre os módulos durante os ensaios realizados.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

Embora o presente trabalho não tenha como objetivo a caracterização metrológica do sistema de controle, os testes permitiram confirmar a repetibilidade do funcionamento dos principais subsistemas eletrônicos e a correta execução da sequência operacional prevista no algoritmo de controle. Dessa forma, os resultados obtidos demonstram a viabilidade técnica da arquitetura eletrônica proposta como plataforma de automação para tanques de mistura em escala piloto.

5. Conclusão

O sistema automatizado para controle de tanque de mistura multiprocessos por batelada foi projetado, desenvolvido e validado de acordo com os objetivos propostos, apresentando desempenho funcional, confiável e satisfatório durante os testes realizados. A adoção do microcontrolador ATmega328P, associada ao uso de componentes de ampla disponibilidade comercial, ferramentas de programação de código aberto e uma arquitetura de implementação simplificada, demonstrou-se uma alternativa tecnicamente viável e economicamente competitiva quando comparada aos sistemas convencionais de automação industrial baseados em Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), Interfaces Homem-Máquina (IHMs) e instrumentação industrial dedicada.

Os resultados obtidos evidenciaram a eficiência do sistema no controle de variáveis fundamentais do processo, como temperatura, velocidade de agitação e acionamento de dispositivos eletroeletrônicos. Os ensaios funcionais confirmaram o correto funcionamento da estratégia de controle térmico implementada, validando a lógica de acionamento das resistências, a leitura do sensor PT100 e os mecanismos de supervisão e proteção. A caracterização quantitativa do desempenho térmico do equipamento constitui uma etapa futura do desenvolvimento do protótipo. Adicionalmente, a interface homem-máquina desenvolvida proporcionou operação intuitiva e facilidade na configuração dos parâmetros do processo.

O equipamento desenvolvido apresenta potencial de aplicação em pequenas empresas dos setores químico, cosmético e farmacêutico, contribuindo para o aumento da produtividade, a melhoria da qualidade dos produtos e a redução dos custos de implantação e operação. Dessa forma, o presente trabalho evidencia que

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

tecnologias acessíveis e de baixo custo pode ser empregadas de maneira eficiente no desenvolvimento de soluções automatizadas voltadas a processos industriais.

Embora o protótipo tenha incorporado mecanismos básicos de proteção elétrica e operacional, sua utilização permanece destinada ao ambiente de pesquisa e desenvolvimento, sendo necessária a realização de ensaios de conformidade normativa e certificação de segurança para aplicações industriais permanentes.

Por fim, a continuidade deste trabalho permitirá a integração completa do módulo eletrônico a uma planta física, bem como a implementação de novos recursos ao sistema de controle, incluindo comunicação serial, integração com sistemas supervisórios e a adoção de estratégias de controle mais avançadas.

Referências

AHMED, A. Eletrônica de potência. São Paulo: Prentice Hall, 2000. 479 p.

BLUM, J. Explorando o Arduino: técnicas e ferramentas para mágicas de engenharia. 1. ed. Rio de Janeiro: Alta Books, 2016. 386 p.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos. 11. ed. São Paulo: Pearson, 2013. 766 p.

GUARNIERI, M. The roots of automation before mechatronics. IEEE Industrial Electronics Magazine, v. 4, n. 2, p. 42-43, jun. 2010.

HAYES, Robert E. Introduction to chemical reactor analysis. 1st ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2001. 436 p.

LEVENSPIEL, Octave. Engenharia das reações químicas. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2000. 565 p.

MALVINO, Albert; BATES, David J. Eletrônica. 7. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2011. 672 p.

MENEGALLI, F. C.; TELIS, V. R. N.; ROMERO, J. T. Operações Unitárias na Indústria de Alimentos. Capítulo 5: Bombeamento, agitação e mistura de fluidos alimentícios**.** 1 ed. Ed. São Paulo: Editora LTC, 2016. 690 p.

MONK, Simon. Programação com Arduino: começando com sketches. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2017. 148 p.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 10/06/2026 - **Accepted:** 12/07/2026
Vol: 13.15
DOI: 10.66104/hjxqks85
Pages: 1-35

PECKOL, J. K. Embedded Systems: A Contemporary Design Tool. 1 Ed. John Wiley & Sons, 2019. 900p

RASHID, Muhammad H. Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações. São Paulo: Makron Books, 1999. 327 p.

RESENDE, W. J. F. et al. Desenvolvimento de um sistema para monitoramento e controle patrimonial utilizando RFID e dispositivos IoT. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 7, p. 67357-67368, jul. 2021.

ROBERTS, G. W. Reações Químicas e Reatores Químicos. 1. ed. São Paulo: Editora LTC, 2010. 432 p.

SANDEEP, V. et al. Global accessible machine automation using Raspberry Pi. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN COMPUTING, COMMUNICATIONS AND INFORMATICS (ICACCI), 2015. Proceedings... [S.l.: s.n.], 2015. p. 1144-1147. DOI: 10.1109/ICACCI.2015.7275764.

SANTOS, R. J. dos; ROGERIO JUNIOR, L. Desenvolvimento e construção de um datalogger aplicado ao monitoramento de temperatura e umidade do ar de uma granja cunícula. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 12, n. 4, p. 246-256, 2020.

SANTOS, V. A.; VASCONCELOS E.C. Extrapolação de Dados Cinéticos obtidos em reatores químicos homogêneos**.** 1 Ed. Pernambuco: Revista Química & Tecnologia, 2002. 19 p.

STENZEL, J. From Relay Logic to PLCs. 1 ed. International Society of Automation, 2003. 67 p

VISHAY INTERTECHNOLOGY. 6N137**:** High Speed Optocoupler, Single and Dual, 10 MBd. Malvern, PA, 2016. Disponível em: https://www.vishay.com/docs/84732/6n137_o2601_vo2611.pdf. Acesso em: 15 dez. 2024.