

UNIVERSIDADE DE UBERABA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA QUÍMICA

**AUTOMAÇÃO DE TANQUES DE MISTURA DESTINADO A
MULTIPROCESSOS POR BATELADA**

LUCAS DE OLIVEIRA ESTEVAM

UBERABA

2025

LUCAS DE OLIVEIRA ESTEVAM

**AUTOMAÇÃO DE TANQUES DE MISTURA DESTINADO A
MULTIPROCESSOS POR BATELADA**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP / UNIUBE).

Orientador(a):

Prof. Dr. Edilberto Pereira Teixeira

Coorientador(a):

Prof. Dr. Antônio Manoel Batista da Silva

Prof. Dr. Lúcio Rogério Júnior

UBERABA

2025

Catálogo elaborado pelo Setor de Referência da Biblioteca Central UNIUBE

- Estevam, Lucas de Oliveira.
E85a Automação de tanques de mistura destinado a multiprocessos por
 batelada / Lucas de Oliveira Estevam – Uberaba (MG): 2025.
 49 p. : il., color.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade de Uberaba. Programa de Pós
 Graduação em Engenharia Química.
 Orientador(a): Prof. Dr. Edilberto Pereira Teixeira.
 Coorientador(a): Prof. Dr. Antônio Manoel Batista da Silva, Prof. Dr.
 Lúcio Rogério Júnior.
- Reações químicas. 2. Automação industrial. I. Universidade de Uberaba.
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. II. Título.
- CDD: 670.427

Marcos Antônio de Melo Silva – Bibliotecário – CRB-6/2461

LUCAS DE OLIVEIRA ESTEVAM

AUTOMAÇÃO DE TANQUES DE MISTURA DESTINADO À MULTIPROCESSOS POR BATELADA

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química do programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

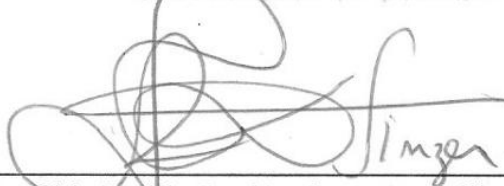
Área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais.

Aprovada em: 10 / 04 / 2025.

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
gov.br EDILBERTO PEREIRA TEIXEIRA
Data: 04/12/2025 14:45:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Edilberto Pereira Teixeira – Orientador(a)
Universidade de Uberaba



Prof(a). Dr(a). José Roberto Delalibera Finzer
Universidade de Uberaba

Documento assinado digitalmente
gov.br EVELY DEGRAF TERRA PARCKERT
Data: 04/12/2025 16:22:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof(a). Dr(a). Evely Degraf Terra Parckert
IFTM - Instituto Federal do Triângulo Mineiro

DEDICATÓRIA

Dedico esta conquista e conclusão de trabalho à Deus por abençoar e permitir a realização deste trabalho, toda honra e glória seja dada à Ele.

Este trabalho não seria possível sem o apoio de meus pais, Aluisio Henrique Estevam e Cristiana de Oliveira Estevam, dedico a eles este trabalho, por sempre me incentivarem, serem meus eternos orientadores e sempre me apoiando, com amor e paciência, em meus estudos e sonhos.

Dedico também à minha noiva, Laís Barbosa Peres, por me ouvir, compreender e incentivar com toda atenção e carinho, para que eu pudesse concluir este objetivo, seu apoio e conselhos foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço meus orientadores, Professor Antônio Manoel Batista da Silva, Professor Lúcio Rogério Júnior pelos ensinamentos, aprendizados, pelo profissionalismo e dedicação para a realização deste trabalho.

Agradeço também à empresa MasterNOX, por todo suporte, apoio e ensinamentos, por este trabalho ter sido realizado com muita determinação e qualidade.

Por fim, agradeço ao Programa de Pós-Graduação Engenharia Química – Mestrado Profissional da UNIUBE, à UNIUBE - Universidade de Uberaba, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG, com número de processos MPR-01119-16; APQ-01203-23, à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo suporte dado ao desenvolvimento dessa dissertação.

RESUMO

A automação de processos industriais tem desempenhado um papel fundamental na melhoria da eficiência e qualidade da produção em diversas áreas, incluindo a engenharia química. Este estudo discute o projeto e a execução de um tanque de mistura automatizado para multiprocessos em batelada. O estudo vai desde a concepção do projeto, com o uso de sistemas de software de modelagem, até a montagem física do aparelho, utilizando materiais como aço inoxidável para assegurar resistência química e sanitização apropriada. Adicionalmente, utilizaram-se impulsionadores específicos para variados tipos de misturas, garantindo a eficácia da etapa de homogeneização.

O sistema de automação foi desenvolvido utilizando um microcontrolador ATmega328P, encarregado de gerenciar motores, sensores de temperatura e nível, além de ativar resistências elétricas para aquecimento do produto. O projeto também contemplou a instalação de um sistema de interface homem-máquina (IHM), com o objetivo de simplificar a operação e o acompanhamento dos processos. Experimentos realizados comprovaram que o dispositivo cumpre os requisitos de controle térmico e eficácia na agitação, permitindo sua utilização na fabricação de produtos químicos, cosméticos e farmacêuticos em escala experimental.

Os resultados obtidos confirmam a eficácia do tanque de mistura automatizado como uma opção de baixo custo e alta performance para pequenas empresas e institutos de pesquisa. A flexibilidade do sistema possibilita ampliações futuras, como a conexão com sistemas de supervisão por meio de comunicação serial. Assim, a pesquisa auxilia no progresso das tecnologias automatizadas na engenharia química.

Palavras-chave: Automação Industrial, Tanque de Mistura, Processos por Batelada.

ABSTRACT

The automation of industrial processes has played a fundamental role in improving the efficiency and quality of production in several areas, including chemical engineering. This study discusses the creation and implementation of an automated mixing tank for batch multiprocesses. The study ranges from the creation of the project, using modeling software, to the physical assembly of the device, using materials such as stainless steel to ensure chemical resistance and appropriate sanitization. In addition, specific drivers were used for various types of mixtures, ensuring the effectiveness of the homogenization process.

The automation system was developed using an ATmega328P microcontroller, responsible for managing motors, temperature and level sensors, in addition to activating electrical resistors for heating the product. The project also included the installation of a human-machine interface (HMI) system, with the aim of simplifying the operation and monitoring of the processes. Experiments carried out proved that the device meets the requirements for thermal control and efficiency in agitation, allowing its use in the manufacture of chemical, cosmetic and pharmaceutical products on an experimental scale.

The results obtained confirm the effectiveness of the automated mixing tank as a low-cost, high-performance option for small businesses and research institutes. The flexibility of the system allows for future expansions, such as connection to monitoring systems via serial communication. Thus, the research aids in the advancement of automated technologies in chemical engineering, offering greater control, reproducibility and safety in mixing procedures.

Keywords: Industrial Automation, Mixing Tank, Batch Processes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Reator Contínuo (b) e descontínuo (a)	3
Figura 2: Impulsor aplicado para baixa e moderada viscosidade.....	4
Figura 3: Impulsor para líquidos viscosos.....	5
Figura 4: Reator de hélice padrão.....	7
Figura 5: Número de Potência (N_{Po}) em Função do Número de Reynolds (N_{Re}).	10
Figura 6: Esboço do projeto 2D do equipamento	13
Figura 7: Vaso do tanque	14
Figura 8: Montagem 3D do reator e suporte.....	15
Figura 9: Entrada para resistências.....	16
Figura 10: Agitador tipo âncora com hélices.....	17
Figura 11: Agitador tipo turbina com motor	18
Figura 12: Diagrama de blocos do aquecimento e resfriamento do equipamento.....	19
Figura 13: Microcontrolador ATmega328P com encapsulamento DIL28.....	20
Figura 14: Entrada de alimentação de 24VCC e circuito regulador de tensão de 5VCC.....	21
Figura 15: Circuito de interface com relé para acionamento dos motores e da válvula.....	21
Figura 16: Circuito driver para acionamento do buzzer	23
Figura 17: Circuito de interface com isolamento para acionamento de motores CC	24
Figura 18: Circuito conversor TTL/RS232 para comunicação serial.....	25
Figura 19: Módulo eletrônico para sensor de nível do tipo eletrodo.....	26
Figura 20: Módulo conversor RTD para Digital	26
Figura 21: Layout da PCI em 2D – Placa eletrônica de controle do Reator.....	27
Figura 22: Layout da PCI em 3D – Placa eletrônica de controle do Reator.....	28
Figura 23: PCI finalizada – Placa de controle do reator.....	28
Figura 24: Circuito simulável para testes do código embarcado no microcontrolador	29
Figura 25: Fluxograma básico de operação do microcontrolador	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Faixa de volume de líquido agitado em cada tipo de impulsor	5
---	---

TABELA DE SIGLAS E SIGNIFICADOS

Sigla	Significado
ADC	Conversor Analógico-Digital
ATmega328P	Microcontrolador da família AVR utilizado no projeto
CLP	Controlador Lógico Programável
DC / CC	Corrente Contínua
AC / CA	Corrente Alternada
LCD	Display de Cristal Líquido
PWM	Modulação por Largura de Pulso
Po	Número de Potência
Re	Número de Reynolds
ρ	Densidade do fluido (kg/m ³)
μ	Viscosidade dinâmica (Pa·s)
N	Velocidade de rotação (s ⁻¹)
D	Diâmetro do impulsor (m)
H	Altura do líquido (m)
hf	Altura entre o fundo e o agitador (m)
PT100	Termorresistência de platina com coeficiente positivo de temperatura
RS232 / RS485	Padrões de comunicação serial
SPI	Serial Peripheral Interface
IHM	Interface Homem-Máquina
LCD I2C	Display LCD com comunicação via protocolo I2C
OC0 / OC0A	Saídas de PWM do microcontrolador ATmega328P
VCC	Tensão de alimentação em corrente contínua
VCA	Tensão de alimentação em corrente alternada
PID	Controle Proporcional-Integral-Derivativo

BTNs

Botões de interface do usuário

EEPROM

Memória não volátil para armazenamento de dados

°C

Graus Celsius

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL	01
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	03
2.1 Tipos de tanques químicos	03
2.2 Modelos de agitadores	04
2.3 Agitação e mistura	06
2.4 Automação industrial e microcontroladores	10
CAPÍTULO 3 – MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1 Desenvolvimento do equipamento	13
3.2 Construção do equipamento	14
3.3 Desenvolvimento do sistema de controle	19
3.4 Desenvolvimento do firmware da placa de controle	29
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1 Dados e parâmetros utilizados	32
4.2 Metodologia de cálculo	32
4.3 Cálculo e número de Reynolds	33
4.4 Cálculo de potência	33
4.5 Discussão dos resultados	34
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO	36
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	37
REFERÊNCIAS	38
APÊNDICE	40

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

Os reatores de mistura são amplamente utilizados para realizar reações químicas entre vários componentes com o objetivo de obter produtos específicos. Isso os torna extremamente importantes no setor químico. Esses equipamentos permitem a mistura e a homogeneização de matérias-primas, incluindo água e demais componentes para produzir os compostos pretendidos em condições controladas (SANTOS e VASCONCELOS, 2002). O tipo de tanque e os impulsores usados, bem como a cinética das reações e o comportamento dos fluidos dentro do sistema, influenciam diretamente a eficiência e a qualidade da operação de mistura.

Os tanques descontínuos (batelada) e contínuos são as duas categorias principais de reatores de mistura. Os tanques contínuos funcionam com escoamento de entrada e saída ininterruptos. Isso os mantém em um estado estacionário em que a vazão mássica de entrada é igual à de saída e as condições de temperatura e concentração permanecem inalteradas ao longo do tempo (HAYES, 2001). Devido à sua capacidade de funcionar em condições controladas de escoamento e agitação, esse tipo de equipamento é particularmente útil para o estudo de reações heterogêneas (LEVENSPIEL, 2000).

Por outro lado, os tanques em batelada são construídos para armazenar reagentes e estimular suas reações em um ambiente fechado, usando vários tipos de impulsores para agitar e homogeneizar o produto. Devido à sua facilidade e adaptabilidade, esses tanques são frequentemente utilizados em escalas laboratoriais. Eles também são versáteis, pois podem funcionar em uma variedade de condições, como sob pressão ou vácuo (LEVENSPIEL, 2000; ROBERTS, 2010).

Os agitadores, também conhecidos como impulsores, são componentes essenciais dos tanques de mistura e são responsáveis por promover a mistura interna e a agitação dos reagentes. A seleção dos impulsores depende da viscosidade da mistura e de objetivos de processos específicos, como manter a homogeneidade ou promover trocas de calor eficientes (TADINI, 2016). Os impulsores são classificados de acordo com o tipo de escoamento que produzem (axial, radial ou tangencial) e a intensidade de turbulência que produzem, o que tem um impacto significativo na eficiência da operação de mistura.

O desenvolvimento de novos equipamentos na indústria química depende da seleção adequada dos impulsores e de fluidos em tanques de mistura. O conhecimento das

características e aplicações dos vários tipos de impulsores permite otimizar o desempenho das operações de mistura, utilizando as características especificadas de viscosidade, densidade e comportamento de escoamento. Portanto, para aumentar a eficiência operacional e a qualidade dos produtos, é necessário o desenvolvimento contínuo de técnicas e tecnologias para a seleção e aplicação de impulsores.

As agroindústrias utilizam tanques para mistura de diferentes volumes e de sistemas de controle. O estudo de novas formulações e produtos é dificultado em tanques de menor volume (escala laboratorial) por possuir sistemas simplificados em relação a tanques de maiores volumes (semi-piloto) e industriais. A transferência de escala de formulações em tanques de menor volume para tanques de maior volume podem apresentar resultados distintos em relação ao esperado. Ao utilizar sistemas distintos de controle, os resultados podem ser diferentes do esperado, a mínima concentração de semelhança, geometria, cinética.

O objetivo deste trabalho é através da automação apresentar o desenvolvimento de um sistema inteligente para controle e dinâmicas são requeridas par os estudos de ampliação de escala (*scale-up*), monitoramento em tanques de mistura, demonstrando as etapas de construção do equipamento, com resultados de operação.

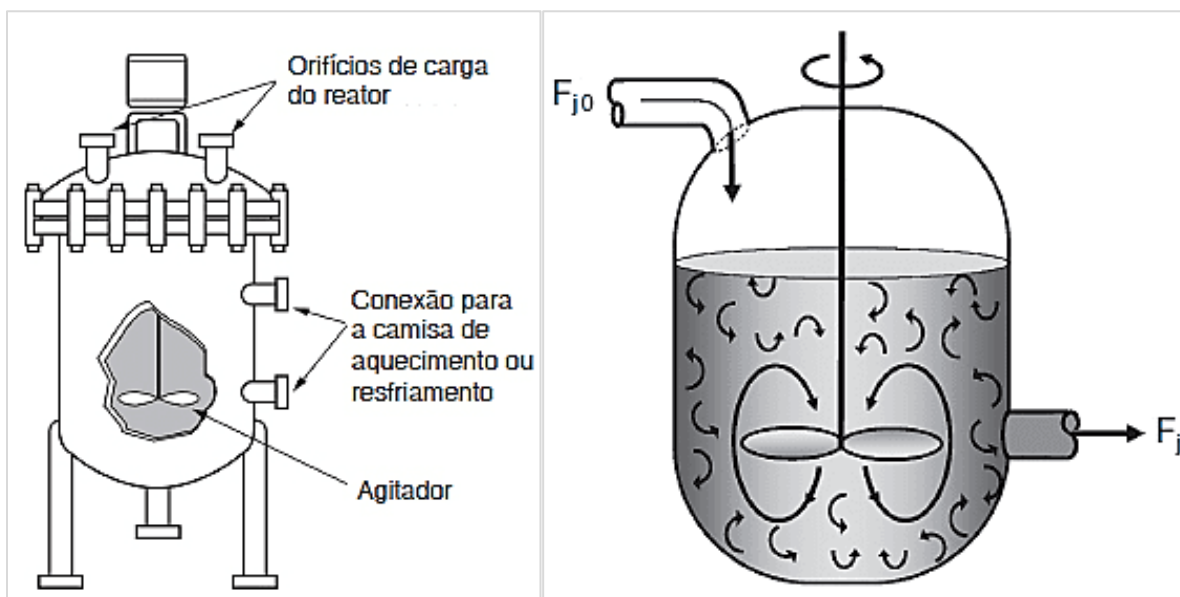
CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tipos de tanques químicos

Tanques de mistura são equipamentos onde são realizadas reações químicas entre diferentes substâncias buscando um produto de interesse. De acordo com Santos e Vasconcelos (2002), são denominados reatores de agitação e de mistura os equipamentos cujo objetivo é a realização de uma reação química, sob condições controladas e obtendo um ou mais produtos. Os tanques recebem as matérias-primas, assim como a água, e realizam a mistura e homogeneização para obtenção do produto especificado. Segundo Levenspiel (2000), existem dois tipos de tanques: os tanques descontínuos (batelada) e os tanques contínuos (Figura 1).

Figura 1: Reator Contínuo (b) e descontínuo (a).



Fonte: FOGLER (2014).

Tanques contínuos possuem fluxo de entrada e de saída, ou seja, sempre há um fluxo de saída contínuo durante a operação deste reator. De acordo com Hayes (2001), estes tanques são operados em estado estacionário, ou seja, onde a vazão mássica para dentro do tanque é igual a vazão mássica para fora do tanque, e a temperatura e a concentração não mudam com o tempo em um determinado local, quando operados em regime estacionário. Este tipo de

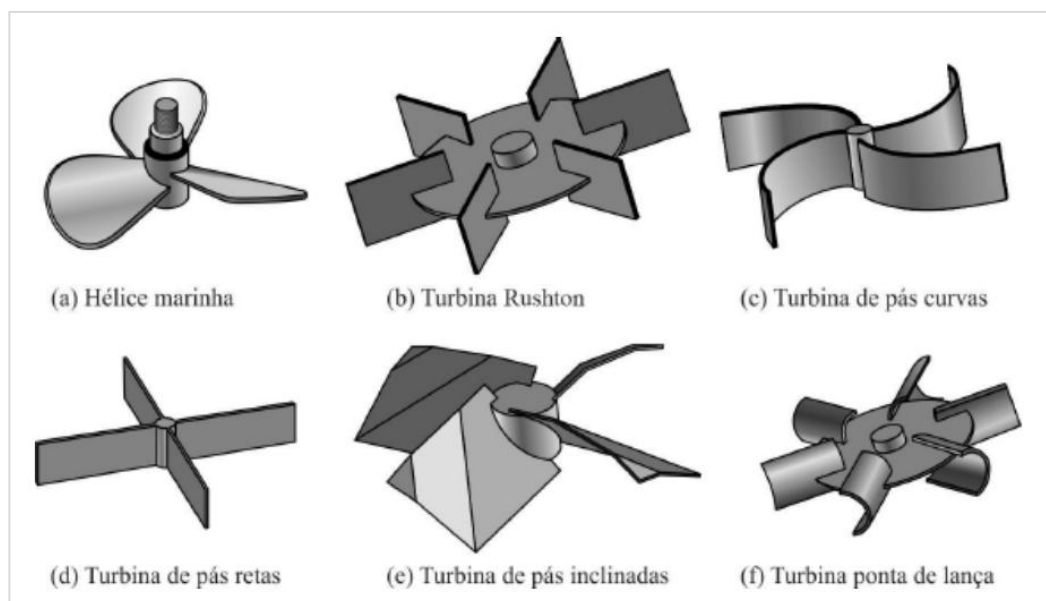
reator é usado principalmente no estudo de cinética de reações heterogêneas (LEVENSPIEL, 2000).

Tanques em batelada são aqueles que armazenam os reagentes e promovem a reação entre eles, no caso de reatores, para obter a homogeneização do produto, estes tanques podem utilizar diferentes tipos de agitadores e submeter os reagentes à pressão ou a vácuo (ROBERTS, 2010). De acordo com Levenspiel (2000), este tipo de tanque opera de forma isotérmica e, por ser relativamente simples, pode ser adaptável para escalas de laboratório.

2.2 Modelo de agitadores

Para promover a agitação e a mistura interna de reatores são utilizados impulsores, ou popularmente conhecidos como agitadores. Os impulsores são classificados de acordo com a viscosidade da mistura. Os impulsores mais comuns são impulsores aplicados para baixa e de média viscosidade e impulsores para líquidos viscosos (Figura 2).

Figura 2: Impulsor aplicado para baixa e moderada viscosidade.

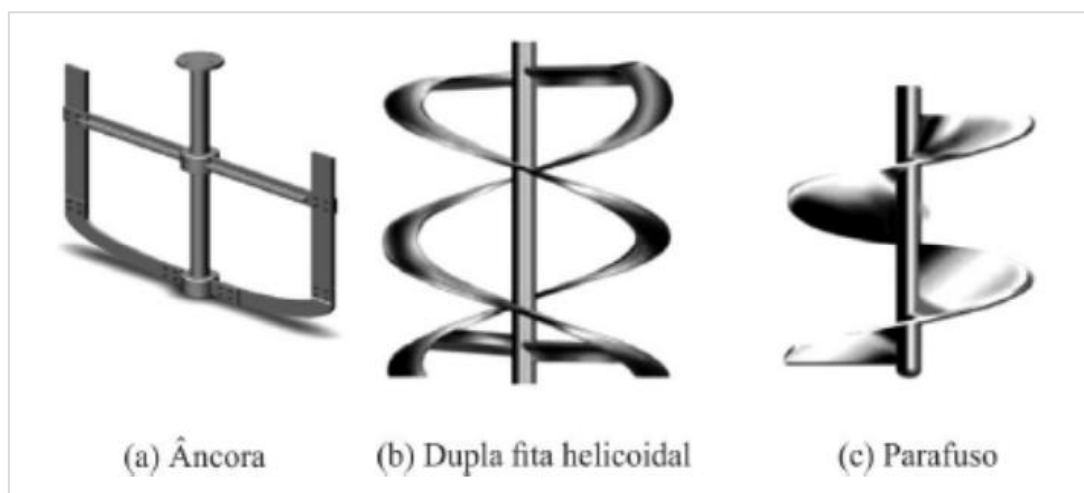


Fonte: TADINI; MEIRELLES; PESSOA (2016).

De acordo com a descrição de Menegalli, Telis e Romero (2016) a seleção dos impulsores é determinada por meio de dados obtidos sobre aquele tipo de impulsor, também sendo determinado de acordo com sua função e objetivos que o tipo de impulsor deve atingir, por exemplo: agitação dos líquidos e troca de calor.

Impulsores são classificados de acordo com o escoamento que produzem. Os impulsores que produzem correntes paralelas ao seu eixo são denominados impulsores de

Figura 3: Impulsor para líquidos viscosos.



Fonte: TADINI, C. Telis, V.R.; Meirelles, A.J.A.; Pessoa, P.A. (2016).

fluxo axial. Impulsores que produzem correntes perpendicular ao seu eixo são denominados impulsores de fluxo radial. Já o escoamento tangencial conduz a rotação do meio. Outra maneira de classificar os impulsores é de acordo com a turbulência em que sua atuação ocasiona na mistura, gerando turbulência alta ou baixa.

A Tabela 1 indica exemplos de impulsores e seus padrões gerados em um tanque. De acordo com suas características, um impulsor deve ser aplicado de acordo com o objetivo a ser atingido com a mistura em um tanque. Uma de suas prioridades para esta escolha é em relação à viscosidade do líquido.

Tabela 1: Faixa de volume de líquido agitado em cada tipo de impulsor.

TIPO DE IMPULSOR	μ_{ap} [Pa · s]	$V_L (\mu_{ap})$ [m ³] ([Pa · s])
Âncora	20 – 10 ³	0,040 (1000) – 380 (1000)
Hélice (1750 rpm)	10 ⁻³ – 10	0,040 até 0,25 (10) – 380 (10 ⁻³)
Hélice (1150 rpm)	10 ⁻³ – 10	0,227 (10) – 38 (10 ⁻³)
Hélice (420 rpm)	10 ⁻³ – 10	0,75 (10) – 380 (10 ⁻³)
Turbina de pás planas	10 ⁻³ – 30	0,040 – 380
Pás	0,1 – 30	0,040 (80) – 380 (10)
Grade	1 – 100	–
Parafuso helicoidal	3 – 300	–
Fita helicoidal	10 – 2000	0,040 (1000) – 380 (20 – 1000)

Fonte: TADINI et al. (2016).

Portanto, a seleção de impulsores para um equipamento de mistura é baseada no resultado que estes impulsores apresentam em relação ao meio que ele será submetido, considerando a viscosidade, densidade e demais comportamento que se espera obter nesta mistura.

O desenvolvimento de novos equipamentos deve levar em consideração as características de cada impulsor a ser selecionado, uma vez que, diferentes modelos de impulsores possuem sua eficiência comprovada em testes em laboratório e as escalas e padrões de escoamento devem ser respeitadas na aplicação de equipamentos de maior volume.

2.3 Agitação e Mistura

A agitação e a mistura são procedimentos essenciais em reatores químicos para garantir a eficiência e a homogeneidade das reações químicas. A fim de garantir que as reações químicas ocorram de forma controlada e eficiente, essas operações visam garantir uma distribuição uniforme dos reagentes, maximizar as condições de temperatura e transferência de massa e minimizar os gradientes de concentração dentro do reator (HAYES, 2001).

A agitação e a mistura são essenciais em processos industriais para garantir a uniformidade das propriedades do produto e para alcançar a homogeneidade das misturas reacionais. A eficácia da agitação afeta diretamente a taxa de reação, a qualidade do produto e a eficiência energética do processo em reatores químicos. Os instrumentos mais comuns para promover a agitação são os impulsores, também conhecidos como agitadores. Eles são selecionados de acordo com as propriedades do fluido, como sua densidade e viscosidade, bem como com os objetivos específicos do processo (MENEGALLI, TELIS e ROMERO, 2016).

A agitação e a mistura, realizadas em reatores químicos, têm um grande impacto na eficiência das reações e na qualidade do produto. A agitação contínua garante que as condições operacionais sejam uniformes em reatores contínuos, enquanto a agitação controlada promove uma homogeneização eficaz dos reagentes em reatores descontínuos. Os impulsores e as condições de operação devem ser selecionados com cuidado para garantir a eficiência e a segurança das operações industriais.

A operação de agitação e mistura em sistemas químicos é intrincada, com a maioria dos equipamentos projetados seguindo o método de similaridade de sistemas. Este procedimento emprega a análise dimensional para definir critérios de escala, abrangendo as

seguintes fases principais: seleção do tipo de impulsor, definição das dimensões geométricas, determinação da frequência de rotação e determinação da potência requerida.

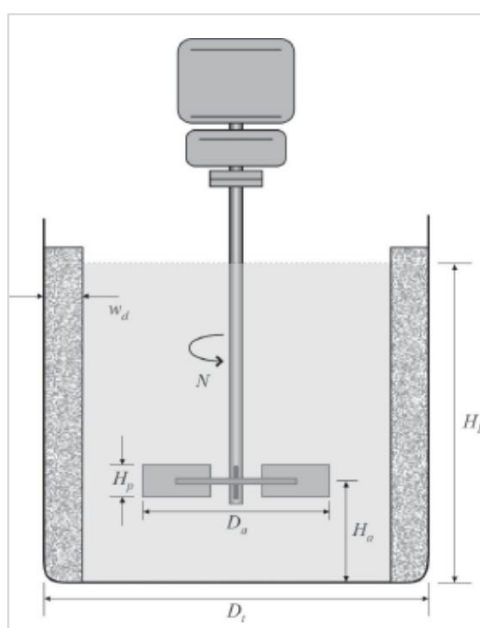
Para que os resultados do laboratório possam ser aplicados em grande escala, é essencial assegurar padrões de escoamento comparáveis em diferentes escalas. Isso requer a existência de três tipos de similaridade:

- Geométrica: intersecção proporcional entre as dimensões do modelo e do protótipo;
- Cinemática: correspondência entre as velocidades e outras nuances;
- Dinâmica: uniformidade proporcional nas forças que agem em pontos relacionados.

A avaliação dimensional estabelece números adimensionais que ligam as variáveis vitais do sistema, impactando diretamente o seu funcionamento. Por exemplo, em um tanque com líquido em movimento, a potência requerida é influenciada por propriedades do fluido, como densidade e viscosidade, bem como por variáveis geométricas do tanque e do agitador, tais como diâmetro, altura, localização, largura dos defletores e propriedades das pás do impulsor. No caso de fluidos newtonianos, a potência é diretamente relacionada a essas variáveis.

Tanques de mistura possuem diferentes componentes, com escalas e medidas distintas, com o decorrer de estudos de diferentes autores e pesquisas referentes ao assunto, chegou-se em uma relação de medidas padronizada, nomeando variáveis para cada peça do tanque. Pode-se observar esta padronização na Figura 4.

Figura 4: Reator de hélice padrão.



Fonte: TADINI et al (2016).

De acordo com Menegali, Telis e Romero (2016) As variáveis envolvidas na agitação e mistura de um líquido em um tanque estão mostradas na Figura 4. A potência fornecida pelo motor (P_o) será função da densidade (ρ) e da viscosidade (μ) do líquido, frequência rotacional do impulsor (N) e das variáveis geométricas do sistema: diâmetro do agitador (D_a), diâmetro do tanque (D_t), altura do agitador desde a base do tanque (H_a), altura dos líquidos (H_l), largura dos defletores (w_d), além do tipo de agitador, com a sua característica altura das pás (H_p). Assim, a potência do agitador para um fluido newtoniano é função das variáveis acima mencionadas:

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

No entanto, aplicando o método da análise dimensional, o número de variáveis pode ser reduzido aos números adimensionais de potência, de Reynolds e de Froude, descrito pelas Equações (2) a (4):

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

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

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

Em que: N_{P_o} é o número de potência, N_{Re} é o número de Reynolds e N_{Fr} é o número de Froude. Além dos adimensionais relacionados anteriormente, os seguintes números adimensionais geométricos são definidos: $\frac{D_t}{D_a}, \frac{H_a}{D_a}, \frac{H_l}{D_a}, \frac{w_d}{D_a}$. Portanto, o número de potência (N_{P_o}) é descrito por (5):

$$P_o = f(N_{Re}, N_{Fr}, \frac{D_t}{D_a}, \frac{H_a}{D_a}, \frac{H_l}{D_a}, \frac{w_d}{D_a}) \quad (5)$$

O número de Froude (N_{Fr}) deve ser considerado quando há formação de vórtice junto ao eixo. Esse fenômeno é preponderante para $N_{Re} > 300$ e para tanques sem defletores.

O cálculo mais simples para o cálculo de potência requerida para agitar fluidos newtonianos ocorre quando já estão definidos o tipo de agitador, a velocidade angular a ser utilizada e as dimensões geométricas do sistema. Nessa situação, o desenvolvimento do projeto considera a energia transferida pelo agitador nessas condições, o que exige a determinação do número de potência (N_{Po}) do sistema em análise. Geralmente, são adotadas configurações geométricas padrão, sendo as mais comuns:

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

As relações entre o número de potência (N_{Po}) e o número de Reynolds (N_{Re}) são obtidas experimentalmente para diferentes tipos de agitadores. Exemplos de curvas típicas incluem aquelas de agitadores do tipo turbina, considerando diferentes proporções entre a altura das pás (H_p) e o diâmetro do agitador (D_a), em tanques com quatro defletores e configurações geométricas padrão. Outras curvas, como as de agitadores tipo hélice e sistemas que envolvem fluidos pseudoplásticos, também são amplamente estudadas. Essas curvas apresentam semelhanças com o diagrama de Moody. Na região de escoamento laminar ($N_{Re} < 10$), uma expressão específica pode ser aplicada:

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

Onde K_p é uma constante adimensional. Na região de turbulência, verifica-se que $N_{Po} = K_p$. Os valores de K_p nesta situação tendem a ser fixos, variando conforme o tipo de agitador, as dimensões do tanque e o número de defletores.

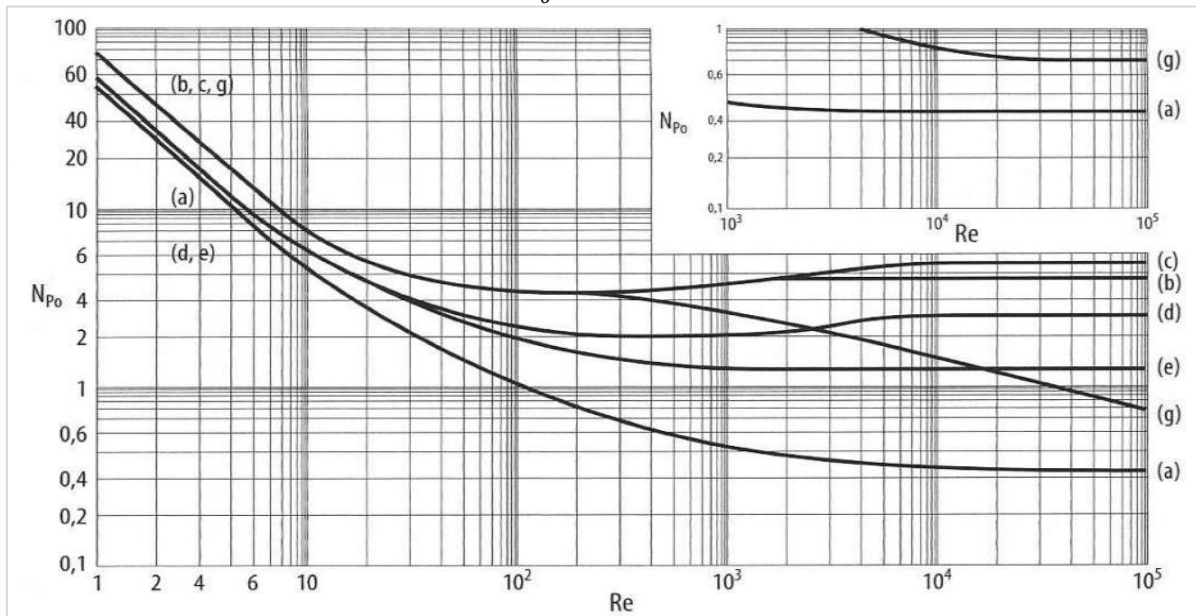
As curvas que mostram a relação entre N_{Po} e o número de Reynolds para diferentes tipos de agitadores, com ou sem defletores, estão disponíveis em diversas referências da literatura técnica, sendo apresentado um exemplo na Figura 5.

Esta definição é válida para impulsores de fluidos com baixa e média viscosidade, no caso de agitadores para fluidos de alta viscosidade deve-se utilizar relações empíricas.

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

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

Figura 5: Número de Potência (N_{Po}) em Função do Número de Reynolds (N_{Re}).



Fonte: McCABLE; SMITH. (2005).

A Equação (8) representa o cálculo da potência para impulsores do tipo helicoidal, enquanto a Equação (9) representa o cálculo para impulsores do tipo âncora.

Nestas equações, H_i representa a distância entre o impulsor e o fundo do tanque, D representa o diâmetro externo do impulsor, p é definido como “*pitch*” é a distância axial que uma hélice percorreria em uma volta completa se ela se descolasse dentro de um sólido, em outras palavras, o passo da hélice, h é a altura do impulsor, W a largura das pás do impulsor e n_b o número de pás do impulsor.

2.4 Automação Industrial e Microcontroladores

A automação industrial e os microcontroladores foram fundamentais para a modernização dos processos de manufatura modernos. Ambos os setores evoluíram juntos, impulsionando a eficiência e a inovação na indústria, desde os primeiros sistemas mecanizados da Revolução Industrial até os modernos sistemas de controle digital.

A história da automação industrial começa com a Revolução Industrial, no final do século XVIII, quando houve um grande salto no trabalho manual em direção a processos mecanizados. Os marcos iniciais que permitiram a produção em massa e aumentaram significativamente a eficiência das fábricas incluíram máquinas como o tear mecânico de Edmund Cartwright em 1784 e a máquina a vapor de James Watt em 1765 (MORRIS, 2017). Esses avanços iniciais eram principalmente mecânicos e visavam aumentar a produtividade e diminuir a dependência da força humana.

A automação industrial se tornou dependente da eletricidade no início do século XX. O desenvolvimento de sistemas de controle elétrico e eletromecânico, como relés e temporizadores, permitiu que as máquinas fossem controladas de maneira mais precisa (BENNETT, 1993). Durante esse período, conceitos básicos de automação, como sequenciamento e controle lógico, foram introduzidos, abrindo caminho para futuras inovações eletrônicas.

Os avanços dos semicondutores e a miniaturização dos circuitos eletrônicos nas décadas de 1960 e 1970 impulsionaram o desenvolvimento dos microcontroladores. Segundo Peckol (2019), um microcontrolador é um circuito integrado que contém um processador, memória e periféricos programáveis, o que permite o controle de sistemas complexos em um único chip. O primeiro microprocessador comercial foi o Intel 4004, lançado em 1971. Microcontroladores como o Intel 8048 e o Motorola 6800 seguiram a tecnologia e foram amplamente empregados em sistemas industriais para automação e controle (LAPLANTE, 2017).

Os controladores lógicos programáveis (CLPs) surgiram como resultado da incorporação de microcontroladores em sistemas industriais nos anos 1970 e 1980. Esses dispositivos, como o Modicon 084, criado em 1969, substituíram os sistemas de controle por relés e tornaram o controle de processos industriais mais adaptável e eficaz (STENZEL, 2003). A automação dos processos de manufatura com CLP permite uma programação simples e fácil de reconfiguração, aumentando a eficiência e reduzindo os custos.

Nas décadas de 1980 e 1990, ocorreu a introdução de sistemas de controle distribuído (DCS) e sistemas SCADA (Controle Supervisor e Aquisição de Dados), que utilizavam microcontroladores para monitorar e controlar processos industriais em tempo real (OGATA, 1997). Como resultado dessa integração, não apenas o controle automático de máquinas foi possível, mas também a coleta e a análise de dados de produção, o que facilitou a tomada de decisões baseadas em dados.

De acordo com os estudos de Schwab (2017) A integração de tecnologias sofisticadas como a Internet das Coisas (IoT), Big Data e inteligência artificial na Indústria 4.0 levou à automação industrial a um novo nível a partir dos anos 2000. Os microcontroladores são agora sistemas embarcados mais poderosos que podem integrar máquinas, sensores e sistemas de controle em redes inteligentes e independentes. Uma automação ainda mais avançada é possível com essa conectividade, com sistemas que podem prever falhas, otimizar processos em tempo real e ajustar-se automaticamente às mudanças que ocorrem na produção.

A automação industrial e os microcontroladores são exemplos de uma trajetória de inovação contínua. A incorporação de novas tecnologias tem feito com que a manufatura seja cada vez mais eficiente, segura e inteligente. A automação e os microcontroladores, desde os primeiros controles mecânicos até os sistemas de controle digital contemporâneos, têm sido fundamentais para o avanço industrial, aumentando a produtividade e abrindo novas fronteiras para o futuro do setor.

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODOS

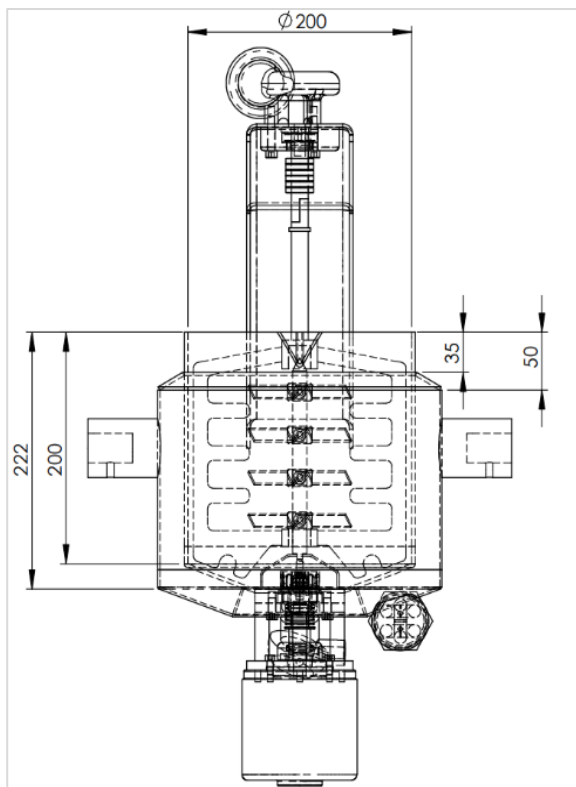
3.1 – Desenvolvimento do equipamento

O tanque misturador foi projetado para atender agroindústrias em operações de planta piloto, com capacidade de 5 litros, podendo também ser aplicado em reações químicas e físico-químicas nos setores farmacêutico, alimentício e químico. Devido à simplicidade de sua construção, o equipamento pode ser facilmente reduzido para aplicações em escala laboratorial.

A fabricação utilizou chapas de aço inox AISI-316L nas áreas em contato com os reagentes e AISI-304 nas demais partes, garantindo condições sanitárias e evitando reações indesejadas. As superfícies internas e externas receberam polimento mecânico, aumentando a durabilidade e facilitando a higienização.

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 6: Esboço do projeto 2D do equipamento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.2 – Construção do equipamento

A segunda etapa do projeto foi a construção física do equipamento. O primeiro passo foi tornar as chapas que estão inicialmente planas em formato cilíndrico, moldando-as de acordo com o desejado. Para isso, foi utilizado um equipamento conhecido como calandra, sendo criados dois cilindros, um interno e outro externo. Para unir as extremidades de uma única chapa foi utilizada a solda do tipo MIG (*Metal Inert Gas*). A espessura da chapa interna é de 1 mm e a chapa externa é de 3 mm.

Com o cilindro interno montado, é soldada a camisa externa do equipamento no cilindro interno, mantendo uma distância entre essas duas paredes, por onde será realizada a passagem de água quente para aquecimento e água fria para resfriamento. Na Figura 7, pode-se visualizar o vaso do reator finalizado.

Figura 7: Vaso do tanque.



Fonte: Acervo do autor (2025).

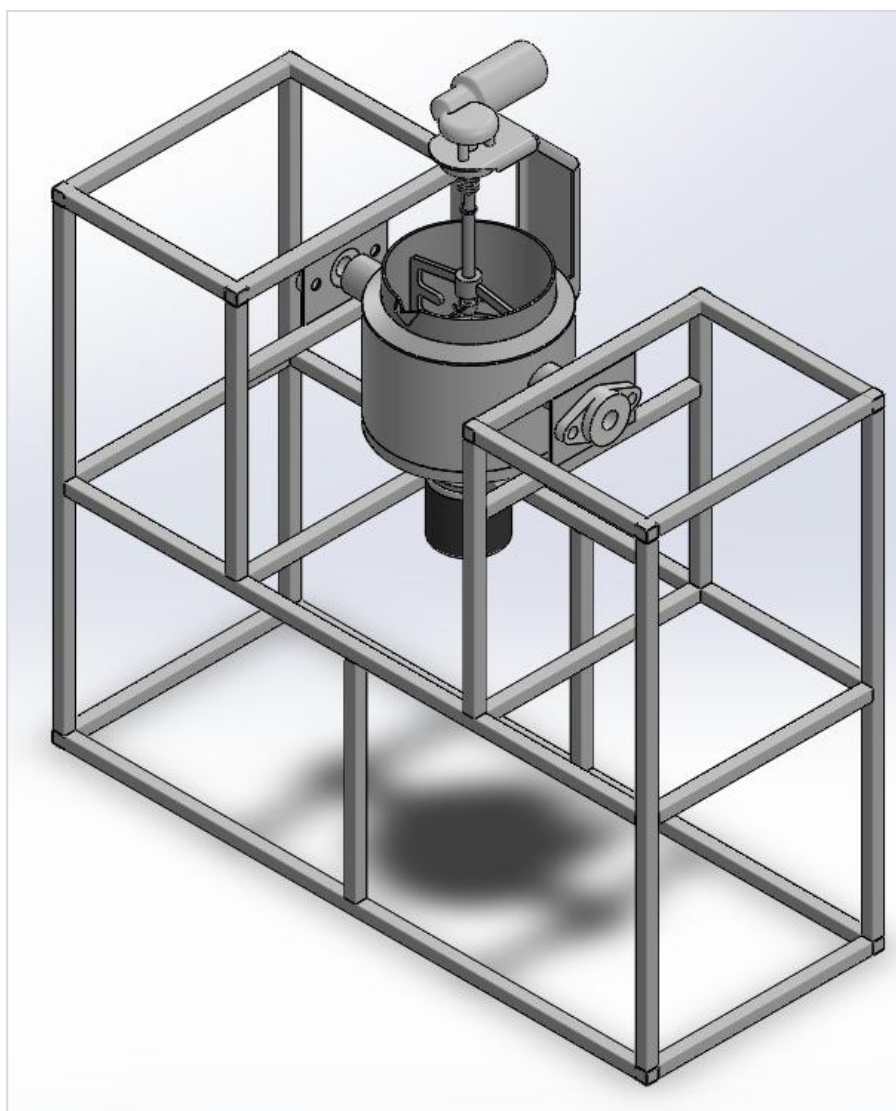
Na imagem (Figura 8), pode-se observar que na parte superior do equipamento foi construído um dosador, sendo responsável por transferir o produto resultante das reações para outro recipiente. Esta transferência de material é possível através de uma base na qual o vaso

do reator é montado, possibilitando uma inclinação de até 140° do vaso do reator para a transferência do produto. A base do equipamento pode ser conferida na Figura 8.

Deve-se ressaltar que nesta imagem foi considerada apenas a estrutura interna da base. Em sua montagem, haverá chapas de inox AISI-304 para o acabamento do equipamento final. Nos espaços disponíveis desta base, serão construídos armários para armazenar insumos e equipamentos para a etapa de fabricação dos produtos.

Para controlar a temperatura dos reagentes, foram idealizadas e construídas duas entradas para acomodar as resistências elétricas, de forma que as resistências sejam instaladas entre o costado (parte interna do reator) e a camisa (parte externa que reveste o costado). Desta forma, as resistências entram em contato apenas com a água que preenche o espaço entre o costado e a camisa, aquecendo a água e consequentemente o produto no interior do tanque.

Figura 8: Montagem 3D do reator e suporte.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Desta forma, evita-se o contato direto entre as resistências e o produto, garantindo a melhor sanitização do equipamento, evitando possíveis reações ou contaminações indesejadas.

A leitura da temperatura do produto é realizada por meio de um sensor PT100 com haste em inox. Este sensor é responsável por medir a temperatura por meio da resistência elétrica através de metal de platina (Pt), sendo conhecido também como termorresistência, sua escala de medição é entre 0°C e 600°C. Este sensor será instalado na base do reator e em contato com a parte interna do tanque em contato direto com o produto. Desta forma, obtém-se com precisão a temperatura dos reagentes. Pode-se conferir as entradas para resistências finalizadas no equipamento pela Figura 9.

Figura 9: Entrada para resistências.



Fonte: Acervo do autor (2025).

Para promover a agitação dos reagentes e garantir a melhor homogeneização do produto, foi construído um agitador central que acomoda dois modelos de impulsos. A parte externa do agitador é composta por um impulsor do tipo âncora, ideal para misturas de média e alta viscosidade. Em conjunto, na parte interna do agitador, foram instalados quatro

impulsores do tipo pás inclinadas, ideais para misturas de baixa e de média viscosidade. Este conjunto foi fabricado em chapa de inox AISI-316L.

A homogeneização do produto é uma etapa importante em sua fabricação, a qual busca evitar eventuais aglutinações dos reagentes e otimiza o tempo de produção (LEVENSPIEL, 2000). O impulsor de um tanque, promove a homogeneização de diferentes reagentes, podendo ser eles líquido-líquido, sólido-líquido, sólido-sólido (HAYES, 2001). Este acessório é conectado a um motor com redutor, gerando maior torque que será transmitido através do eixo deste impulsor. A instalação deste motor foi realizada em uma estrutura acima da tampa superior do equipamento. Na Figura 10, apresenta-se este agitador finalizado.

Figura 10: Agitador tipo âncora com hélices.



Fonte: Acervo do autor (2025).

Outro acessório foi construído para promover a agitação dos reagentes. Um agitador do tipo turbina, movido por um motor de 24VCC e 250W de potência foi selecionado para auxiliar na homogeneização dos reagentes e conectado em seu eixo foi construída uma

pequena hélice. Esta montagem garante que em misturas contendo reagentes sólidos não causem o aglutinamento indesejado.

O agitador foi posicionado na parte inferior do equipamento e, para sua vedação, foi utilizado um selo mecânico, em que se pode observar a construção de um flange na parte superior do motor (Figura 11), conectando-o ao equipamento. O motor previamente montado com a hélice e flange pode ser visualizado no esboço apresentado na Figura 8.

O sistema de aquecimento e resfriamento do equipamento é realizado através do preenchimento do espaço entre o costado (parte interna do equipamento) e a camisa (parte externa do equipamento) com água.

Figura 11: Agitador tipo turbina com motor.



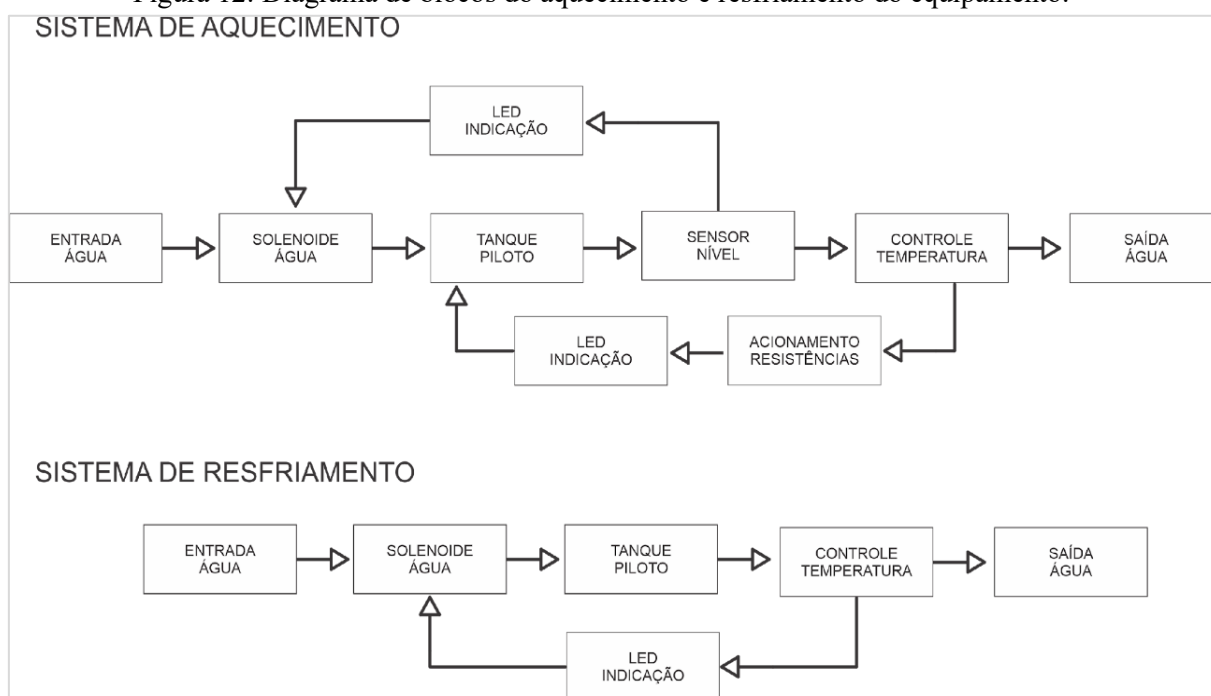
Fonte: Acervo do autor (2025).

Este controle é realizado por meio de um solenoide que controla a passagem de água para este espaço, sendo desligada quando a água atinge o nível ideal dentro da camisa. Esta leitura é feita por um sensor de nível instalado nesse espaço.

Na fase de aquecimento, esse espaço é preenchido e a água é contida, as resistências são acionadas e começam a aquecer a água que, conseqüentemente, aquece o produto no interior do equipamento. Desta forma, evita-se o contato entre a resistência e o produto.

Na fase de resfriamento, o operador aciona a saída de água, liberando a água aquecida presente na camisa. Após esta etapa, o operador aciona a fase de resfriamento, permitindo que a água seja admitida na camisa e saia em seguida, formando um escoamento constante de entrada e saída de água constante. A Figura 12 representa o diagrama de blocos da fase de aquecimento e a fase de resfriamento do equipamento.

Figura 12: Diagrama de blocos do aquecimento e resfriamento do equipamento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.3 – Desenvolvimento do sistema eletrônico de controle

Na próxima etapa do projeto, trata-se do desenvolvimento do sistema embarcado, ou seja, da placa de eletrônica de controle responsável por receber comandos e sinais de sensores, além de acionar atuadores de acordo com uma lógica de operação pré-definida.

O projeto eletrônico tem como elemento principal o microcontrolador da família megaAVR, modelo ATMEGA328P (Figura 13), com arquitetura Harvard modificada e processador RISC (Reduced Instruction Set Computer) de 8 bits. O chip é composto por 8 entradas analógicas e 14 entradas/saídas digitais, sendo que 6 delas podem ser usadas como

saídas de modulação de largura de pulso (PWM), portas de comunicação serial e conversores analógico-digital (ADC) de 10 bits de resolução (BLUM, 2016).

Figura 13: Microcontrolador ATMEGA328p com encapsulamento DIL28.



Fonte: Acervo do autor (2025).

Ligados ao microcontrolador, estão vários periféricos de entrada, sendo eles: um sensor de nível do tipo eletrodo, botões de pulso e chaves, um sensor de temperatura do tipo termorresistência (PT100) e uma interface de comunicação serial padrão RS232/485. Os elementos de saída que são acionados pelo ATMEGA podem ser descritos como: dois drives de interface para disparo dos motores (via PWM), um display LCD alfanumérico 4Cx20L com comunicação I2C, um sinalizador sonoro ativo (buzzer) e três circuitos de interface com relês eletromecânicos para acionamento das resistências e da válvula de água.

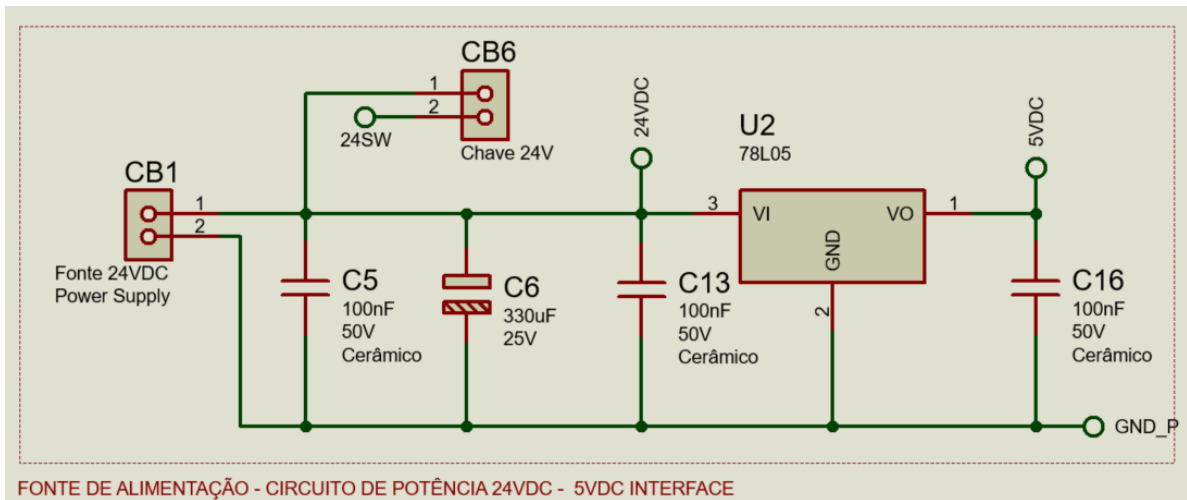
Com objetivo de melhor descrever o *hardware* de controle proposto neste trabalho, na sequência, os principais blocos do circuito eletrônico serão apresentados em maiores detalhes. Considerando que o projeto atende um padrão industrial, definiu-se uma alimentação de entrada de 24VCC, em conformidade com os níveis de extra baixa tensão.

É importante destacar que a linha de 24VCC alimenta os motores do misturador e da turbina, enquanto as resistências de aquecimento e a válvula de água são alimentadas por 220VCA. Um regulador de tensão linear 78L05 do tipo integrado é utilizado para regular 5VCC, sendo responsável por alimentar todo circuito de controle, incluindo o microcontrolador (Figura 14).

Na Figura 15, é mostrado o circuito de interface com relê eletromecânico. Desta maneira, o circuito de interface é capaz de receber um sinal de 5VCC da saída digital do microcontrolador e acionar um contato de potência (que suporta até 240VCA e 10A), neste caso, alimentado com 220VCA, possibilitando a isolamento elétrica entre o circuito de potência (resistências de aquecimento) e o estágio de controle do microcontrolador.

O diodo D9 opera como um dispositivo de proteção em paralelo com a bobina do relê. Descrito como diodo roda livre, (do inglês, *Freewheeling* diodo FWD), é responsável por criar

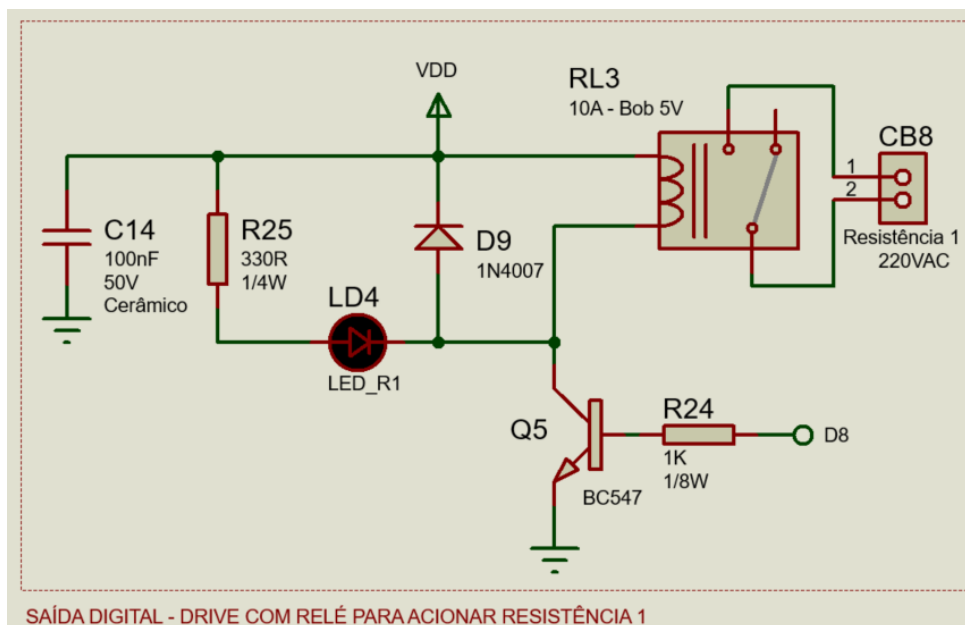
Figura 14: Entrada de alimentação de 24VCC e circuito regulador de tensão de 5VCC



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

um caminho alternativo para a corrente elétrica armazenada na bobina durante o desligamento do BJT. A falta do diodo pode danificar o transistor, pois a força contra eletromotriz gerada pelo indutor pode chegar a valores muitas vezes maiores do que a tensão da fonte de alimentação (AHMED, 2000).

Figura 15: Circuito de interface com relé para acionamento dos motores e da válvula



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O circuito de interface é composto por um transistor bipolar de junção (BJT) especificado como BC547, operando como uma chave eletrônica e conectado a uma bobina de corrente contínua (CC) de um relé. Segundo os autores Boylestad e Nashelsky (2013), não existe conexão elétrica entre a bobina de um relé eletromecânico e seu conjunto de contatos

de saída, definindo apenas uma ligação magnética, ou seja, criando uma isolamento galvânica entre os circuitos.

O capacitor C14 funciona como um supressor de transientes de alta frequência, e o resistor R25 limita a corrente do led LD4, podendo ser calculado pela equação (10). Um conector tipo borne foi utilizado para conexão dos contatos do relé com a resistência (CB8). O modelo BC547 foi escolhido para o BJT devido ao fácil acesso comercial, reduzido custo e por atender aos critérios mínimos de tensão coletor-emissor (VCE) e corrente de coletor (Ic), demandados pelo circuito. A equação (10) apresenta o cálculo do resistor limitador de corrente.

$$R_{LED} = \frac{V_{sensor} - V_{LED}}{I_{LED}} \quad (10)$$

Onde:

R_{LED} = resistor limitador de corrente do led;

V_{sensor} = tensão chaveadas pelo sensor (12V);

V_{LED} = queda de tensão direta do led;

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

O resistor de base R24 é especificado para o transistor operar na região de saturação, funcionando como uma chave eletrônica. Garantindo-se um ganho de corrente baixo (beta forte), contudo com valor suficiente para acionar a bobina, calcula-se o resistor de base através das Equações (11), (12) e (13) (MALVINO; BATES, 2011):

$$I_C = I_{LED} + I_{bob} \quad (11)$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{eta}} \quad (12)$$

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

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;

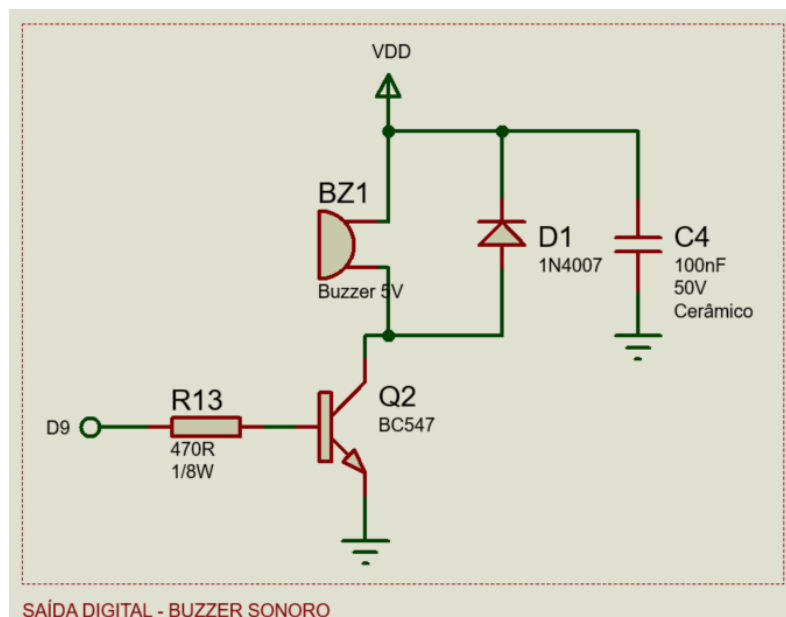
V_{in} = tensão de saída do uC ou entrada de R24;

V_{BE} = queda de tensão da junção base-emissor;

Um circuito de disparo também foi especificado para o acionamento do buzzer (Figura 16). O microcontrolador possui capacidade corrente para acionar o buzzer ativo de 5VCC, contudo, optou por utilizar um circuito de interface com o transistor BJT (Q2), garantindo a excursão de uma mínima corrente da saída digital D9 no ATmega328P.

O circuito responsável por acionar os motores CC (misturador e turbina) é mostrado na Figura 17, sendo composto por elementos de isolamento, disparo e chaveamento.

Figura 16: Circuito driver para acionamento do buzzer



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os transistores bipolares Q1 e Q3 realizam o disparo do transistor Mosfet (do inglês, Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) descrito como Q4. Este componente é o principal elemento do circuito de potência, responsável por acionar diretamente a carga via sinal PWM.

De acordo com Rashid (1999), o Mosfet é um componente controlado por tensão, com elevada impedância de entrada, altíssima velocidade de chaveamento, com pequenas perdas de potência durante a comutação e com tempos de chaveamento muito pequenos, na ordem

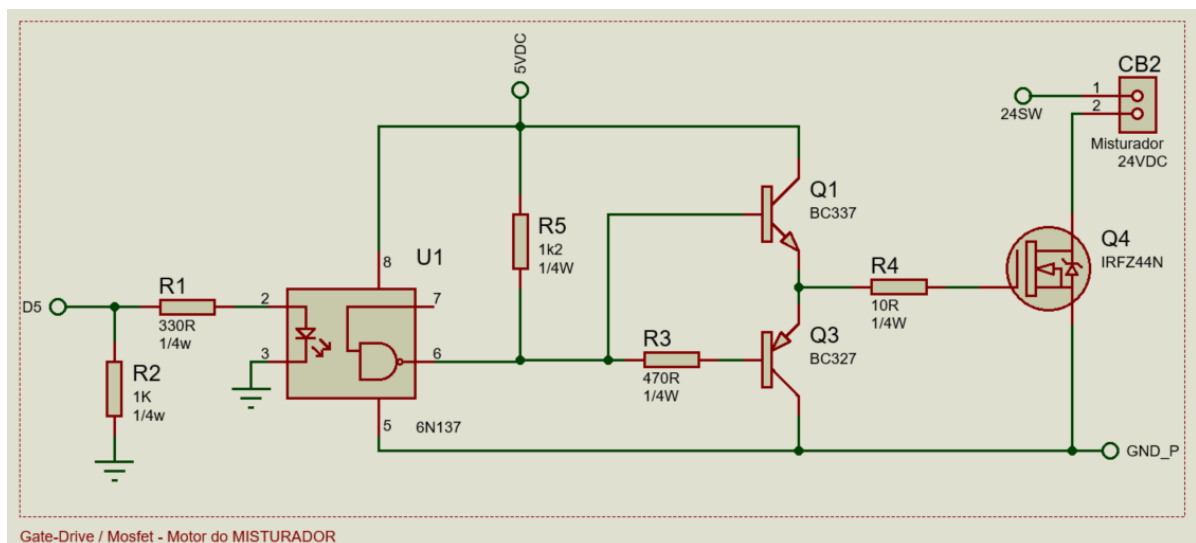
de nanossegundos. Este semiconductor é muito utilizado para operar em frequências elevadas e acionar cargas de potência através de pequenos sinais aplicados ao pino de controle chamado de gatilho.

O sinal de PWM é gerado pela saída digital D5 do ATmega328P, sendo necessário um optoacoplador para realizar a isolamento elétrica entre os circuitos de potência e de controle, garantindo isolamento elétrica entre os dois circuitos.

A entrada do circuito de disparo é composta por um optoacoplador. O resistor R1 limita a corrente do Led interno do optoacoplador e o resistor R2 funciona como elemento pull-down. O resistor R5 utilizado na saída do optoacoplador possui a função de resistor pull-up, devido a saída coletor aberto do circuito integrado.

O circuito integrado 6N137 é composto por um optoacoplador de um único canal que utiliza um diodo Led de alta eficiência e um fotodiodo operando como um detector óptico integrado.

Figura 17: Circuito de interface com isolamento para acionamento dos motores CC



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A saída do circuito é composta por um transistor NMOS na configuração coletor aberto. A grande vantagem de se utilizar este tipo de optoacoplador está na velocidade de operação, podendo operar com velocidades de comunicação de até 10MBd de velocidade (VISHAY, 2016).

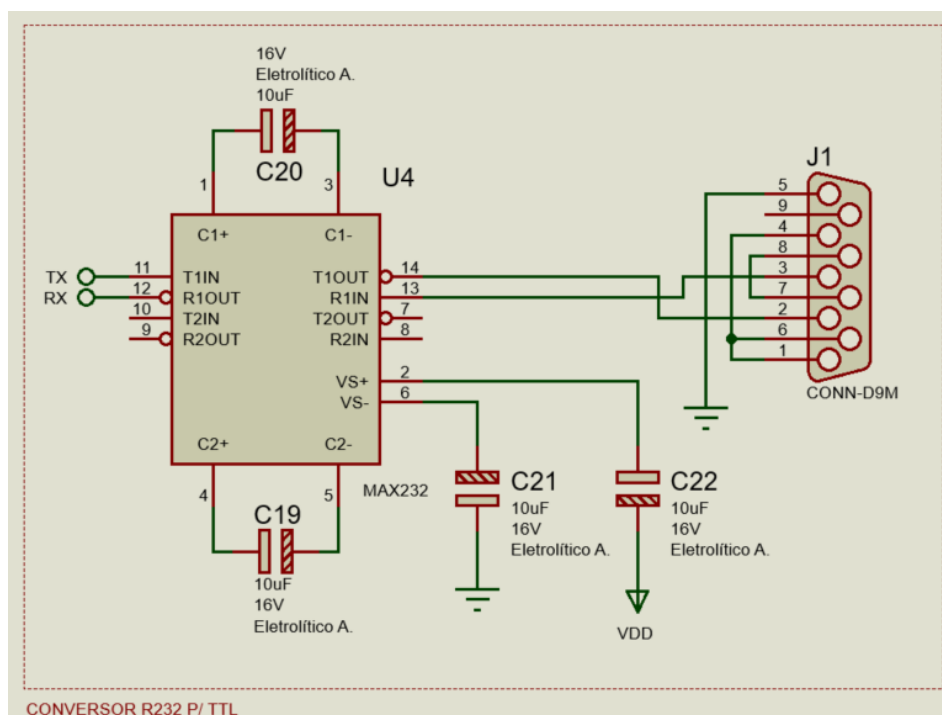
Os transistores de baixa potência, BC337 (Q1) e BC 327 (Q2) são elementos do circuito de disparo do Mosfet, sendo responsáveis por impor no terminal de controle do Mosfet (gate), níveis lógicos alto e baixo, garantindo respectivamente a condução e não condução da

chave de forma segura, e sem os efeitos da capacitância parasita de entrada da chave de potência.

Na Figura 18 é exibido o circuito capaz de estabelecer a comunicação serial através do padrão RS232, possibilitando à placa controladora, enviar e receber informações através da comunicação UART.

Considerando que um dos objetivos de trabalho é apresentar uma solução de *hardware*, oferecendo uma placa eletrônica de controle de baixo custo, utilizando componentes de fácil acesso comercial e vastamente difundidos na literatura, optou-se por utilizar um circuito interface dedicado para o sensor de nível do tipo eletrodo. Tipicamente, os sensores que fazem uso de eletrodos para medir nível utilizam relés eletrônicos comerciais para detectar e gerar sinais analógicos e/ou digitais. Contudo, objetivando oferecer uma solução eletrônica completa e de menor custo, foi utilizada uma placa (Shield), apresentada na Figura 18.

Figura 18: Circuito conversor TTL/RS232 para comunicação serial



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O módulo eletrônico de nível (Figura 19) foi soldado diretamente na placa de controle e conta com a presença de um circuito de entrada, com um comparador de tensão, e um circuito de saída composto por um relé eletromecânico, que envia um sinal binário para uma entrada digital do microcontrolador. O módulo é adequado para receber sinais de três eletrodos, contudo apenas um eletrodo foi utilizado no projeto.

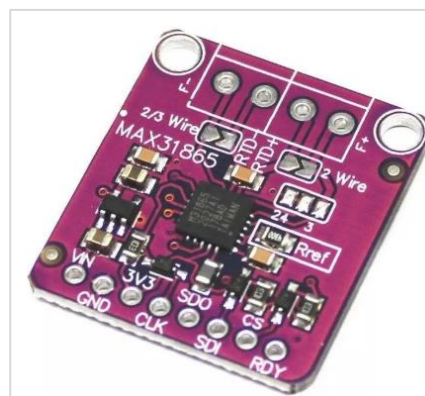
Figura 19: Módulo eletrônico para sensor de nível do tipo eletrodo



Fonte: Acervo do autor (2025).

O sensor de temperatura utilizado no projeto é o PT100, sendo uma termorresistência de platina com coeficiente positivo de temperatura. Como o sensor trata-se de apenas um dispositivo resistivo, um circuito de tratamento e condicionamento de sinais é necessário para que o elemento sensor seja conectado à entrada analógica do microcontrolador. Para realizar esta tarefa um módulo conversor RTD (Figura 20) é utilizado, sendo capaz de integrar o sensor resistivo ao microcontrolador, convertendo o sinal analógico em uma palavra digital, utilizando o protocolo de comunicação serial SPI (Serial Peripheral Interface) para interligar o conversor ADC de 15 bits (MAX31865) ao ATmega328P.

Figura 20: Módulo conversor RTD para Digital



Fonte: Acervo do autor (2025).

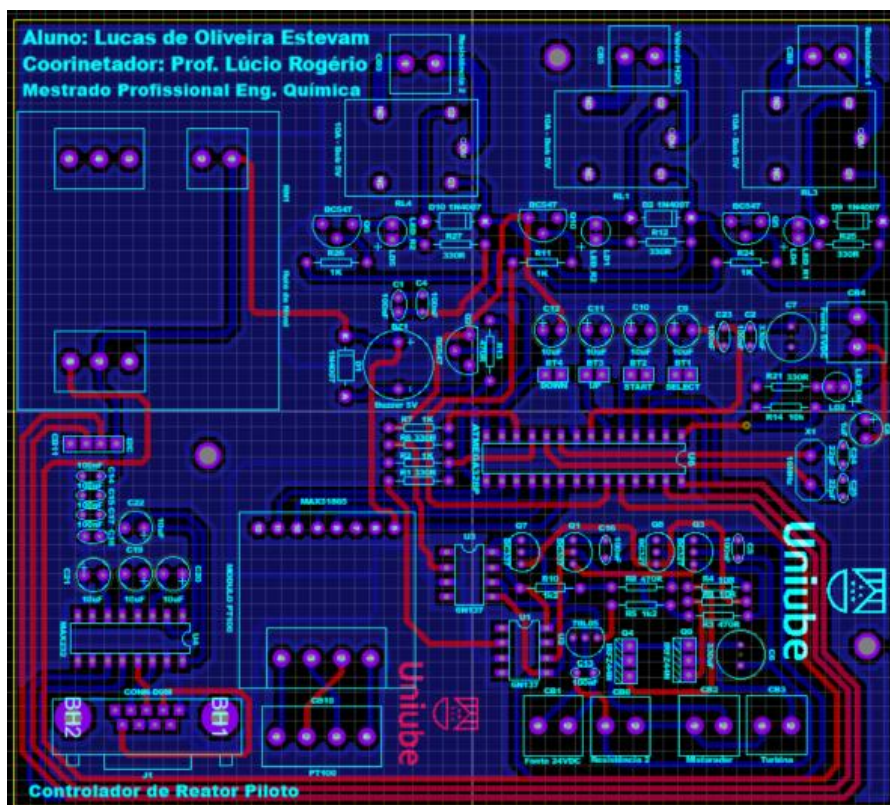
Após a finalização do projeto do circuito eletrônico, a placa eletrônica de controle foi desenvolvida. Desta maneira, inicialmente uma placa de circuito impresso (PCI) foi projetada e posteriormente fabricada, com objetivo de acomodar todos os componentes eletrônicos do circuito, incluindo o ATmega328P, os componentes discretos diversos, circuitos integrados e módulos Shields.

Durante o desenvolvimento do esquema eletrônico e a fabricação do protótipo eletrônico, foram utilizadas ferramentas de software para simulação de circuitos e desenvolvimento de esquemas eletrônicos e layouts de PCI.

Na Figura 21 tem-se o layout completo da PCI, construído com dupla face de trilhas (*layers*) e acomodando componentes do tipo PTH (*Pin through hole*), montados na face superior da placa. Conectores do tipo borne com parafusos foram utilizados para possibilitar as conexões de elementos externos com o circuito.

É importante salientar que a fabricação da placa foi realizada por empresa especializada, através de um processo industrial, oferecendo uma placa com máscara de solda nas duas faces, legenda na face superior e furos metalizados. As etapas de soldagem dos componentes, ensaios e testes na placa, foram desenvolvidas no Laboratório Circuitos Eletrônicos e Microcontroladores (LACEM), da Universidade de Uberaba (UNIUBE), com auxílio de ferramentas de bancada e instrumentos de medida.

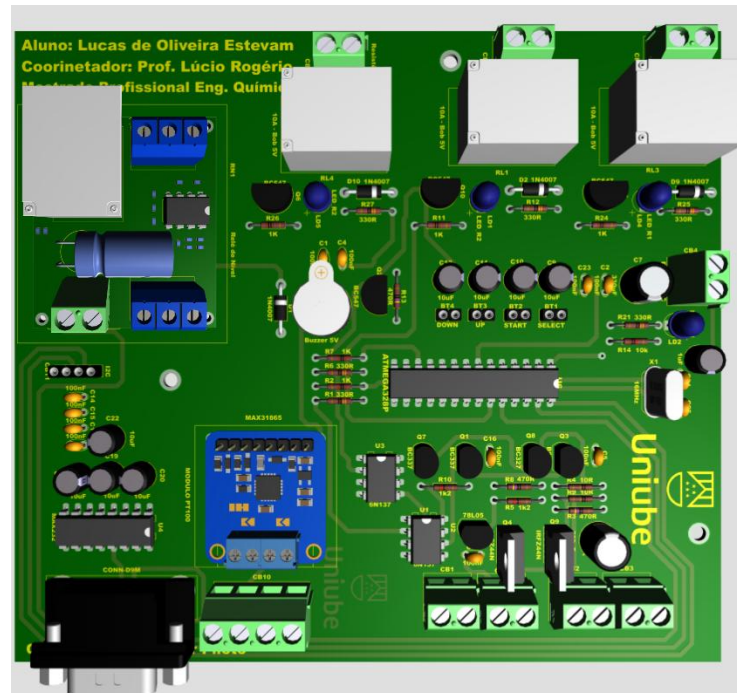
Figura 21: Layout da PCI em 2D – Placa eletrônica de controle do Reator.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O layout representado em três dimensões (3D) é mostrado na Figura 22. As dimensões finais da placa foram: 114 x 11 mm, com material base de 1,6 mm de espessura. Foi utilizada para a fabricação da PCI uma placa de fibra de vidro dupla face de 1 OZ (onça) de cobre.

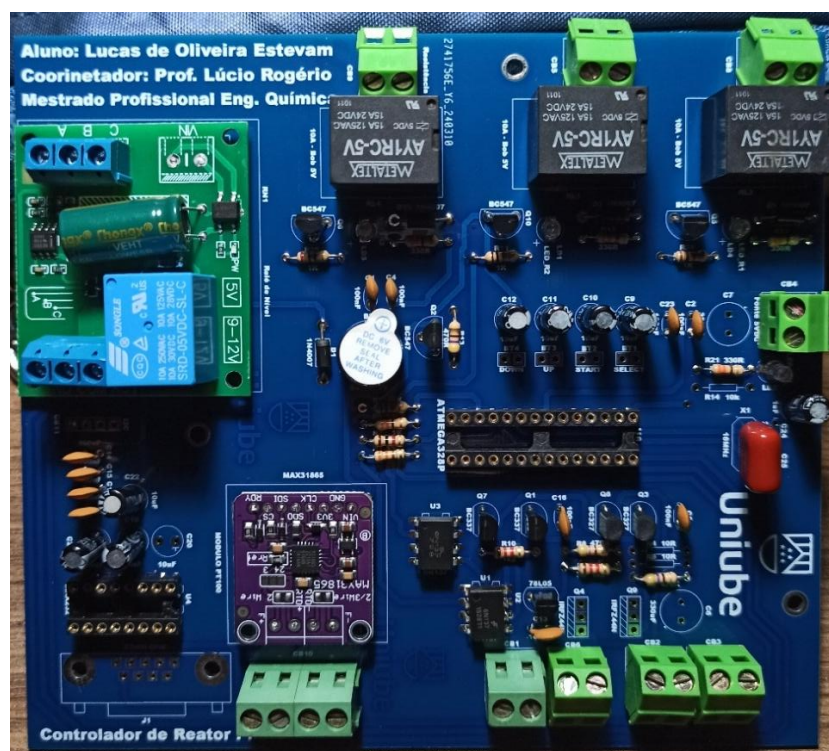
Figura 22: Layout da PCI em 3D – Placa eletrônica de controle do Reator.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Foi realizada a montagem e a soldagem completa da placa PCI e seus componentes, além de testes realizados para verificar a funcionalidade e o controle da placa, conforme seu projeto e desenvolvimento. Pode-se conferir a imagem da placa finalizada na Figura 23.

Figura 23: PCI finalizada – Placa de controle do reator.



Fonte: Acervo do autor (2025).

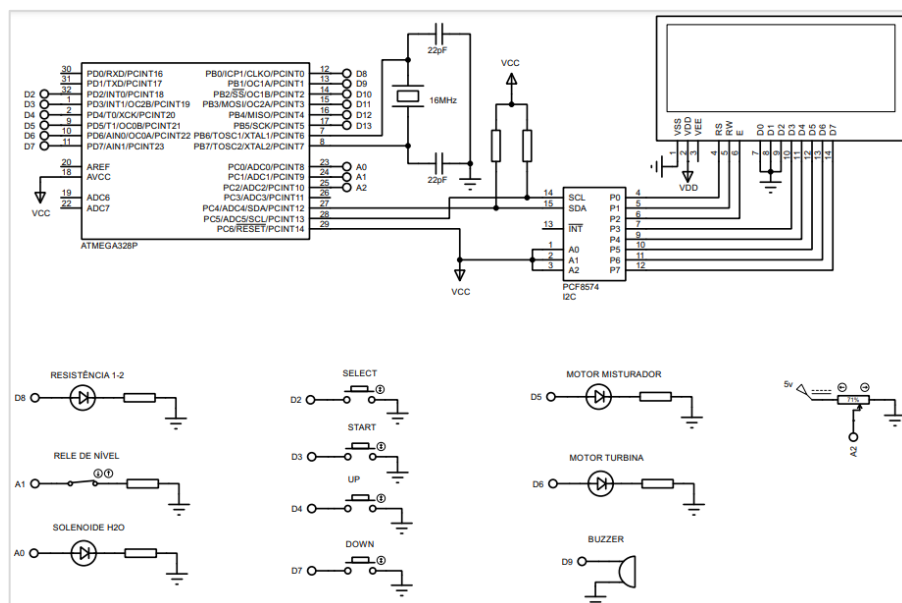
Um ponto importante a destacar é a utilização do microcontrolador ATmega328P ao invés da placa de prototipagem Arduino, como tipicamente é utilizada por projetistas, robistas e engenheiros. Além da redução de tamanho, a ausência da placa de desenvolvimento deixa o projeto mais profissional e pode reduzir o custo final da placa de controle. O ATmega328P é representado na Figura 22 pelo circuito integrado de encapsulamento DIL28, localizado mais ao centro da placa.

3.4 – Desenvolvimento do firmware da placa de controle

O código do microcontrolador ATmega328P foi construído utilizando o *software* Arduino IDE (Ambiente de Desenvolvimento Integrado). De acordo com Monk (2017), a IDE é um software livre (open source), com interface para códigos em linguagem C++, disponibilizando inúmeras bibliotecas, recursos de programação, depuração e gravação de códigos.

O firmware do microcontrolador, responsável por realizar a leitura de sensores, botões e dispositivos de entrada, e controlar os elementos de saída como motores, resistências de aquecimento, válvula de água e display LCD, foi desenvolvido em várias etapas envolvendo melhorias contínuas e ajustes via programação, sendo necessário utilizar um circuito de simulação, antes mesmo do PCI ter sido projetada e fabricada. Na Figura 24 é apresentado o esquema eletrônico simulável criado em um software de simulação de circuitos.

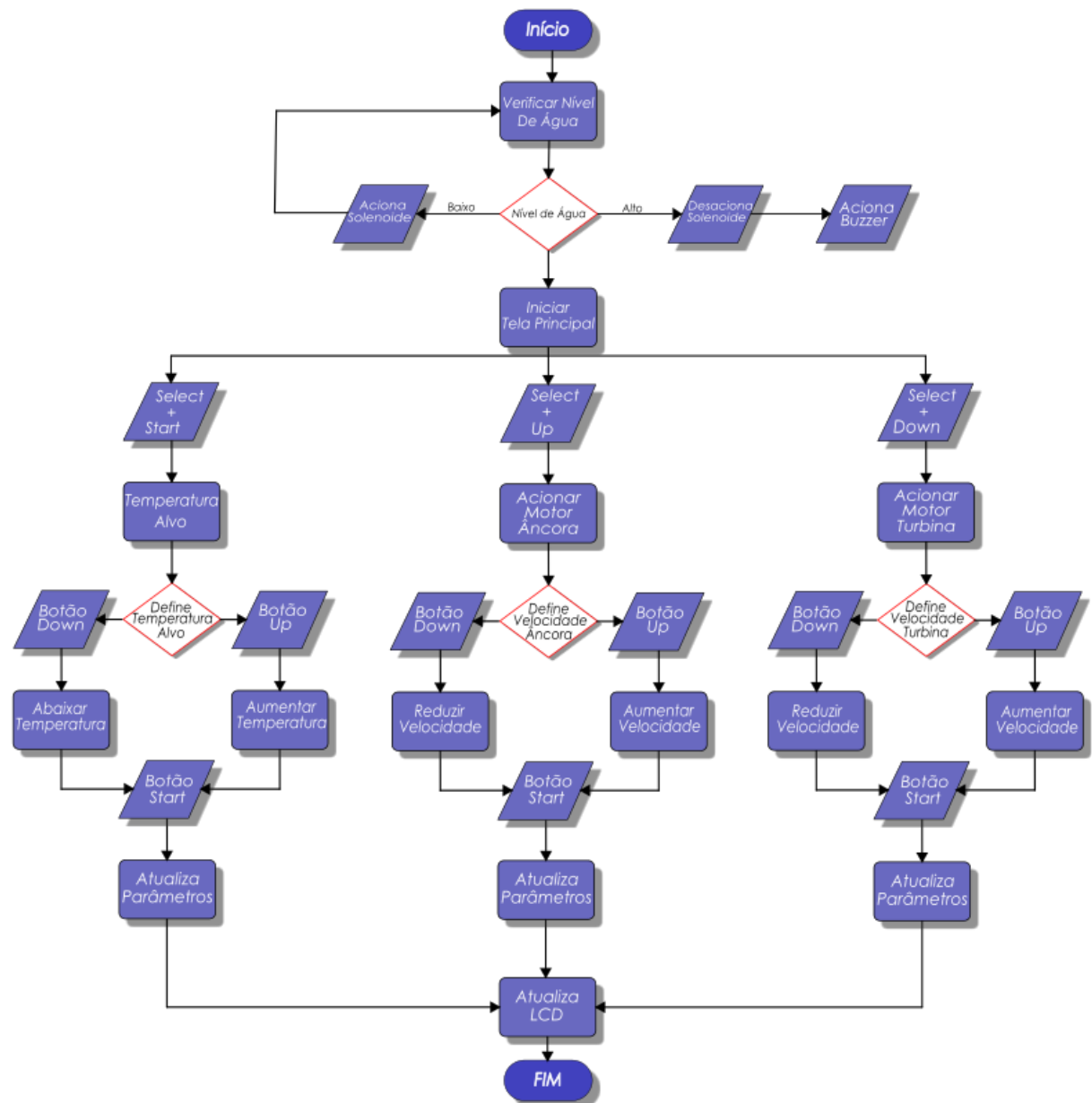
Figura 24: Circuito simulável para testes do código embarcado no microcontrolador



Fonte: Acervo do autor (2025).

Na Figura 25, é apresentado o fluxograma resumido contendo o algoritmo de controle do ATmega328P. Através do sensor de nível por eletrodo é possível garantir que a operação do reator acontecerá sobre condição da presença de água na camisa do tanque. Caso não haja a presença de água, a válvula de água do tipo diafragma irá ser acionada (saída A0) alimentando a camisa do tanque e se desligando ao atingir o nível adequado.

Figura 25: Fluxograma básico de operação do microcontrolador



Ao pressionar o botão ‘SELECT’ é possível selecionar o acionamento do motor do misturador ou da turbina, acionando o elemento selecionado através do botão ‘START’. A temperatura desejada (Set Point) pode ser ajustada pelo usuário do equipamento via botões. Para controlar a temperatura é utilizado controle liga-desliga ou ON-OFF com histerese, garantindo uma estreita faixa de aproximadamente 4 °C de variação. As resistências são acionadas por uma única saída do microcontrolador e estão alimentadas com 220VCA.

No display são apresentadas informações básicas para o usuário: status dos motores (ligado ou desligado), condição do nível de água e temperatura. Caso a temperatura ultrapasse um valor de segurança, um alarme sonoro é gerado e um aviso de segurança é apresentado no display LCD.

É possível ajustar a velocidade dos motores CC (misturador e turbina) através dos botões ‘UP’ e ‘DOWN’, alterando a razão cíclica do sinal PWM das saídas digitais D5 e D6. O diagrama de blocos apresentado é representativo e possui simplificações, contudo, o código completo em linguagem C é apresentado no apêndice deste trabalho.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos cálculos de potência para o sistema de agitação do reator piloto, considerando as características geométricas corrigidas do tanque, tipo de impulsor, propriedades do fluido e regimes de escoamento. Além disso, é incluída uma análise do impacto do aumento de viscosidade do fluido (10 vezes maior que a da água) sobre a potência requerida.

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 equações utilizadas foram as seguintes:

- Número de Reynolds:

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

- Número de Potência (Po):

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

- Potência requerida:

$$P = Po \cdot \rho \cdot N^3 \cdot D^5$$

Para fluidos altamente viscosos (escoamento laminar), pode-se adotar a forma simplificada:

$P = K \cdot \mu \cdot N^2 \cdot D^3$, onde K é uma constante dependente da geometria do impulsor.

4.3 Cálculo do Número de Reynolds

Com base nos dados corrigidos, foi calculado o valor de Re considerando a velocidade de 45 rpm e a viscosidade do fluido 10 vezes maior que a da água.

Velocidade (rpm)	N (s ⁻¹)	Reynolds (Re)
45	0.75	2.852

O valor obtido para o número de Reynolds foi de aproximadamente $Re = 2,852$, indicando que o escoamento se encontra na região de transição entre laminar e turbulento. Portanto, recomenda-se o uso da correlação baseada no número de potência (Po) para regime turbulento moderado.

4.4 Cálculo da Potência

A potência requerida para o sistema de agitação foi calculada pela expressão:

$$P = Po \cdot \rho \cdot N^3 \cdot D^5$$

Foram adotados valores típicos de Po na faixa de $0,3 \leq Po \leq 3,0$ para o impulsor tipo âncora, de forma a avaliar a influência dessa constante sobre a potência calculada.

Número de Potência (Po)	Potência (W)	Potência (mW)	Regime esperado
0,3	0.0357	35.68	Transicional
1,0	0.1189	118.95	Transicional
3,0	0.3568	356.84	Transicional / Turbulento

Os resultados obtidos mostram potências muito baixas (inferiores a 3 W), o que é coerente com sistemas de agitação de pequeno volume (≈ 5 L).

Para efeitos práticos e de segurança operacional, recomenda-se aplicar um fator de segurança entre 5 e 10 vezes, resultando em uma potência nominal de projeto entre 10W e 50W

4.5 Discussão dos Resultados

O resultado do número de Reynolds demonstra que o fluido apresenta comportamento intermediário entre regimes laminar e turbulento. Isso significa que pequenas variações de viscosidade ou velocidade de rotação podem alterar significativamente o padrão de escoamento.

A potência calculada reforça que o sistema de agitação opera com baixo consumo energético, sendo suficiente para homogeneizar líquidos com viscosidade até 10 vezes superior à da água. Entretanto, para misturas mais densas ou não newtonianas, recomenda-se utilizar motores de maior torque e sistemas de controle de velocidade adequados.

Portanto, para o equipamento estudado, recomenda-se o uso de um motor com potência nominal de aproximadamente 30 W, garantindo uma margem de segurança adequada e operação estável em diversas condições de viscosidade.

Dessa forma, os cálculos corrigidos confirmam a coerência entre as dimensões geométricas do reator e a potência necessária para a agitação eficiente, validando a metodologia proposta e fornecendo subsídios técnicos para o dimensionamento final do equipamento.

De acordo com este trabalho, os resultados desta pesquisa evidenciam a viabilidade e efetividade da automação empregada no tanque de mistura para multiprocessos em batelada. A partir dos testes conduzidos, constatou-se que o dispositivo

cumpriu os requisitos de controle térmico, eficácia na homogeneização e exatidão na operação dos sensores e atuadores.

Em relação ao controle de temperatura, o sistema foi capaz de manter a temperatura dentro do intervalo definido, empregando resistências elétricas e um sensor PT100 para um monitoramento exato. O sistema de controle ON-OFF com histerese assegurou uma variação mínima na temperatura, garantindo estabilidade durante o procedimento. Ademais, o sistema de resfriamento, que funciona através de válvula solenoide e fluxo de água, mostrou eficácia na diminuição da temperatura, tornando o equipamento apto para diversas situações de operação.

Quanto à agitação, a união de impulsores âncora e turbina permitiu uma mistura eficaz de líquidos de diferentes viscosidades, sem a formação de aglomerados ou distinção de fases. Os motores com modulação PWM possibilitaram modificações exatas na velocidade de rotação, facilitando a adaptação do processo a diversas formulações. O microcontrolador ATmega328P, juntamente com o sistema eletrônico de controle, responderam adequadamente às instruções e leituras dos sensores, confirmando a confiabilidade do circuito concebido.

Por fim, o desenvolvimento da interface homem-máquina (IHM) permitiu uma interação intuitiva e simplificada com o equipamento, possibilitando ao operador modificar parâmetros como temperatura, velocidade de agitação e tempo de funcionamento. O sistema de controle eletrônico demonstrou-se sólido e apto para futuras expansões, como a conexão com um sistema de supervisão através da interface RS232. Portanto, os achados indicam que o tanque de mistura automatizado é uma opção eficaz e econômica para usos em processos químicos, cosméticos e farmacêuticos em escala experimental.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

O módulo de controle do reator químico do tipo tanque foi projetado e construído conforme o planejado, mostrando-se funcional e confiável, desenvolvido com tecnologias de fácil acesso comercial, simples utilização e baixo custo, tornando-se uma alternativa às soluções que utilizam recursos de automação industrial (CLP's, IHMs, instrumentos industriais etc.) de alto custo. Além disso, este equipamento poderá atender as demandas de pequenas empresas do setor de cosméticos, auxiliando-os na produtividade e na qualidade dos produtos.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

De acordo com os estudos realizados neste trabalho, o desenvolvimento de sistemas de controle para equipamentos de maiores volumes deve ser a próxima etapa para um trabalho futuro. Nestes equipamentos, sendo eles acima de 500 L, os sistemas de aquecimento, resfriamento tendem a ser diferentes, sendo utilizado vapor d'água para o aquecimento e água fria e gelada para as fases de resfriamento.

Para que isso seja possível, toda a estrutura do equipamento é alterada, em relação ao equipamento apresentado neste trabalho. Nesses equipamentos, também são utilizadas pressões positivas e pressões negativas para a formulação de produtos específicos. As características desses equipamentos proporcionam a evolução deste estudo, onde poderá ser aplicado o controle de equipamentos com maior capacidade e maior número de sensores e elementos a serem controlados.

Outro ponto que merece destaque e deve ser considerado na continuidade deste trabalho é a implementação da comunicação serial utilizando RS323, a qual pode ser utilizada para enviar e receber dados de um sistema supervisorio, com maior interatividade e qualidade de operação do sistema, utilizando-se ferramentas de código aberto, como por exemplo o software ScadaBR.

REFERÊNCIAS

- AHMED, A. **Eletrônica de Potência**, São Paulo: Editora Prentice Hall, 2000. 479 p.
- BENNETT, S. A. **History of Control Engineering, 1800-1930**. 1 Ed. Peter Peregrinus Ltd, 1993. 262p.
- BLUM, J. **Explorando o Arduino: Técnicas e ferramentas para mágicas de engenharia**. 1. ed. Rio de Janeiro: Alta Books, 2016. 386p.
- BOGART, T. F. **Dispositivos e Circuitos Eletrônicos**, 3. Ed. São Paulo: Editora Makron Books, 2001. 463 p.
- BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos e teoria de circuitos**, 11. Ed. São Paulo: Pearson, 2013. 766 p.
- FOGLER, H. C. **Cálculo de Reatores – O Essencial Da Engenharia das Reações Químicas**. 1 Ed. São Paulo: Editora LTC, 2014. 598p.
- HAYES, R.E. **Introduction to Chemical Reactor Analysis**. 1 Ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2001. 436p.
- LAPLANTE, P. **Comprehensive Dictionary of Electrical Engineering**. 2 Ed. CRC Press, 2017. 786p.
- LEVENSPIEL, O. **Engenharia das Reações Químicas**. 3. Ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2000. 565p.
- MALVINO, A.; BATES, D.J. **Eletrônica**, 7. Ed. Porto Alegre: Editora Mc Graw Hill, 2011. 672 p.
- MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 7ed. Boston: McGraw-Hill, 2005. 1140 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. 690p.
- MONK, S. **Programação com Arduino: começando com sketches**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2017. 200p.
- MORRIS, P. R. **The Management of Industrial Automations: Managing Large-Scale Production**. Cambridge University Press, 2017.
- OGATA, K. **Modern Control Engineering**. 5 Ed. Prentice Hall, 1997. 894p.
- PECKOL, J. K. **Embedded Systems: A Contemporary Design Tool**. 1 Ed. John Wiley & Sons, 2019. 900p.

RASHID, M. H. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**, São Paulo: Editora Makron Books, 1999

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

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

SCHWAB, K. **The Fourth Industrial Revolution**. 1 Ed. Crown Business, 2017. 192p.

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

TADINI, C. TELIS, V.R.; MEIRELLES, A.J.A.; PESSOA, P.A. **Operações Unitárias na Indústria de Alimentos**. 1 Ed. Ed. São Paulo: Editora LTC, 2016. 690p.

VISHAY 6N137 **High Speed Optocoupler, Single and Dual, 10MBd**. 2016. Disponível em: <https://www.vishay.com/docs/84732/6n137_vo2601_vo2611.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2024

APÊNDICE

CÓDIGO EMBARCADO NO MICROCONTROLADOR

```
#include <Wire.h>

#include <LiquidCrystal_I2C.h>

#define F_CPU 16000000UL //Define o clock do microcontrolador

// Endereço do LCD via I2C (ajuste para 0x3F se necessário)
#define I2C_ADDR 0x27

// Configura o LCD para 20 colunas e 4 linhas
LiquidCrystal_I2C lcd(I2C_ADDR, 20, 4);

#define LED_PIN 5 // PD5/T1/OC0/PCINT21 - LED representando motor misturador
#define NIVEL_AGUA_PIN A1 // PC1/ADC1/PCINT9 - Sensor de nível da água
#define LED_SOLENOIDE A0 // PC0/ADC0/PCINT8 - Solenoide entrada de água
#define BUZZER_PIN 9 // PB1/OC1A/PCINT1 - Buzzer indicador
#define TEMP_SENSOR_PIN A2
#define RESISTENCIAS_PIN 8

#define BTN_SELECT 2 // PD2/INT0/PCINT18 - Botão SELECT
#define BTN_EXIT 3
#define BTN_UP 4
#define BTN_DOWN 7

bool status_led = false; //Estado atual do LED (inicialmente desligado)
bool bt_pressionado = false; //Indica se o botão já foi detectado como pressionado
String status_motor = "OFF"; //Estado inicial do motor
```

```

String nivel_agua = "BAIXO";          //Estado inicial do nível da água

int temp_alvo = 20;

int temp_atual = 20;

bool tela_config_temp = false;


void setup()
{
//Iniciando o LCD

lcd.begin(20, 4);                      //Inicia com 20 colunas e 4 linhas

lcd.init();                           //Inicializa o LCD

lcd.backlight();                       //Liga a luz de fundo do LCD

lcd.clear();                           //Limpa o LCD

boasvindas();                          //Inicia a função de boas-vindas

esperar (100);


//Iniciando Botões e Leds

pinMode(BTN_SELECT, INPUT_PULLUP);    //Configura o botão c/ entrada

pinMode(LED_PIN, OUTPUT);              //Configura o LED como saída

digitalWrite(LED_PIN, LOW);            //Garante que o LED comece desligado


pinMode(NIVEL_AGUA_PIN, INPUT_PULLUP); //Sensor c/ pull-up (chave aberta = low)


pinMode(LED_SOLENOIDE, OUTPUT);        //Configura a solenoide como saída

digitalWrite(LED_SOLENOIDE, LOW);      //Garante que a solenoide inicie desligada


pinMode(BUZZER_PIN, OUTPUT);          // Sinalizador Sonoro - Buzzer

digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW);        // Buzzer começa desligado


pinMode(RESISTENCIAS_PIN, OUTPUT);

```

```
digitalWrite(RESISTENCIAS_PIN, LOW);
```

```
pinMode(BTN_EXIT, INPUT_PULLUP);
```

```
pinMode(BTN_UP, INPUT_PULLUP);
```

```
pinMode(BTN_DOWN, INPUT_PULLUP);
```

```
temp_atual = map(analogRead(TEMP_SENSOR_PIN), 0, 1023, -50, 250);
```

```
verificarNivelAgua(); //Faz a verificação inicial do nível da água
```

```
telaprincipal (); //Inicia a função de Tela Principal
```

```
}
```

```
void esperar(unsigned long tempo) //Aguarda o tempo desejado sem bloquear o código
```

```
{
```

```
unsigned long inicioEspera = millis();
```

```
while (millis() - inicioEspera < tempo) {
```

```
}
```

```
}
```

```
//void boasvindas ()
```

```
{
```

```
const char* mensagem = "MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA QUIMICA";
```

```
int tam_msg = strlen(mensagem);
```

```
// Limita o texto para caber no LCD (máximo 20 caracteres visíveis por vez)
```

```
char displayBuffer[21]; //Espaço para 20 caracteres + nulo ('\0')
```

```
for (int i = 0; i <= tam_msg; i++)
```

```
{
```

```

// Preenche o buffer com a parte visível da mensagem
strncpy(displayBuffer, mensagem + i, 20); //Copia até 20 caracteres da mensagem
displayBuffer[20] = '\0';                //Certifica-se de que a string é terminada com '\0'

lcd.setCursor(0, 1);                      //Define o cursor para a linha 2, coluna 0
lcd.print("          ");                  //Limpa a linha 2 do LCD
lcd.setCursor(0, 1);                      //Retorna o cursor para o início da linha 2
lcd.print(displayBuffer);                  //Exibe o conteúdo do buffer no LCD
esperar(300);                             //Tempo para a animação (300 ms)
}

esperar(100);                             //Pausa para manter a mensagem final visível
lcd.clear();                              //Limpa a tela para futuras operações
}

void telaprincipal ()
{
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Motor Ancora:");

  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Motor Turbina:");

  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print("Nivel Agua:");

  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("Temperatura:");

  atualizarLCD();

```

```
}
```

```
void atualizarLCD()
```

```
{
```

```
    // Atualiza estado do motor
```

```
    lcd.setCursor(17, 0);                //Posição do estado do motor na linha 1
```

```
    lcd.print(" ");                    //Limpa o espaço antes de escrever
```

```
    lcd.setCursor(17, 0);
```

```
    lcd.print(status_motor);            //Escreve "ON" ou "OFF"
```

```
    // Atualiza estado do nível da água
```

```
    lcd.setCursor(15, 2);
```

```
    lcd.print(" ");                    //Limpa espaço antes de escrever
```

```
    lcd.setCursor(15, 2);
```

```
    lcd.print(nivel_agua);
```

```
    // Atualiza estado da temperatura
```

```
    lcd.setCursor(16, 3);
```

```
    lcd.print(" ");                    //Limpa espaço antes de escrever
```

```
    lcd.setCursor(16, 3);
```

```
    lcd.print(temp_atual);
```

```
    lcd.print("C ");
```

```
}
```

```
//Função para verificar o nível da água e atualizar o LED corretamente
```

```
void verificarNivelAgua()
```

```
{
```

```

bool estado_nivel = digitalRead(NIVEL_AGUA_PIN);          //Leitura do sensor

if (estado_nivel == LOW)
{
    nivel_agua = "ALTO";
    digitalWrite(LED_SOLENOIDE, LOW);                    //Desliga a solenoide

} else {
    nivel_agua = "BAIXO";
    digitalWrite(LED_SOLENOIDE, HIGH);                    //Aciona a solenoide
}

atualizarLCD();
}

// Função para acionar o buzzer por 1 segundo
void tocarBuzzer()
{
    digitalWrite(BUZZER_PIN, HIGH);
    esperar(1000);                                         //Mantém o buzzer ligado por 1 segundo
    digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW);
}

void configurarTemperatura()
{
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(6, 0);
    lcd.print("CONFIG TEMP");

```

```
while (digitalRead(BTN_SELECT) == LOW && digitalRead(BTN_EXIT) == LOW)
{
    esperar(100);
}

while (true) {
    temp_atual = map(analogRead(TEMP_SENSOR_PIN), 0, 1023, -50, 250);
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Atual: ");
    lcd.print(temp_atual);
    lcd.print("C ");
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("Alvo: ");
    lcd.print(temp_alvo);
    lcd.print("C ");

    if (digitalRead(BTN_UP) == LOW) {
        temp_alvo += 5;
        esperar(150);
    }
    if (digitalRead(BTN_DOWN) == LOW) {
        temp_alvo -= 5;
        esperar(150);
    }
    if (digitalRead(BTN_SELECT) == LOW) {
        esperar(150);
        break;
    }
}
```

```

    }

    controlarResistencias();

    lcd.clear();

    telaprincipal();
}

void controlarResistencias()
{
    temp_atual = map(analogRead(TEMP_SENSOR_PIN), 0, 1023, -50, 250);

    if (temp_atual < temp_alvo - 1.5) {
        digitalWrite(RESISTENCIAS_PIN, HIGH);
    } else if (temp_atual > temp_alvo + 1.5) {
        digitalWrite(RESISTENCIAS_PIN, LOW);
    }
}

void loop()
{
    static unsigned long lastDebounceTime = 0;           //Marca o último instante de alteração do
    botão

    const unsigned long debounceDelay = 50;              //Tempo de debounce em milissegundos

    // Leitura do estado atual do botão

    bool status_bt = !digitalRead(BTN_SELECT);           //Invertido porque está usando PULLUP

    // Verifica se houve mudança no estado do botão (evita flutuações rápidas)

    if (status_bt && !bt_pressionado) {
        unsigned long currentTime = millis();

```

```

if (currentTime - lastDebounceTime > debounceDelay)
{

    // Alterna o estado do LED apenas em um acionamento
    status_led = !status_led;
    digitalWrite(LED_PIN, status_led ? HIGH : LOW);
    status_motor = status_led ? "ON" : "OFF"; //Atualiza o texto do motor
    atualizarLCD();                          //Atualiza o LCD com o novo status
    lastDebounceTime = currentTime;         //Atualiza o tempo de debounce

}

bt_preSSIONado = true;                      //Marca o botão como pressionado
}

// Libera a detecção de nova pressão quando o botão é solto
if (!status_bt)
{
    bt_preSSIONado = false;
}

// Leitura do nível da água
bool estado_nivel = digitalRead(NIVEL_AGUA_PIN); //Leitura do sensor

// Se houve mudança no estado do nível da água, atualiza o LCD
if (estado_nivel == LOW && nivel_agua != "ALTO")
{
    nivel_agua = "ALTO";
}

```

```

digitalWrite(LED_SOLENOIDE, LOW);           //Desliga a solenoide
atualizarLCD();

tocarBuzzer();                             //Aciona o buzzer por 1 segundo

} else if (estado_nivel == HIGH && nivel_agua != "BAIXO") {
    nivel_agua = "BAIXO";
    digitalWrite(LED_SOLENOIDE, HIGH);       //Aciona a solenoide
    atualizarLCD();
}

temp_atual = map(analogRead(TEMP_SENSOR_PIN), 0, 1023, -50, 250);
atualizarLCD();

if (digitalRead(BTN_SELECT) == LOW && digitalRead(BTN_EXIT) == LOW)
{
    configurarTemperatura();
}

controlarResistencias();
esperar(200);
}

```