

Desenvolvimento e construção de um controlador eletrônico para automação de reator industrial

Development and construction of an electronic controller for industrial reactor automation

¹Raian Souza Sena, ²Lucas de O. Estevam, ³José Roberto Delalibera Finzer, ⁴Carlos Renato Borges dos Santos, ⁵Lúcio Rogério Júnior

¹Graduando em Engenharia Elétrica – Instituto Federal do Triângulo Mineiro – Campus Paracatu
(raian.sena@estudante.iftm.edu.br)

²Mestrando em Engenharia Química – Universidade de Uberaba – Campus Aeroporto Uberaba
(lucas.estevam32@gmail.com)

³Doutor em Engenharia Química – Universidade de Uberaba – Campus Aeroporto Uberaba
(coordenador.me.ppgeq@uniube.br)

⁴Doutor em Engenharia Elétrica – Instituto Federal do Triângulo Mineiro – Campus Paracatu
(carlosrenato@iftm.edu.br)

⁵Doutorando em Engenharia Elétrica – Instituto Federal do Triângulo Mineiro – Campus Ituiutaba
(luciorogério@iftm.edu.br)

RESUMO: A automação de processos industriais tem se mostrado fundamental para o aumento da eficiência e da qualidade na engenharia. O objetivo deste projeto é o desenvolvimento e construção de um controlador eletrônico microcontrolado para reatores industriais, tendo como características o baixo custo, tecnologia simples de implementar e fácil acesso comercial. O sistema proposto, além de confiável, é capaz de automatizar tanques de mistura industrial, destinados a multiprocessos por batelada, oferecendo maior viabilidade se comparado a projetos tradicionais que utilizam recursos de automação de alto custo. A placa eletrônica desenvolvida utiliza o microcontrolador ATmega328P, sendo responsável por controlar o acionamento dos motores, resistências de aquecimento, válvulas e sinalização sonora. Uma interface utilizando um display alfanumérico é incorporada ao hardware, auxiliando no monitoramento e operação do equipamento. Depois da construção do hardware e software, todos os recursos da placa de controle foram devidamente testados em bancada e os resultados obtidos evidenciam sua operação confiável e satisfatória, de acordo com o esperado. Conclui-se que através do uso das tecnologias acessíveis e de baixo custo no mercado, é possível desenvolver sistemas que atendam às necessidades de fabricantes de máquinas e empresas do setor industrial, reduzindo custos e aumentando a produtividade.

Palavras Chave: Placa eletrônica de controle. Reator de cosméticos. Tanque de batelada. Tanque de multiprocesso.

ABSTRACT: Industrial process automation has proven to be essential for improving efficiency and quality in engineering applications. The objective of this project is the development and construction of a microcontroller-based electronic controller for industrial reactors, featuring low cost, simple implementation technology, and easy commercial availability. The proposed system, in addition to being reliable, can automate industrial mixing tanks designed for multiprocess batch operations, offering greater feasibility when compared to traditional projects that rely on high-cost automation resources. The developed electronic board employs the ATmega328P microcontroller, responsible for controlling the operation of motors, heating elements, valves, and audible signaling. A user interface based on an alphanumeric display is integrated into the hardware, assisting in equipment monitoring and operation. After the development of both hardware and software, all functionalities of the control board were thoroughly tested under laboratory conditions. The results obtained demonstrate reliable and satisfactory operation, in accordance with the expected performance. It is concluded that, using accessible and low-cost technologies available on the market, it is possible to develop systems that meet the needs of machine manufacturers and industrial sector companies, while reducing costs and increasing productivity.

Keywords: Batch tank; Cosmetic reactor; Electronic control board; Multiprocess tank.

Recebido em:
07/06/2026
Publicado em:
06/07/2026

1. INTRODUÇÃO

A concepção de reproduzir mecanicamente as ações humanas antecede a Revolução Industrial. De acordo com Guarnieri (2010), os primeiros indícios de automação remontam à China antiga, sendo que engenheiros do período helenístico obtiveram destaque ao demonstrar êxito em suas construções. Contudo, foi somente durante a Revolução Industrial que a automação passou a ser efetivamente empregada como solução para os processos produtivos.

Ao longo das últimas décadas a automação industrial vem se mostrando essencial para a modernização e otimização de máquinas e processos produtivos. Com o avanço das tecnologias embarcadas dotadas de inúmeros recursos de aquisição, processamento e conectividade, surgem diversas alternativas de baixo custo e fácil aquisição para aplicação em projetos de máquinas (Sandeep et al., 2015; Sonali e Lagu, 2014), bem como em equipamentos e dispositivos, como mostrado por Santos e Rogério Júnior (2020) e em aplicações comerciais, destacados por Resende (2021). Essas soluções contribuem para atender à crescente demanda por automação e controle nesses sistemas.

No contexto de tanques industriais de mistura, responsáveis por realizar reações químicas e processos de homogeneização, estão presentes dispositivos de automação e controle com elevado custo e nem sempre estão prontamente disponíveis, em função de barreiras comerciais impostas por representantes e fornecedores. Nesse contexto, a adoção de tecnologias de baixo custo (Santos e Rogério Júnior, 2020; Resende, 2021), e amplamente exploradas em trabalhos acadêmicos, mostra-se vantajosa devido à sua maior acessibilidade e à ampla disponibilidade de informações técnicas em projetos previamente desenvolvidos.

Desta maneira, o presente trabalho propõe o desenvolvimento e construção de um hardware e um firmware dedicados a automatizar e controlar um reator com tanque de mistura industrial, tipicamente utilizado em multiprocessos de batelada de diversos produtos, como por exemplo na indústria cosmética.

2. MATERIAIS E MÉTODO

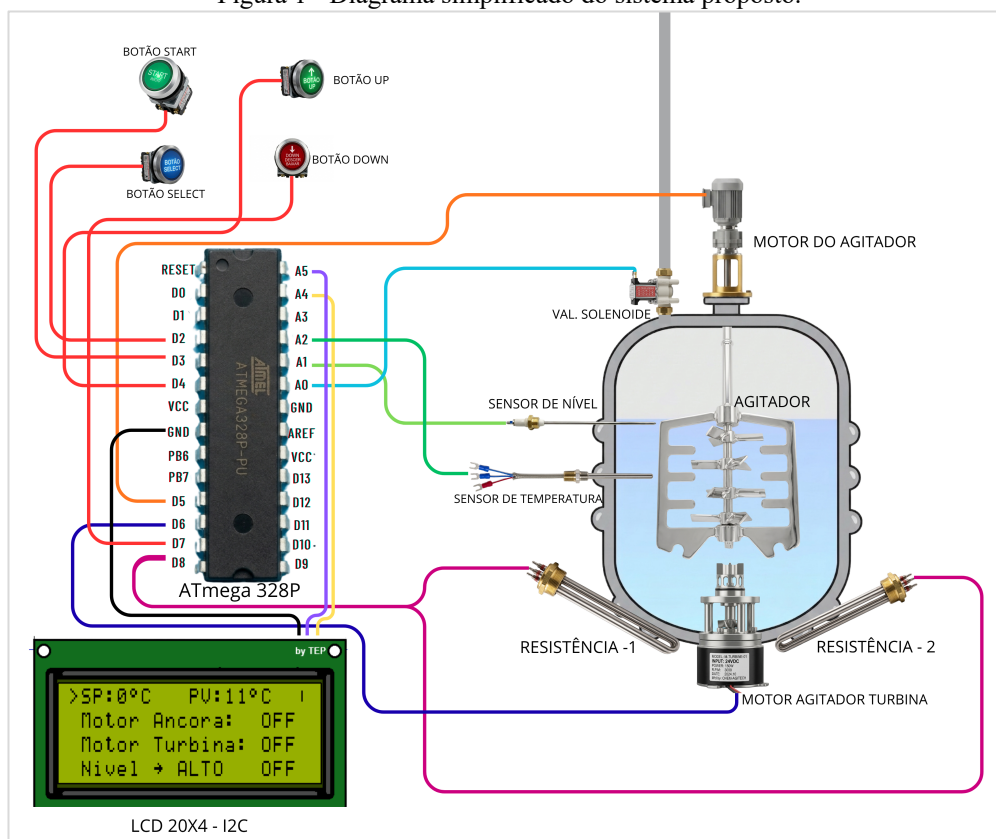
Descrever O sistema proposto é composto por um conjunto integrado de elementos de hardware e software, podendo ser estruturado em três partes principais: o projeto e simulação do circuito eletrônico, a elaboração e fabricação da placa de circuito impresso e desenvolvimento do firmware do microcontrolador.

Na Figura 1, é exibido um diagrama representativo simplificado contento os principais elementos de entrada e saída conectados ao microcontrolador. Os principais elementos do reator são: dois agitadores; uma válvula de injeção de água na camisa do tanque; duas resistências de aquecimento; sensor de temperatura; sensor de nível de água.

O projeto do circuito eletrônico tem como componente central o microcontrolador ATmega328P, uma plataforma de 8 bits que dispõe de 8 entradas analógicas e 14 entradas/saídas digitais, das quais 6 podem operar como saídas PWM. Além disso, o dispositivo incorpora interfaces de comunicação serial e conversores analógico-digitais (ADC) com resolução de 10 bits (Blum, 2016).

Ligados ao microcontrolador estão vários periféricos de entrada, sendo eles: um sensor de nível do tipo eletrodo; botões de pulso para configuração e comandos; um sensor de temperatura do tipo termorresistência (PT100); uma interface de comunicação serial padrão RS232/485. Os elementos de saída que são acionados pelo ATmega328P 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*); três circuitos de interface com relês eletromecânicos para acionamento das resistências e da válvula de água.

Figura 1 - Diagrama simplificado do sistema proposto.

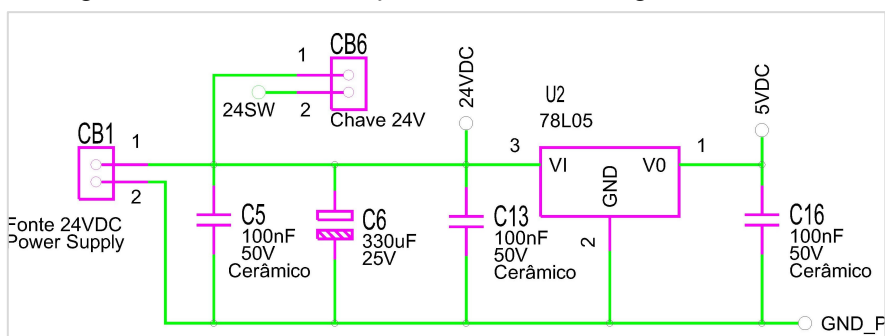


2.1 Circuitos e Dimensionamentos

Com objetivo de melhor descrever o hardware de controle proposto neste trabalho, a seguir são apresentados os principais blocos do circuito eletrônico. 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.

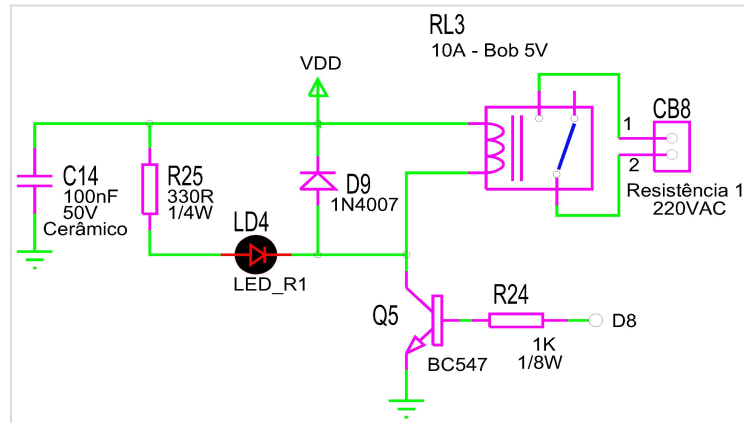
Um regulador de tensão linear 78L05 do tipo integrado é utilizado para regular 5VCC, alimentando assim todo o circuito de controle. É importante destacar que a linha de 24VCC alimenta os motores do misturador e turbina, enquanto a alimentação 220VCA é utilizada para alimentar as resistências de aquecimento, no qual o circuito é mostrado através da Figura 2.

Figura 2: Entrada de alimentação 24VCC e circuito regulador de 5 VCC.



No circuito de acionamento das resistências é utilizado relés eletromecânicos (Figura 3). O transistor bipolar de junção (TBJ) modelo BC547 atua como chave, isolando o circuito de controle do circuito de potência (Boylestad e Nashelsky, 2013).

Figura 3: Circuito de interface com relé para acionamento das resistências.



Operando como diodo roda livre, (do inglês, *Freewheeling diodo FWD*), o diodo D9 é responsável por criar um caminho paralelo para a corrente elétrica armazenada na bobina durante o desligamento do TBJ. A negligência 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 (Malvino e Bates, 2011).

O resistor R25 é utilizado como elemento limitador de corrente para o Led (LD4) e pode ser calculado através da equação (1):

$$R_{Led} = \frac{V_{DD} - V_{Led}}{I_{Led}} \quad (1)$$

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 no Led;

I_{Led} = corrente do Led (tipicamente entre 10 e 20 mA).

O resistor da base do TBJ (R24) tem o valor definido para garantir a saturação, de acordo com as equações (2), (3), e (4):

$$I_c = I_{Led} + I_{bob} \quad (2)$$

$$I_B = \frac{I_c}{\beta_{eta}} \quad (3)$$

$$R_{base} = \frac{V_{in} - V_{BE}}{I_B} \quad (4)$$

Onde:

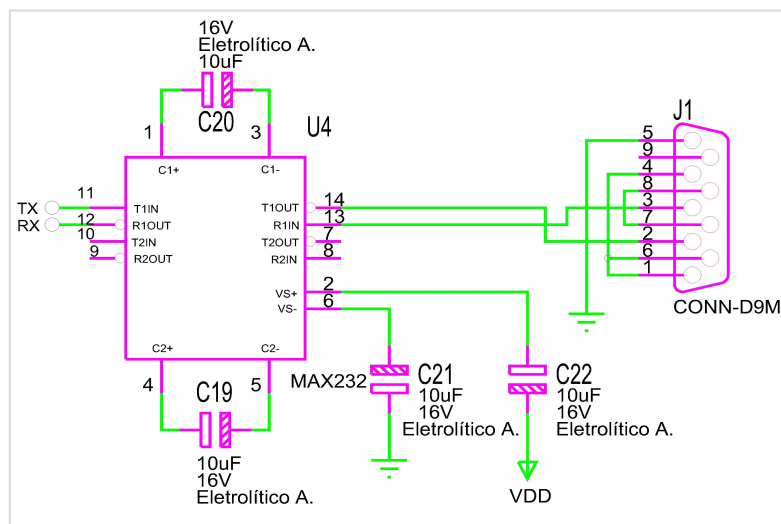
I_c = corrente de coletor do transistor;

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

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

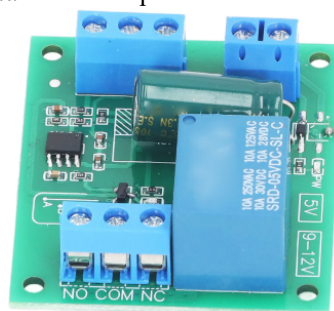
I_B = corrente de base / corrente de saída do uC ;

Figura 6: Circuito conversor TTL/RS232 para comunicação serial.



No que tange ao subsistema de monitoramento de nível por eletrodos, optou-se pela implementação de um *shield* dedicado (Figura 7), no qual a arquitetura incorpora um comparador de tensão para o processamento do sinal analógico.

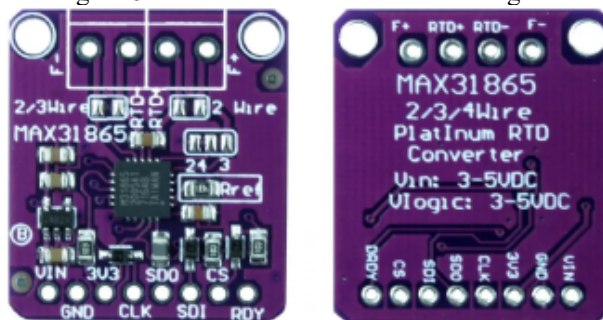
Figura 7: *Shield* eletrônico para sensor de nível para eletrodo.



A integração do sensor PT100 ao sistema é viabilizada por um módulo conversor RTD (*Resistance Temperature Detector*), conforme ilustrado na Figura 8. Este subsistema utiliza o circuito integrado MAX31865, que desempenha a função de converter a variação de resistência do sensor analógico (tipicamente uma termorresistência do tipo PT100) em um sinal digital.

A transmissão desses dados para o controlador central é realizada por meio do protocolo de comunicação SPI (*Serial Peripheral Interface*), garantindo alta-fidelidade e imunidade a ruídos no tráfego de informações.

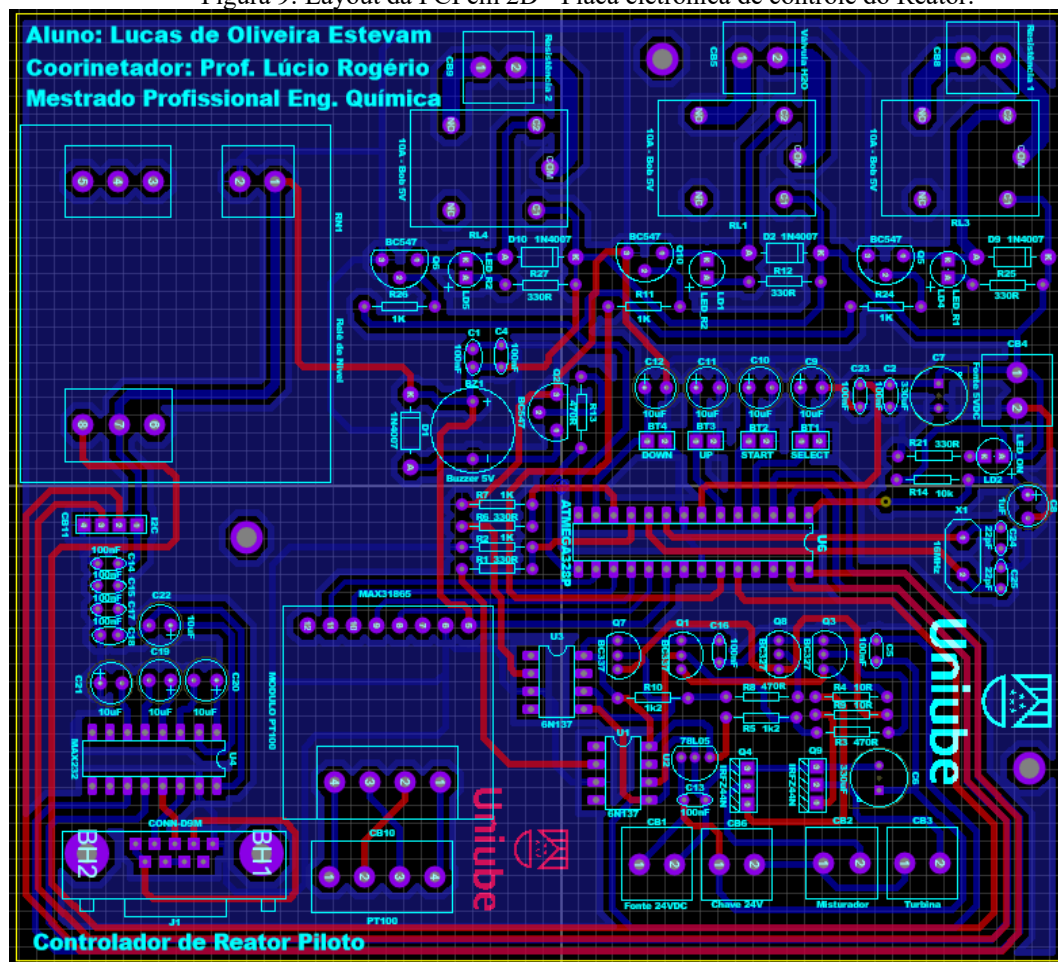
Figura 8: Módulo Conversor RTD Para Digital.



2.2 Placa de Circuito Impresso (PCI)

Após a etapa de elaboração do esquema eletrônico, foi desenvolvido o layout da placa de circuito impresso (PCI), apresentado na Figura 9, que posteriormente passou pelos processos de fabricação e montagem, incorporando todos os componentes eletrônicos do sistema. O protótipo adota uma arquitetura de dupla face (double-layer), com trilhas em ambas as faces e furos metalizados, além da aplicação de máscara de solda para proteção mecânica e galvânica. Para o interfaceamento de sinais e potência, foram empregados conectores do tipo borne, assegurando conexões seguras e confiáveis.

Figura 9: Layout da PCI em 2D - Placa eletrônica de controle do Reator.



Um aspecto relevante no desenvolvimento deste hardware consiste na utilização do microcontrolador ATmega328P de forma independente, ao invés do emprego de plataformas de prototipagem pré-montadas, como o Arduino.

Embora o uso de módulos de desenvolvimento seja uma prática comum entre projetistas e engenheiros em fases iniciais, a integração direta do componente à PCI foi adotada por oferecer vantagens determinantes:

- Otimização de espaço: permite a compactação do hardware e uma disposição mais eficiente dos componentes;
- Viabilidade econômica: reduz o custo final da unidade de controle ao eliminar periféricos desnecessários presentes em placas comerciais;
- Rigor profissional: confere ao projeto um caráter industrial e finalizado, adequando-o a requisitos mais estritos de engenharia e confiabilidade.

A modelagem tridimensional do layout é apresentada na Figura 10, enquanto a placa física no processo de receber a soldagem dos componentes é mostrada na Figura 11. O microcontrolador ATmega328P está representado na Figura 10 pelo circuito integrado de encapsulamento DIL28, localizado mais ao centro da placa.

Figura 10: Layout da PCI em 3D - Placa eletrônica de controle.

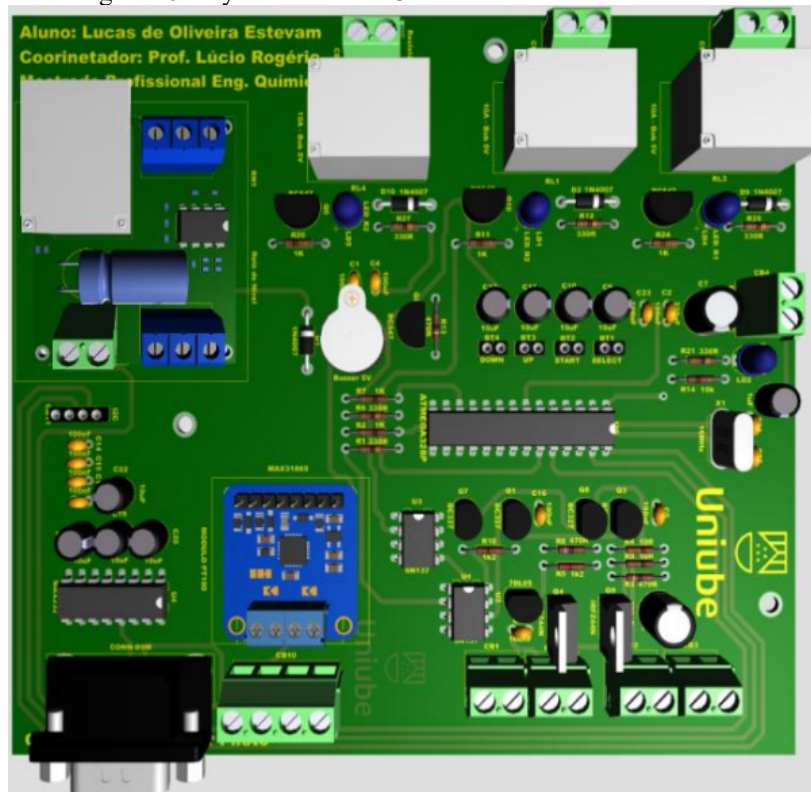
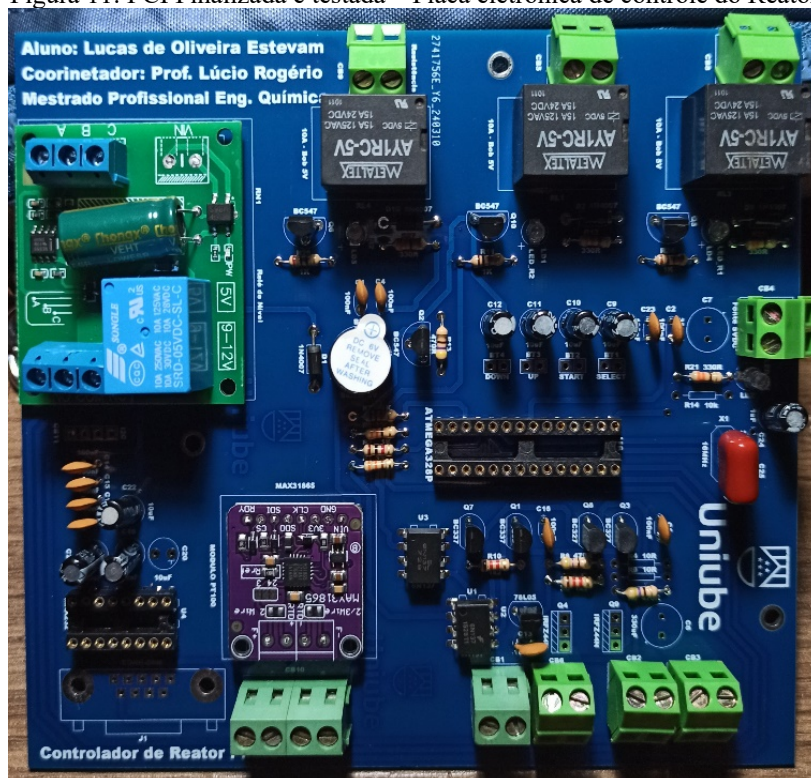


Figura 11: PCI Finalizada e testada – Placa eletrônica de controle do Reator



3. RESULTADOS/ DISCUSSÕES

Apresentação detalhada de todos os resultados da pesquisa, podendo utilizar recursos visuais como tabelas e/ou figuras.

Deve-se apresentar a fundamentação teórica dos princípios envolvidos que influenciaram os resultados observados. Enfatizar os avanços que a pesquisa poderá proporcionar em relação ao setor pesquisado. Deve ser embasado em referencial teórico dos últimos 5 anos (exceto as referências clássicas e de considerável importância para a área de pesquisa).

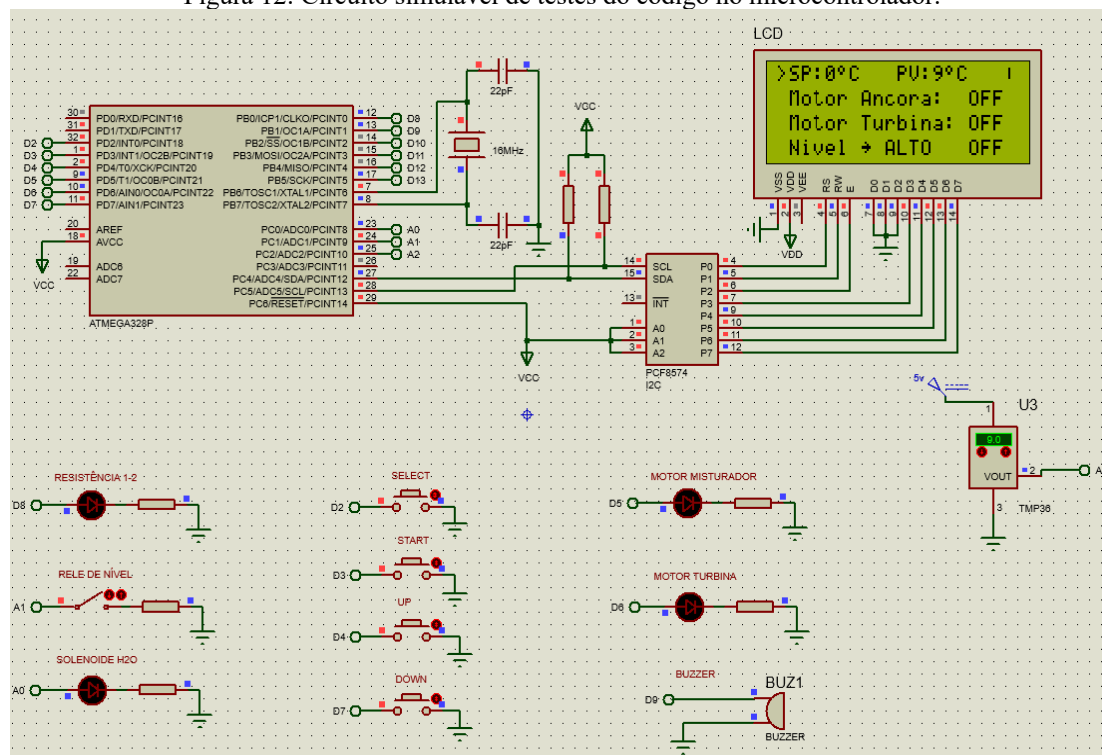
2.3 Desenvolvimento da Programação e Controle

A programação do microcontrolador ATmega328P foi realizada no ambiente de desenvolvimento integrado (Integrated Development Environment - IDE) Arduino (Monk, 2017). Essa plataforma de código aberto (open source) provê uma interface otimizada para a linguagem C++, disponibilizando um vasto ecossistema de bibliotecas e ferramentas essenciais para a codificação, depuração e transferência do código para o hardware.

O firmware concebido é responsável pelo gerenciamento de todas as funções do sistema, atuando na aquisição de sinais de entrada (sensores e botões) e no controle dos atuadores e dispositivos de saída, tais como motores, resistências de aquecimento, válvulas de fluxo e o display LCD.

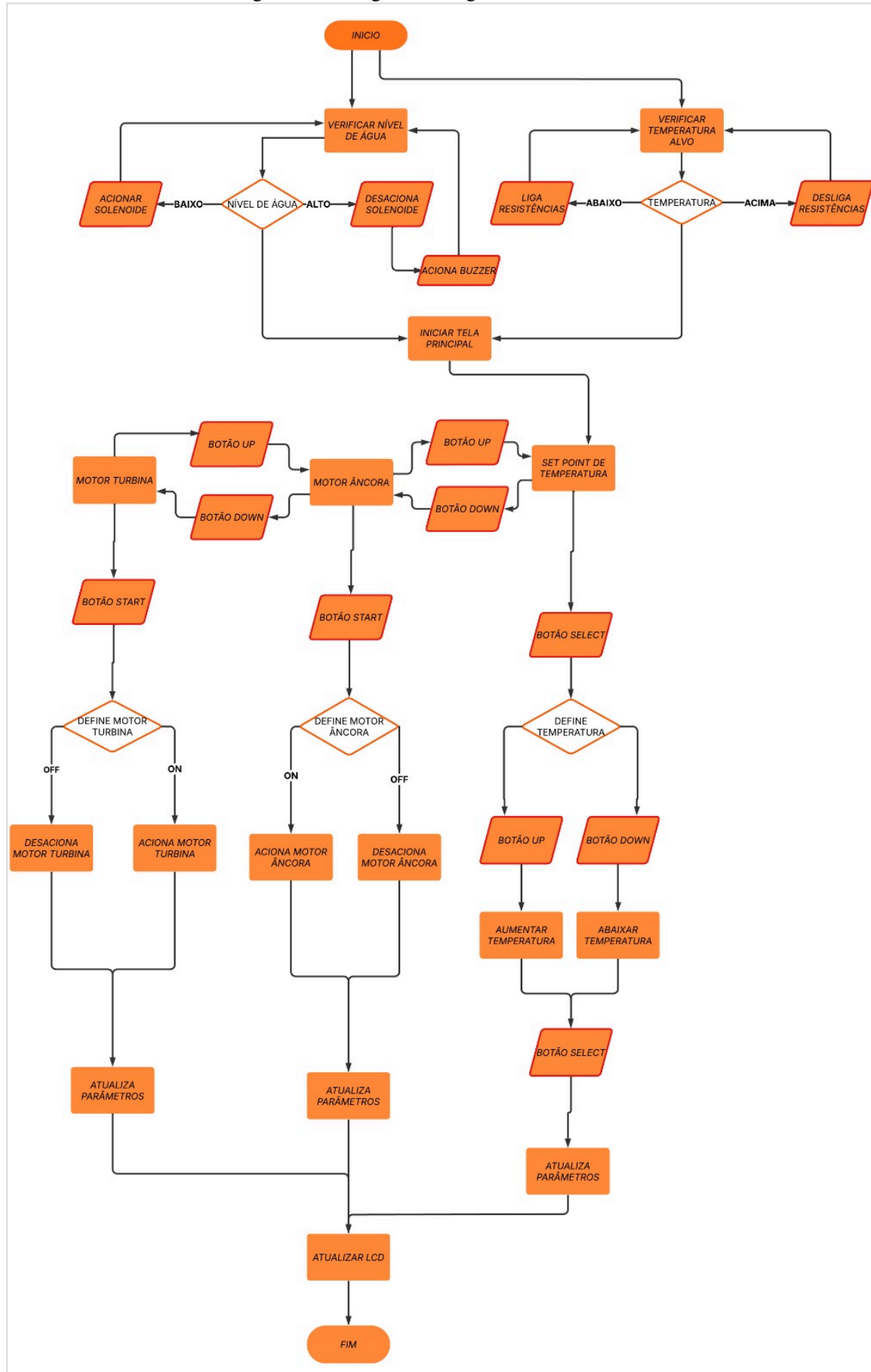
A metodologia de desenvolvimento seguiu um ciclo de melhorias contínuas e ajustes via programação. Previamente à manufatura da PCI, a arquitetura lógica foi submetida a rigorosos testes em ambiente virtual para assegurar a integridade do projeto. O esquema eletrônico montado para simulação do projeto de firmware é apresentado na Figura 12.

Figura 12: Circuito simulável de testes do código no microcontrolador.



Na Figura 13, é apresentado o fluxograma resumido contendo o algoritmo de controle do ATmega328P.

Figura 23: Fluxograma do algoritmo resumido.



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. Usando os botões UP e DOWN é possível selecionar e acionar qualquer uma das funções, habilitando 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 um controle liga-desliga, também descrito como ON-OFF com histerese, garantindo uma faixa de aproximadamente 4°C de variação conforme apresenta a Figura 15.

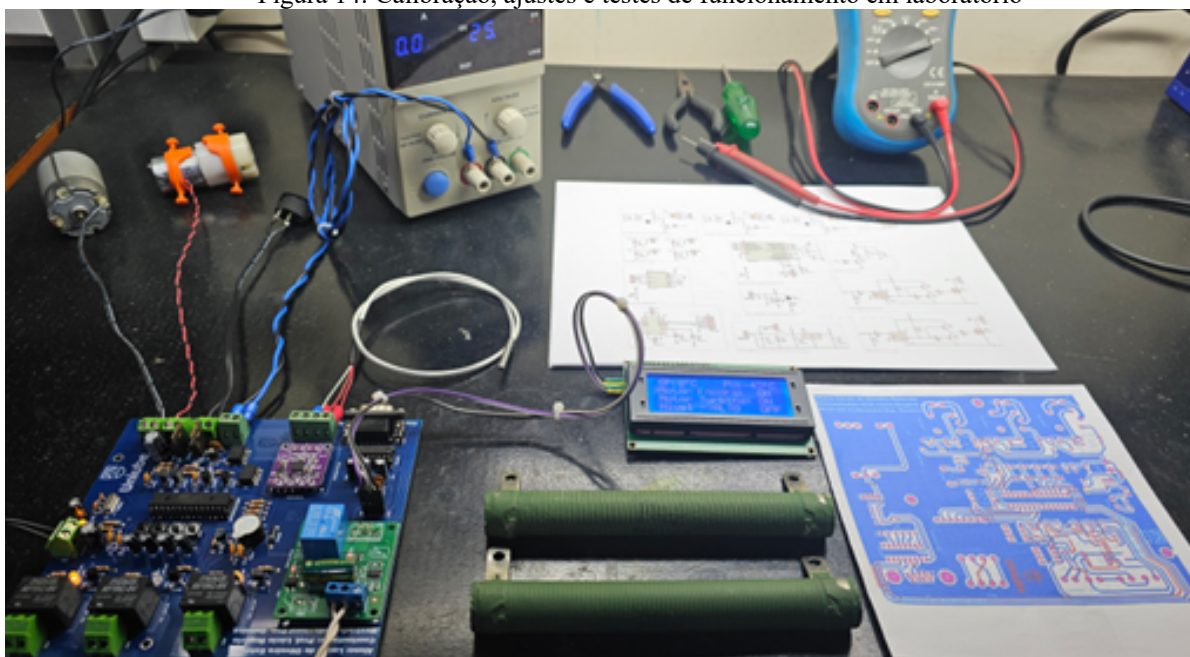
As resistências são acionadas por uma única saída do microcontrolador e estão alimentadas com 220VCA (Figura 2). No display são apresentadas informações básicas para o usuário: status dos motores (ligado ou desligado), condição do nível de água e temperatura. Caso a temperatura ultrapasse um valor de segurança, um alarme sonoro é gerado e um aviso de segurança é apresentado no display LCD. É importante destacar que o diagrama de blocos apresentado é representativo e possui simplificações.

4. CONCLUSÃO/ CONSIDERAÇÕES FINAIS

As etapas de projeto do sistema são descritas como: elaboração do esquemático eletrônico; simulação de circuitos; desenvolvimento e confecção da PCI; programação do firmware; soldagem, energização e testes de bancada em laboratório. Após todas estas etapas, foi realizada a integração de componentes de entrada e saída com o hardware, sendo executadas calibrações, ajustes de firmware e simulações de condições diversas de operação (Figura 14).

Com objetivo de validar o funcionamento da placa de controle, todo o conjunto de componentes eletroeletrônicos do reator foram conectados ao módulo eletrônico de controle, sendo utilizado um protótipo artesanal para representar o sistema.

Figura 14: Calibração, ajustes e testes de funcionamento em laboratório

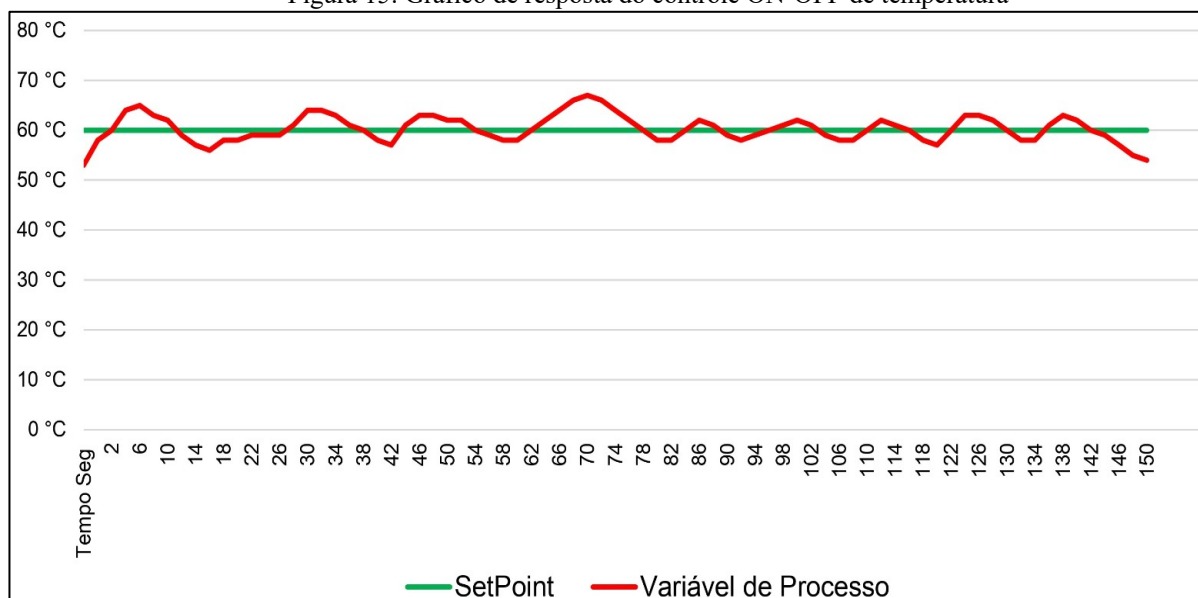


O emprego de motores controlados por PWM possibilitou ajustes precisos de rotação, ampliando a flexibilidade operacional do sistema. O microcontrolador ATmega328P, em conjunto com o circuito de controle, apresentou desempenho confiável no acionamento de motores, relés e sensores.

A interface homem-máquina (IHM) desenvolvida apresentou operação intuitiva, permitindo ao usuário configurar, de forma simples e eficiente, parâmetros como temperatura, velocidade e tempos de processo.

Alguns testes foram adaptados devido à inexistência do reator físico, sendo construído em etapas futuras deste trabalho. No controle térmico, o sistema manteve a temperatura dentro da faixa especificada (Figura 15), na qual a estratégia de controle ON-OFF com histerese assegurou estabilidade térmica, enquanto o sistema de resfriamento, baseado em válvula solenoide e fluxo contínuo de água, demonstrou elevada capacidade na redução da temperatura.

Figura 15: Gráfico de resposta do controle ON-OFF de temperatura



Através dos ensaios realizados verificou-se que o controlador eletrônico desenvolvido para o reator industrial atendeu aos requisitos de projeto, apresentando desempenho funcional, e operação confiável e segura durante os testes realizados.

A solução proposta é baseada em componentes de ampla disponibilidade comercial, utilizando ferramentas de programação de código aberto e arquitetura de simples implementação, demonstrando ser uma alternativa tecnicamente viável e economicamente competitiva em relação a sistemas convencionais de automação industrial baseados em Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), Interfaces Homem-Máquina (IHMs) e instrumentação dedicada.

Adicionalmente, o sistema desenvolvido mostra potencial para aplicação em pequenas empresas do setor de cosméticos e áreas correlatas, contribuindo para o aumento da produtividade e da qualidade dos processos, com redução significativa de custos de implantação.

Além de ser uma referência para outras pesquisas neste segmento, a continuidade deste trabalho possibilitará a integração do módulo eletrônico à uma planta física (reator com tanque de inox), a possibilidade do emprego de um microcontrolador mais moderno e a implementação de mais recursos à placa de controle, incluindo a integração com sistemas supervisórios por meio de comunicação serial.

5. REFERÊNCIAS

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

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

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

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

MALVINO, A. P.; BATES, D. J. Eletrônica. 7. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2011. 672 p.

MONK, S. Programação com Arduino: começando com sketches. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2017.

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.

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.

SONALI, S. S.; LAGU; S. B. D. Raspberry Pi for automation of water treatment plant. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN COMPUTING, COMMUNICATIONS AND INFORMATICS (ICACCI), 2014. Proceedings... [S.l.: s.n.], 2014. p. 1999-2003.

VISHAY SEMICONDUCTORS. 6N137: high speed optocoupler, single and dual, 10 MBd. 2016. Disponível em: https://www.vishay.com/docs/84732/6n137_vo2601_vo2611.pdf. Acesso em: 4 abr. 2026.

NOTAS

CONTRIBUIÇÃO DE AUTORIA

Concepção e elaboração do manuscrito: R. S. Sena, L. O. Estevam, J. R. D. Finzer, C. R. B. dos Santos, L. Rogério Júnior

Desenvolvimento do hardware: R. S. Sena, L. O. Estevam

Desenvolvimento do firmware: R. S. Sena, L. O. Estevam

Protótipo e testes práticos: R. S. Sena, L. O. Estevam, L. Rogério Júnior

Discussão dos resultados: R. S. Sena, L. O. Estevam, C. R. B. dos Santos, L. Rogério Júnior

Revisão e aprovação: J. R. D. Finzer, C. R. B. dos Santos, L. Rogério Júnior

PREPRINTS

O manuscrito não é um preprint.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus sinceros agradecimentos à Universidade de Uberaba (UNIUBE) e ao Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM) pelo apoio institucional e pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho.

CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

DISPONIBILIDADE DE DADOS DE PESQUISA E OUTROS MATERIAIS

Os dados foram publicados no próprio artigo. Todo o conjunto de dados que dá suporte aos resultados deste estudo está incluído no corpo do artigo.

ANUÊNCIA DE AVALIAÇÃO ABERTA

Não aplicável.



O conteúdo deste trabalho pode ser usado sob os termos da licença Creative Commons Attribution 4.0. Qualquer outra distribuição deste trabalho deve manter a atribuição ao(s) autor(es) e o título do trabalho, citação da revista e DOI.