

Construção e automação de um protótipo de reator para produção de biodiesel

Construction and automation of a prototype reactor for biodiesel production

Construcción y automatización de un prototipo de reactor para la producción de biodiésel

ALEXANDRE BOTH¹

LEANDRO CHIES²

RESUMO

O desenvolvimento, a automação e o controle de um reator em escala laboratorial para produção de biodiesel por jatos colidentes são descritos neste trabalho. A construção do protótipo do reator priorizou o uso de materiais de baixo custo. A metodologia de projeto de produto auxiliou na seleção de sensores e atuadores. A automação foi implementada com um modelo de máquina de estados e uma IHM (Interface Homem-Máquina), controlados por um microcontrolador ESP32. Testes de resposta ao degrau permitiram identificar as funções características das plantas de temperatura, com controladores PI projetados para otimizar o tempo de subida e o sobressinal. Simulações no MatLab/Simulink verificaram a conformidade dos controladores. A validação prática incluiu testes de produção de biodiesel com acionamento intermitente dos bicos injetores, demonstrando o potencial da aplicação da técnica utilizada e do controle proposto para o protótipo desenvolvido.

Palavras-chave: Automação e controle de reator de biodiesel; Protótipo para produção de biodiesel; Reator de jatos colidentes.

ABSTRACT

The development, automation and control of a laboratory-scale reactor for biodiesel production by impinging jets are described in this work. The construction of the reactor prototype prioritized the use of low-cost materials. The product design methodology assisted in the selection of sensors and actuators. The automation was implemented with a state machine model and an HMI (Human-Machine Interface), controlled by an ESP32 microcontroller. Step response tests allowed the identification of the characteristic functions of the temperature plants, with PI controllers designed to optimize the rise time and overshoot. Simulations in MatLab/Simulink verified the compliance of the controllers. Practical validation included biodiesel production tests with intermittent activation of the injector nozzles, demonstrating the potential of the application of the technique used and the proposed control for the developed prototype.

Keywords: Automation and control of biodiesel reactor; Prototype for biodiesel production; Impinging jets reactor.

¹ Bacharel em Engenharia de Controle e Automação (IFSC). Técnico de Laboratório (IFSC), ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7193-5215>. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3515470222841534>. E-mail: alexandre4both@gmail.com.

² Mestre em Engenharia Elétrica (UFSM). Professor e pesquisador (IFSC), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7463-4688>. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6078964891704436>. E-mail: leandro.chies@ifsc.edu.br.

RESUMEN

Este artículo describe el desarrollo, la automatización y el control de un reactor a escala de laboratorio para la producción de biodiésel mediante chorros de impacto. El prototipo del reactor se construyó con materiales de bajo coste. Una metodología de diseño de producto facilitó la selección de sensores y actuadores. La automatización se implementó mediante un modelo de máquina de estados y una HMI (Interfaz Hombre-Máquina), controlados por un microcontrolador ESP32. Las pruebas de respuesta a escalón identificaron las funciones características de las plantas de temperatura, con controladores PI diseñados para optimizar el tiempo de subida y el sobreimpulso. Las simulaciones en MatLab/Simulink verificaron la conformidad de los controladores. La validación práctica incluyó pruebas de producción de biodiésel con activación intermitente de las boquillas de inyección, lo que demostró el potencial de la aplicación de la técnica empleada y el control propuesto para el prototipo desarrollado.

Palabras clave: Automatización y control de reactor de biodiésel; Prototipo para la producción de biodiésel; Reactor de chorros colisionantes.

1. INTRODUÇÃO

As emissões de gases de efeito estufa derivadas de combustíveis fósseis constituem o fator preponderante nas alterações climáticas globais (Pasha *et al.*, 2021). Nesse contexto, o biodiesel, produzido a partir de óleos de diferentes origens principalmente por meio da reação de transesterificação, é considerado um combustível de queima limpa e uma alternativa para substituir os combustíveis fósseis (Shen *et al.*, 2011). O protótipo de um reator específico, com controle e automação para a produção de biodiesel em escala de laboratório, é uma ferramenta útil para o ensino e pesquisa na área de química e de engenharia de controle e automação, permitindo a aplicação prática dos conhecimentos adquiridos ao longo da formação.

1.1. Referencial teórico

A eficiência e a taxa de transesterificação são fortemente influenciadas pela difusão dos reagentes. Considerando isso, existem diferentes formas de misturar os reagentes, desde a mistura com agitador convencional até misturas com propostas mais complexas, como os reatores de tubos giratórios e reatores ultrassônicos (Tabatabaei *et al.*, 2019). Entre esses métodos, destaca-se a técnica de mistura por jatos colidentes, cujo princípio consiste em fazer com que dois jatos, fluindo no mesmo eixo e em direções opostas, se colidam. Como resultado dessa colisão, forma-se uma zona chamada de zona de impacto com alta intensidade de turbulência, proporcionando condições ideais para aumentar as taxas de transferência de massa e calor. Essa técnica foi aplicada com sucesso em diversos processos

químicos, entre eles a de micro misturas e de reação entre líquidos diferentes (Ghasemi; Molaei Dehkordi, 2014).

Em uma dessas aplicações, Ghasemi e Dehkordi (2014), desenvolveram uma nova configuração de reator baseada na técnica de jatos colidentes imersos em solução para a produção de biodiesel a partir de óleo de cozinha usado e partículas milimétricas de $KOH/\gamma-Al_2O_3$, como catalisador heterogêneo. Foram investigados os efeitos de vários parâmetros, como a taxa do fluxo de alimentação, diâmetro do jato e a distância entre os bicos na capacidade de performance do reator.

Segundo Ma e Hanna (Ma; Hanna, 1999), a transesterificação ($TG + 3CH_3OH \rightleftharpoons G + 3E$) é a reação entre gordura ou óleo (TG) e álcool (CH_3OH), resultando na formação de ésteres (E) e glicerol (G). Geralmente, utiliza-se um catalisador para aumentar a taxa de reação e a conversão. Por se tratar de uma reação reversível, um excesso de álcool é empregado para deslocar o equilíbrio da reação em favor dos produtos.

As condições de reação apropriadas para transesterificação de óleo de cozinha usado utilizando o catalisador de alumina básica obtidas por Ghasemi e Dehkordi (2014) foram de 25 % de peso de partículas de catalisador $KOH/\gamma-Al_2O_3$, uma razão molar de metanol para óleo de 15:1 e 4 % de peso de catalisador na reação a uma temperatura de 65°C. Portanto, foram utilizadas 1300g de óleo de cozinha usado, 729,5g de metanol e 52g de catalisador heterogêneo em cada experimento, totalizando um volume de 2340cm³ a 25°C. A partir dessas condições de reação e a utilização de diâmetro de jato de 2mm, distância entre os bicos de 1cm e uma taxa de fluxo volumétrica de 4000cm³/min foi obtido uma taxa de rendimento de biodiesel de 76,35% após 3 horas de reação (Ghasemi; Molaei Dehkordi, 2014).

Um estudo semelhante foi realizado por Reyes *et al.* (2010), onde foram utilizadas bombas centrífugas que forçavam a mistura a passar por dois injetores localizados na parte superior do reator, não imersos em solução. Os jatos ficavam separados a uma distância de 15cm. Foram utilizados 4 diferentes diâmetros de injetores, variando de 5mm a 13mm.

O reator desenvolvido por Reyes *et al.* (2010), com capacidade total de 9000cm³, foi carregado com 5000cm³ de uma mistura de óleo de soja e óleo de girassol. As bombas foram ligadas e o óleo foi aquecido pela fricção hidráulica até a temperatura de 30°C, quando uma mistura de metanol (1300cm³) e NaOH (45,4g) foi adicionada. Amostras de 100cm³ foram retiradas e submetidas a decantação, resfriamento, separação e pesagem das diferentes fases da mistura para determinação da conversão relativa de biodiesel em relação ao peso

máximo de glicerina, que foi obtida durante o teste utilizando o menor diâmetro de injetor de 5mm e após 1 hora de reação, atingindo uma temperatura de 55°C.

O objetivo da presente pesquisa é o desenvolvimento, a automação e o controle de um protótipo de reator em escala de laboratório para a produção de biodiesel, a partir da reação de transesterificação, empregando a técnica de jatos colidentes com injetores não imersos em solução. Os parâmetros de reação são determinados em conformidade com Ghasemi e Dehkordi (2014) (temperatura) e as proporções de reagentes utilizadas por Reyes *et al.* (2010).

2. MÉTODOS

Esta seção é subdividida em Concepção do protótipo de reator, Controle das malhas de temperatura, Automação do processo e Testes de produção de biodiesel.

2.1. Concepção do protótipo de reator

A formulação do conceito do protótipo do reator utilizado nesta pesquisa foi fundamentada em estudos de diferentes trabalhos, como os realizados por Reyes *et al.* (2010) e Ghasemi e Dehkordi (2014). A escolha dos materiais e recipientes baseou-se em critérios de redução dos custos, disponibilidade comercial e simplicidade de montagem, otimizando o tempo e os recursos para as demais fases da pesquisa.

O reator foi modelado utilizando a ferramenta de desenho assistido por computador *SolidWorks*. O projeto foi desenvolvido para acomodar de forma integrada todos os sistemas necessários, incluindo os de acionamento elétrico, estrutura, tubulação, instrumentação, processamento de dados e interface com o usuário.

2.1.1. Diagrama P&ID

Para facilitar o entendimento do processo e da instrumentação foi desenvolvido o diagrama P&ID (Figura 1), segundo a norma ISA 5.1 D (2009), ele contém as malhas de controle do processo, sendo elas as malhas de pressão da mistura (101), de controle de temperatura do pré-aquecimento do óleo (102), do condensador do metanol (103), da mistura no reator (104), de vazão dos bicos injetores (105) e de atuação das bombas e válvula (106). As malhas 102 e 104 são controles contínuos e as restantes são a eventos discretos.

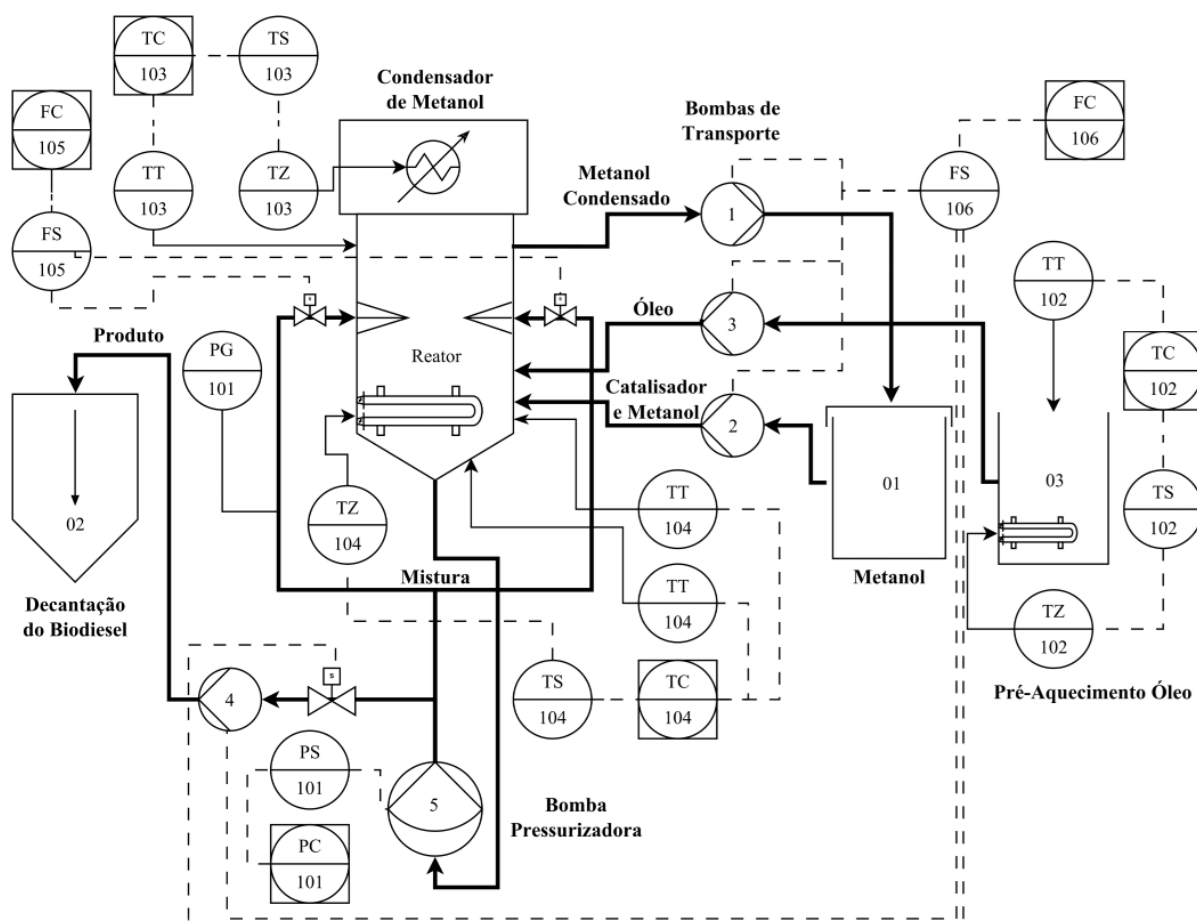


Figura 1 – Diagrama P&ID do processo.

Fonte: Autoria própria.

Para a seleção dos sensores e atuadores, utilizou-se a metodologia de projeto de produto de Back *et al.* (2008), definindo os requisitos com base em (Ghasemi; Molaei Dehkordi, 2014; Ma; Hanna, 1999). Temperaturas próximas ao ponto de ebulição ($64,7^{\circ}\text{C}$ para o metanol) são consideradas ótimas, pois diminuem perdas por vaporização (Tabatabaei *et al.*, 2019). O protótipo possui dois pontos de aquecimento. O primeiro, com uma resistência do tipo cartucho de 120W , pré-aquece o óleo (malha 102) para reduzir a umidade, que é prejudicial à reação com catalisador alcalino (Ma; Hanna, 1999). O segundo (malha 104) utiliza uma resistência elétrica do tipo coleira de 600W para manter a mistura na faixa ideal de reação, próxima a 65°C .

Os sensores de temperatura digitais DS18B20 foram escolhidos por sua faixa de operação (55°C a 125°C), precisão ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$) e capacidade de operação submersa.

A técnica de jatos colidentes requer bombas para recirculação. Inspirado em Reyes *et al.* (2010), optou-se por uma bomba de $9000\text{cm}^3/\text{min}$ que atinge pressão de até $1,034 \times 10^6 \text{ Pa}$ (150psi) (malha 101). O protótipo também inclui quatro bombas de baixa

potência para transferência de fluidos, uma válvula solenoide para conter a pressão (malha 106) e dois bicos injetores (malha 105).

Para otimizar a separação do metanol, o protótipo foi equipado com pastilhas de Peltier no topo do reator para favorecer sua condensação (malha 103).

Com os atuadores definidos, foram selecionados os componentes eletrônicos para o acionamento dos mesmos. Para as resistências elétricas, com alimentação nominal de 220V de tensão em corrente alternada, foram utilizados dois relés de estado sólido (SSR, do inglês: *Solid State Relay*), com capacidade de corrente de 40A e tensão de operação de até 380V. Para as cinco bombas e a válvula solenoide, todos com alimentação nominal de 12V de tensão em corrente contínua, foram utilizados seis relés eletromecânicos com capacidade de corrente de 10A e tensão de operação de até 28V.

Para o acionamento independente dos bicos injetores com alimentação nominal de 12V de tensão em corrente contínua, foram utilizadas duas chaves MOSFET IRF540. Duas chaves MOSFET IRFZ44N para o acionamento em paralelo de quatro pastilhas termoelétricas de Peltier do modelo TEC1-12715, com um consumo médio (medido pelo sensor de corrente ACS712-30A integrado ao sistema) de 11,5A com a diferença entre os lados das pastilhas de aproximadamente 10°C. O sensor de corrente, por sua vez, foi aferido por meio da aplicação de uma tensão em uma resistência de valor conhecido, comparando-se o valor de corrente lido pelo sensor e o valor de corrente calculado.

2.2. Controle das malhas de temperatura

A aplicação da metodologia de controle das malhas de temperatura incluiu a realização de ensaios de identificação das funções características das plantas aplicando-se degraus de potência nas resistências elétricas instaladas. A variação da potência aplicada foi realizada por meio do controle por ciclo integral e a implementação utilizada permite 240 diferentes potências aplicadas às resistências, resultando em variações quantizadas de $120/240 = 0,5W$ para a resistência do béquer e $600/240 = 2,5W$ para a resistência do reator. O tempo de amostragem definido para a coleta dos dados foi de 15 segundos, considerando a dinâmica lenta das plantas de temperatura e coletados por meio dos sensores de temperatura digitais DS18B20.

Para o controle de temperatura do béquer, foram adicionados 1000cm³ de óleo de soja a uma temperatura ambiente de 26,12°C e aplicado um degrau de potência de 30W na

resistência elétrica instalada no béquer, conforme a Figura 2, também é apresentada a função característica estimada e o degrau de potência aplicado. Os valores de temperatura apresentados nesse gráfico são relativos à temperatura ambiente registrada no momento do ensaio, com $\Delta T = T - T_{amb}$, sendo T a temperatura absoluta registrada ao longo do tempo e T_{amb} a temperatura ambiente registrada no momento do teste.

O ensaio levou 12500 segundos, atingindo uma temperatura final de aproximadamente 90,56°C. Houve um atraso na variação de temperatura em resposta ao degrau de aproximadamente 30 segundos, no entanto esse atraso não está visível no gráfico. A função característica dessa planta, estimada em 1 polo e 0 zeros com um encaixe de 89,44%, é apresentada na Equação 1, sendo $Y(s)$ o sinal de saída de temperatura e $U(s)$ o sinal do esforço aplicado à resistência. Essa função característica tem uma constante de tempo $\tau = 1725$ segundos e um tempo de subida $t_{r(10-90\%)} = 5100$ segundos.

$$Y(s) = \frac{0,001217}{s + 0,0005794} \cdot U(s) \quad (1)$$

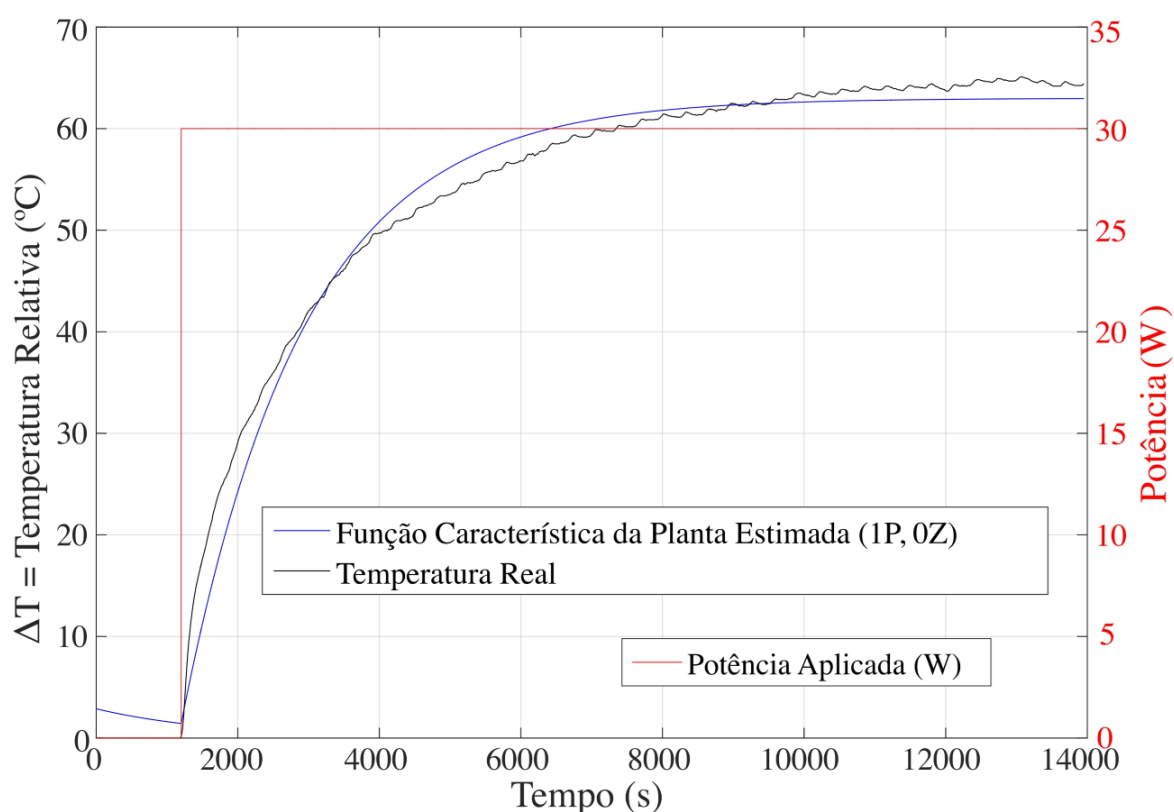


Figura 2 – Ensaio de resposta ao degrau (béquer).

Fonte: Autoria própria.

Da mesma forma, para o ensaio de resposta ao degrau para identificação da função característica da planta de temperatura do reator, foram adicionados ao reator 1600cm^3 de óleo de soja a uma temperatura ambiente $T_{amb} = 31,37^\circ\text{C}$, iniciados os sistemas de pressurização e injeção da mistura, seguido pela aplicação de um degrau de potência de $112,5\text{W}$ na resistência elétrica instalada no reator, até a estabilização da temperatura. No entanto, para esse ensaio, foram coletadas as temperaturas de três sensores instalados na parte interna do reator: do sensor A, instalado próximo a resistência; do sensor B, instalado na parte inferior do tanque; e do sensor C, instalado na parte superior de condensação do tanque. Os degraus de potência aplicados em ambos os ensaios foram definidos a partir da comparação de testes dos atuadores realizados anteriormente, para o alcance de temperaturas próximas as consideradas ótimas para o processo.

Durante o ensaio, que levou aproximadamente 6800 segundos, o sensor A atingiu uma temperatura final de $67,94^\circ\text{C}$ e o sensor B atingiu uma temperatura final de $57,13^\circ\text{C}$. Essa diferença de temperatura entre os sensores A e B, de aproximadamente 11°C , deve-se ao fato de que o sensor A está posicionado mais próximo da resistência. Além disso, os jatos colidentes se encontram acima do nível da solução, não havendo agitação na mesma. Portanto, a temperatura média entre os valores lidos pelos sensores A e B foi considerada para estimar as funções características da planta e definida como a variável controlada para o controle de temperatura do reator.

A função característica da planta de temperatura do reator estimada em 3 polos e 2 zeros, com encaixe de 99,01%, é apresentada na Equação 2, sendo $\alpha = 45327,57$; $\beta = 802,79$; $\gamma = 9,24 \cdot 10^7$; $\epsilon = 5,03 \cdot 10^5$ e $\zeta = 1,76$; e é utilizada na simulação da implementação do controlador, pois representou com maior fidelidade a dinâmica de temperatura da planta. Outra função característica da mesma planta estimada em 1 polo e 0 zeros, com encaixe de 90,93%, é apresentada na Equação 3. Essa função de transferência simplificada é utilizada para a elaboração do projeto do controlador da planta, tem uma constante de tempo $\tau = 744$ segundos e um tempo de subida $t_{r(10-90\%)} = 2370$ segundos.

$$Y(s) = 0,2779 \cdot \frac{\alpha s^2 + \beta s + 1}{\gamma s^3 + \epsilon s^2 + \zeta s + 1} \cdot U(s) \quad (2)$$

$$Y(s) = \frac{0,0003596}{s + 0,001345} \cdot U(s) \quad (3)$$

O gráfico da Figura 3 apresenta a média das temperaturas registradas pelos sensores A e B durante o ensaio de resposta ao degrau, as funções características da planta estimadas e o degrau de potência aplicado. Os valores de temperatura apresentados nesse gráfico são iguais a $\Delta T = T - T_{amb}$.

De acordo com o sugerido por Ogata (2010), o tempo de amostragem deve ser pelo menos 10 vezes menor que a constante de tempo do sistema. Portanto, ambas as constantes de tempo de 1725 segundos e 744 segundos das funções características estimadas indicam que o tempo de amostragem T_s de 15 segundos definido é capaz de representar precisamente o comportamento dinâmico dessas plantas de temperatura.

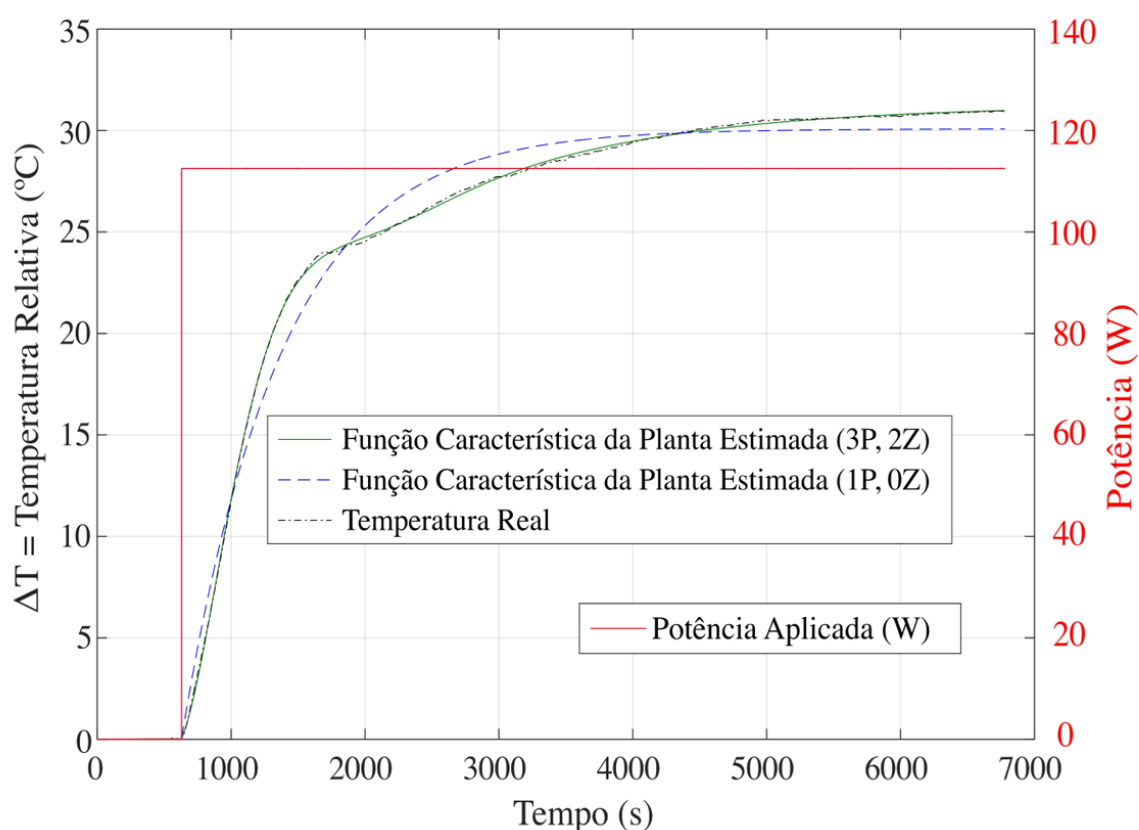


Figura 3 – Ensaio de resposta ao degrau (reator).

Fonte: Autoria própria.

2.2.1. Projeto dos controladores

A partir das funções características das plantas estimadas, foram elaborados projetos de controladores utilizando o método do lugar das raízes com o auxílio da ferramenta *Root Locus Design* do *MatLab*®, considerando o esforço máximo possível do atuador da planta para evitar saturações de esforço de controle e buscando aprimorar principalmente o tempo de

subida da temperatura, sendo os requisitos de controle $t_{r(10-90\%)} < 900s$, sobressinal máximo $O_s < 10\%$ e erro zero em regime permanente para ambos controladores. O aprimoramento do tempo de subida foi definido como prioridade, porque há a necessidade de uma temperatura mínima para que a reação de transesterificação e a redução do nível de umidade ocorram com eficiência, sem a necessidade de uma temperatura exata. Além disso, o sobressinal foi definido para que não sejam atingidas temperaturas excessivamente altas.

Os controladores foram projetados com a adição de um polo integrador e um zero no eixo real, seguido de ajustes na posição do zero e do ganho proporcional.

O controlador compensador projetado para a função característica da planta do béquer, Equação 1, é apresentado na Equação 4. $U(s)$ é o sinal de saída do controlador e $E(s)$ é o sinal do erro, que é definido como o *setpoint* de temperatura ($R(s)$) menos a temperatura atual lida pelo sensor ($C(s)$).

$$U(s) = 1,977 \frac{(s + 0,0009378)}{s} E(s) \quad (4)$$

A resposta ao degrau em malha fechada do controlador de temperatura do béquer é apresentada na Figura 4.

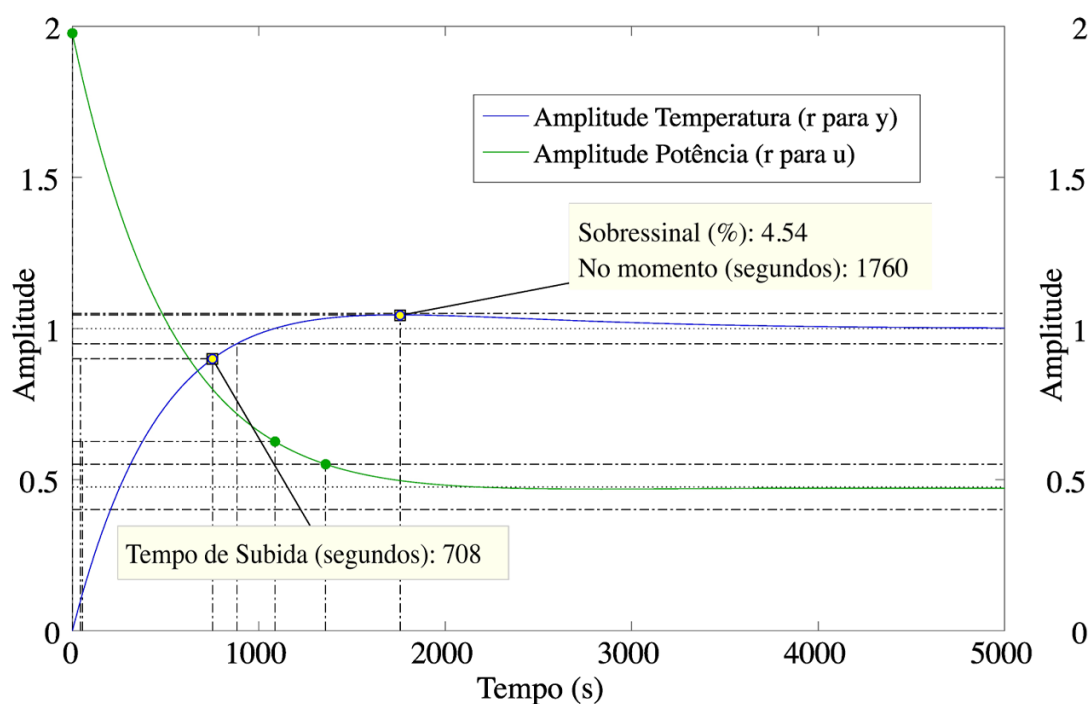


Figura 4 – Resposta ao degrau em malha fechada (béquer).

Fonte: Autoria própria.

O controlador compensador projetado para a função característica da planta do reator, Equação 3, é apresentado na Equação 5.

$$U(s) = 9,0088 \frac{(s + 0,0017)}{s} E(s) \quad (5)$$

A resposta ao degrau em malha fechada do controlador de temperatura do reator é apresentada na Figura 5.

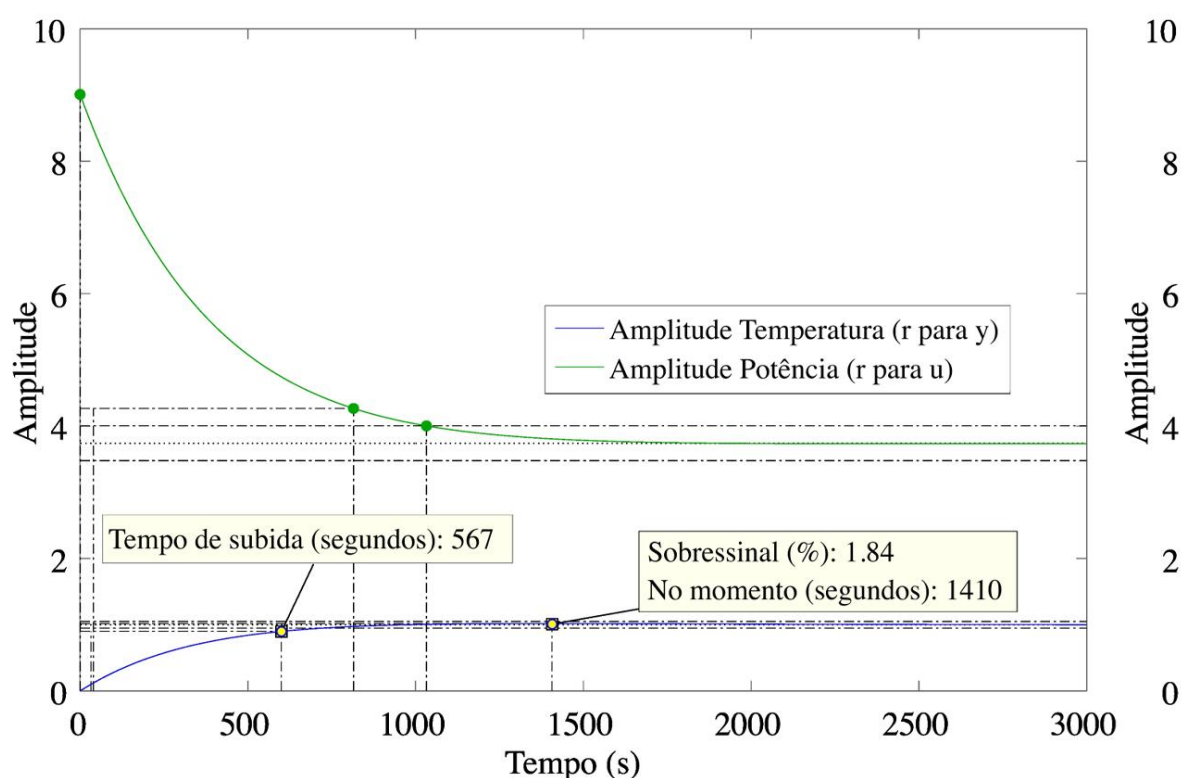


Figura 5 – Resposta ao degrau em malha fechada (reator).

Fonte: Autoria própria.

Na figura 6 é apresentado o projeto de simulação da resposta da temperatura e do esforço de controle ao degrau em malha fechada, com auxílio da ferramenta *Simulink* do *MatLab*®, utilizado para verificar a conformidade dos controladores projetados com os requisitos estabelecidos. Para a implementação e validação dos controladores, manteve-se o volume de óleo utilizado nos ensaios de resposta ao degrau.

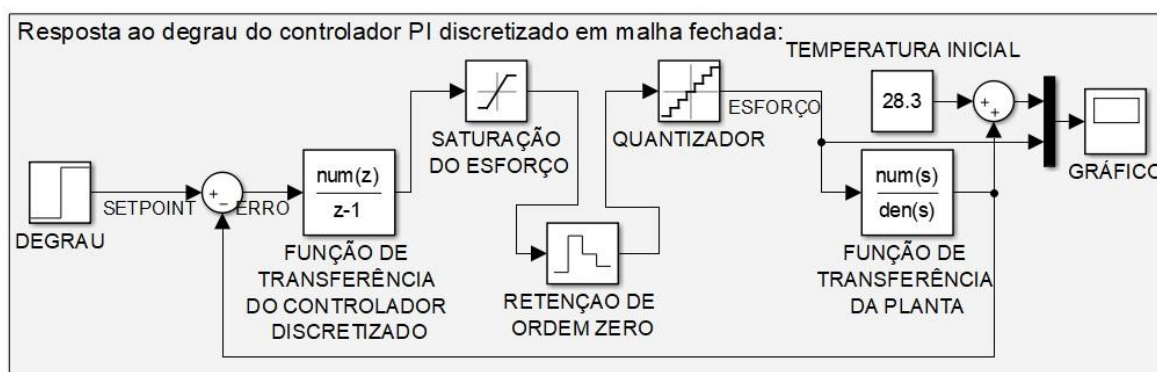


Figura 6 – Diagrama de blocos da simulação da resposta ao degrau.

Fonte: Autoria própria.

O controle de pressão da mistura para os bicos injetores é realizado em malha aberta, com ligação intermitente da bomba. Os intervalos de tempo de acionamento e parada foram definidos por meio de testes empíricos, buscando manter a pressão entre $0,344738 \times 10^6 Pa$ e $0,482633 \times 10^6 Pa$ (50 e 70psi), considerando a diminuição gradativa da viscosidade da mistura durante a reação. As pastilhas termoeletrônicas de Peltier são acionadas quando a temperatura registrada pelo sensor C é maior que 50°C.

2.3. Automação do processo

A automação do processo de produção de biodiesel neste projeto foi estruturada com um modelo de máquina de estados. Cada estado foi projetado conforme os requisitos de cada etapa, com transições definidas por gatilhos como tempo decorrido, acionamento de botões, alcance de temperaturas específicas e detecção de matéria-prima por meio de sensor capacitivo. Os estados incluem acionamentos de resistências, bombas e válvulas solenoides. A validação prática da implementação do modelo de máquina de estados foi realizada por meio de execuções completas do processo definido no projeto para verificar a conformidade do modelo com o comportamento esperado e a confiabilidade da automação implementada.

Além disso, foi implementada uma IHM (Interface Homem-Máquina) para acompanhamento e ajustes dos parâmetros do processo, como por exemplo os *setpoints* de temperatura e o tempo de mistura da reação. Essa IHM trata-se de um *display Nextion*® que realiza a comunicação com o microcontrolador ESP32, utilizado no protótipo, por meio do protocolo serial UART.

Diferentes processos, como a comunicação com a IHM, a leitura dos sensores, a atualização dos estados das portas GPIO e os cálculos dos esforços de controle, são realizados por diferentes núcleos do microcontrolador que foram definidos em tarefas com tempos de ciclos de repetição e prioridades de execução pré-determinados.

2.4. Testes de produção de biodiesel

Foi realizado um teste de produção de biodiesel com acionamento intermitente dos bicos injetores a uma frequência de 19,23 Hz, determinada pela tarefa do microcontrolador que alterna o estado das GPIO responsáveis pelo acionamento dos bicos injetores, com um tempo de execução fixo de 0,026 segundos.

Com o *setpoint* da temperatura média definido em 68°C, foram adicionados ao reator aproximadamente 1600cm³ de óleo de soja e 400cm³ de metanol previamente misturados com 14g de KOH, por meio das bombas de transferência de líquidos, seguindo as proporções de reagentes de 6:1 de razão molar de metanol para óleo. Após, os sistemas de mistura e de controle de temperatura foram iniciados. Foram retiradas amostras de aproximadamente 100cm³ após 10, 20, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos de mistura. Após 240 minutos, o restante da mistura, de aproximadamente 1000cm³, também foi retirada do reator. As conversões relativas de biodiesel foram mensuradas pela divisão do peso da glicerina separada pelo peso total de cada amostra, conforme Reyes *et al.* (2010). Esse método de retirada de amostras tem o objetivo de analisar a evolução da reação ao longo do tempo, no entanto, pode impactar na conversão da reação ao alterar a proporção de reagentes no reator. Esse impacto não foi mensurado no presente trabalho.

3. RESULTADOS

Esta seção é subdividida em construção do protótipo de reator, validações das respostas dos sensores e atuadores, implementação dos controladores, implementação da automação e teste de produção de biodiesel.

3.1. Construção do protótipo de reator

A Figura 7-A) apresenta a modelagem gráfica renderizada do reator desenvolvido neste projeto e a 7-B) apresenta uma fotografia do protótipo. Em 7-A), é possível identificar

o corpo principal do reator (1), as bombas de transferência (2), os béqueres destinados à adição de reagentes pelo usuário e à retirada de produtos (3), o sistema de dissipação de calor acoplado às pastilhas termoelétricas (4), a interface com o usuário (5) e, na parte inferior, a bomba e a tubulação de alta pressão (6).

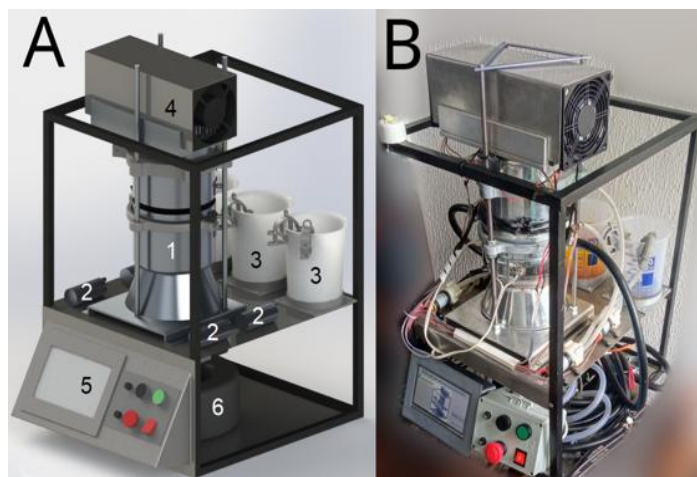


Figura 7 – A) Renderização do reator modelado. B) Fotografia do protótipo.

Fonte: Autoria própria.

O presente estudo não contemplou uma análise de viabilidade econômica ou estimativa de custos. Uma vez que o foco principal consistiu na prova de conceito e a aplicação do conhecimento adquirido durante a formação em Engenharia de Controle e Automação, utilizando materiais e mão de obra técnica disponibilizados pela instituição.

3.2. Validações das respostas dos sensores e atuadores

O ensaio comparativo para validação dos sensores DS18B20 utilizados foi realizado aquecendo-se aproximadamente 500cm^3 de água até a temperatura de 85°C , seguido da comparação das temperaturas registradas durante o resfriamento do líquido até a temperatura ambiente. Foi observado que as temperaturas medidas pelos sensores DS18B20 apresentaram, em média, uma diferença de aproximadamente $0,12^\circ\text{C}$ a mais em relação ao termômetro analógico de mercúrio. O erro de leitura em comparação ao termômetro analógico foi considerado irrelevante, não havendo necessidade de ajustes de *offset* ou linearidade dos sensores digitais.

Os ensaios de validação da potência das resistências selecionadas geraram resultados satisfatórios, atingindo as temperaturas desejadas em tempos inferiores a 15 minutos, sendo de aproximadamente 7 minutos para a resistência cartucho de 120W e

aproximadamente 4 minutos para a resistência coleira de 600W. Nesses ensaios de malha aberta, ambas as resistências foram ligadas em suas respectivas potências nominais.

3.3. Implementação dos Controladores

O gráfico da Figura 8 apresenta a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e o esforço de controle (W) ao longo do tempo (s), sobrepostos aos valores obtidos em simulação. Esses valores de temperatura e potência foram registrados pelo microcontrolador durante um teste de implementação do controlador projetado para o pré-aquecimento do óleo no bquer, com um *setpoint* definido em 80°C , partindo da temperatura ambiente de $26,5^{\circ}\text{C}$.

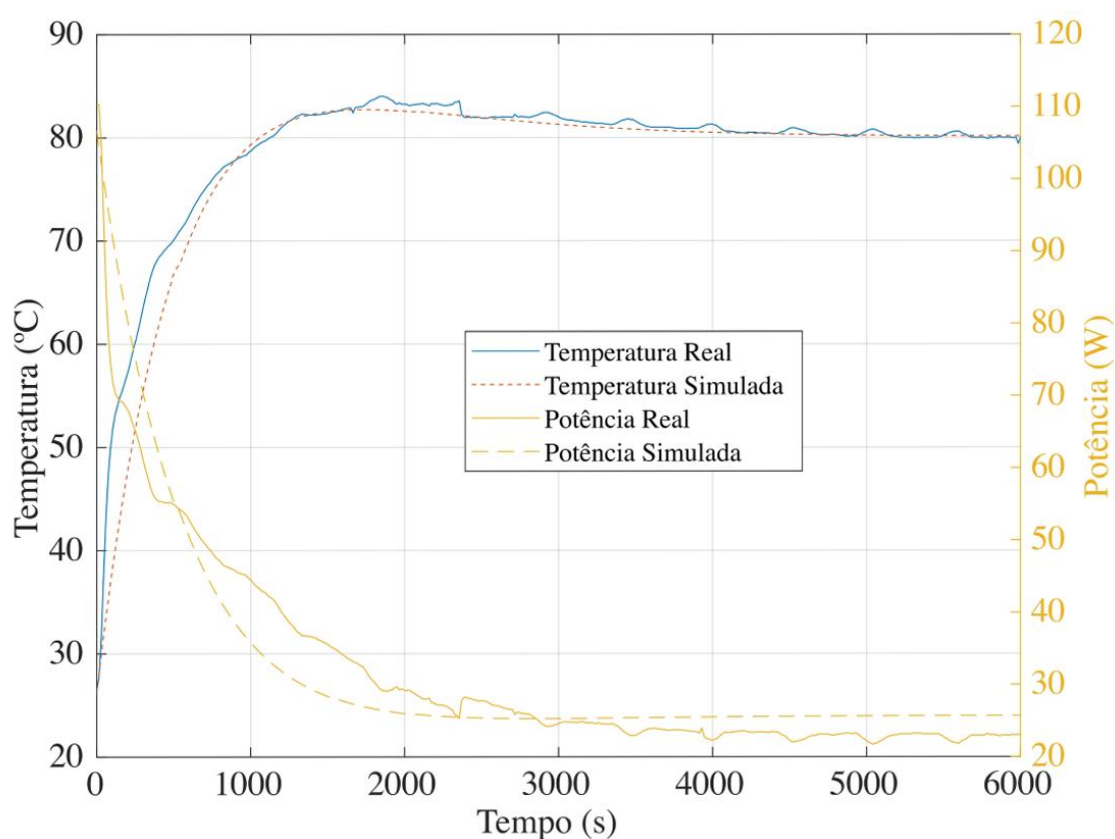


Figura 8 – Resposta do controlador de temperatura do bquer.

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre os requisitos de controle, os valores simulados e os valores reais obtidos com a implementação do controlador projetado. O tempo de subida $t_{r(10-90\%)}$ de 660 segundos alcançado é 26,6% menor do que o tempo de subida máximo definido como requisito e o sobressinal de 7,48% obtido é 25,2% menor que o sobressinal máximo do requisito de controle.

	Requisito	Simulado	Real
O_s	<10%	4,92%	7,48%
$t_{r(10-90\%)}$	<900s	705s	660s

Tabela 1 – Resultados do controlador do béquer.

Fonte: Autoria própria.

O gráfico da Figura 9 apresenta os valores registrados durante um teste de implementação do controlador projetado para o aquecimento do reator e dos valores gerados por meio da configuração apresentada na Figura 6, com um *setpoint* definido em 71°C, com temperatura ambiente em 28,31°C.

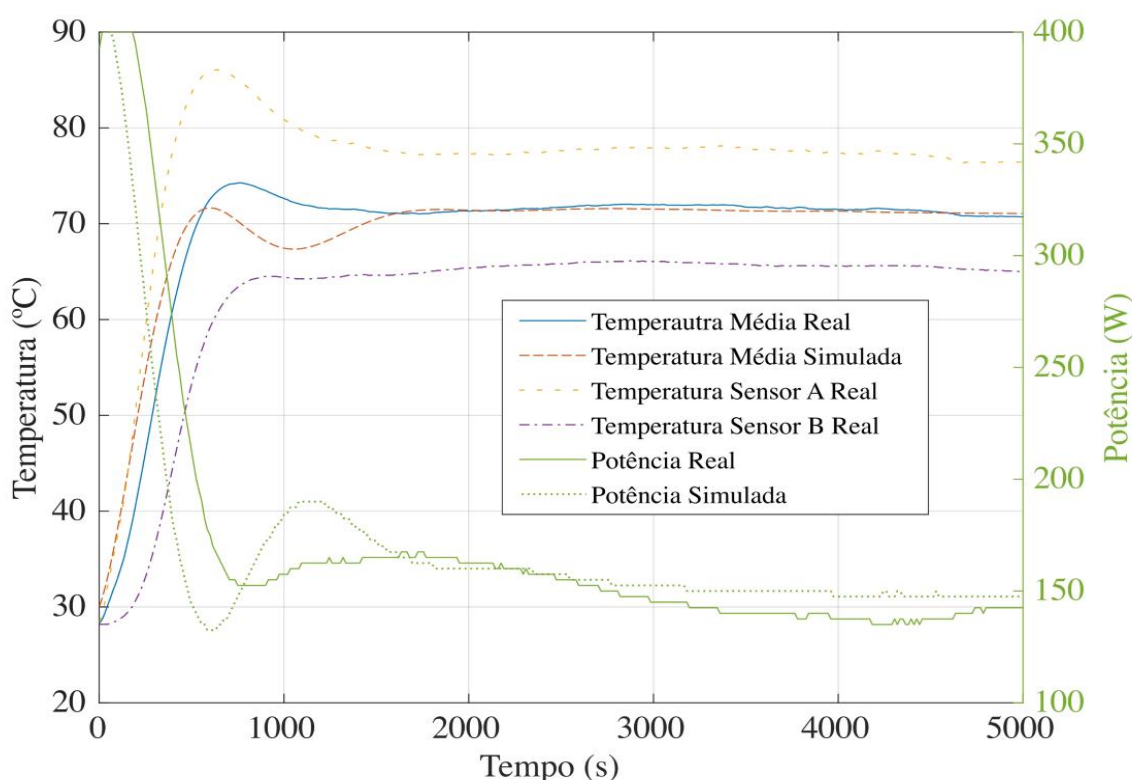


Figura 9 – Reposta do controlador de temperatura do reator.

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 2 apresenta uma comparação entre os requisitos de controle, os valores simulados e os valores reais obtidos com a implementação do controlador projetado. O tempo de subida $t_{r(10-90\%)}$ real, de 375 segundos, é semelhante ao valor simulado, de 345 segundos, e cumpre o requisito do controlador estipulado com uma diferença entre o requisito e o valor obtido de 58,3%. A temperatura máxima da média entre os sensores A e B registrada durante o teste foi de 74,28°C aos 765 segundos, representando um sobressinal O_s

de 7,68%, significativamente maior do que o sobressinal simulado de 1,59%, porém dentro do requisito de controle estipulado.

	Requisito	Simulado	Real
O_s	<10%	1,59%	7,68%
$t_{r(10-90\%)}$	<900s	345s	375s

Tabela 2 – Resultados do controlador do reator.

Fonte: Autoria própria.

3.4. Implementação da automação

A máquina de estados estruturada para o projeto é apresentada na Figura 10 constituindo-se de 14 estados e 17 transições. Os estados e transições e suas respectivas descrições estão apresentadas na Quadro 1. Da mesma maneira, as transições e suas respectivas descrições estão apresentadas no Quadro 2.

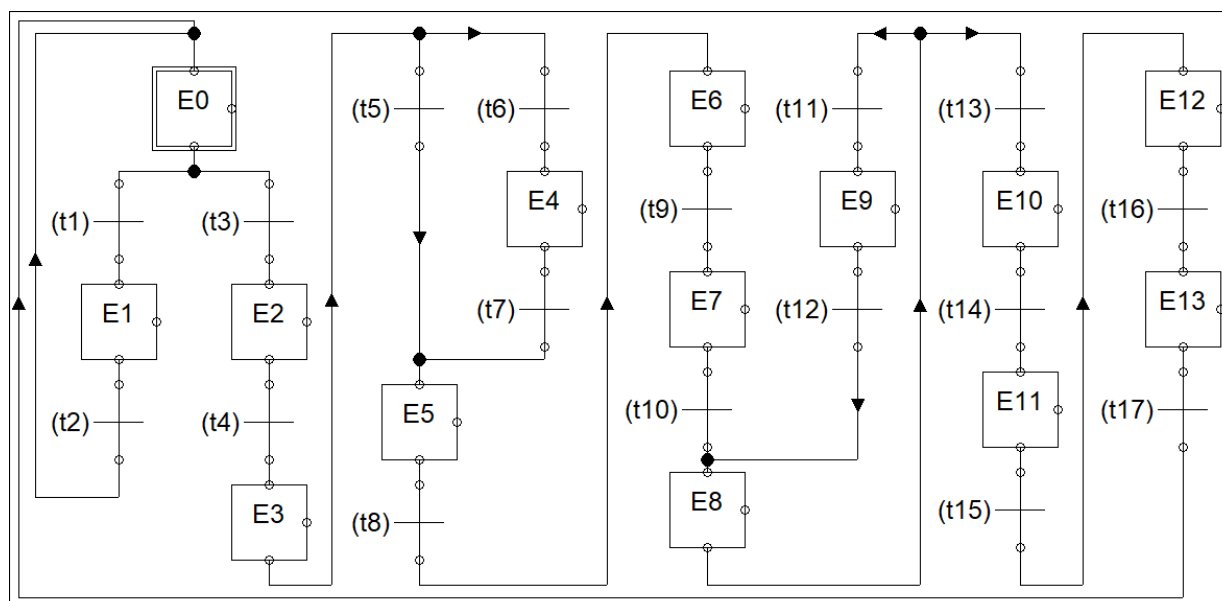


Figura 10 – Máquina de estados.

Fonte: Autoria própria.

Descrição dos estados	
E0	desabilita todos os atuadores
E1	habilita acionamentos manuais
E2	solicita ao usuário adição de óleo no béquero 03
E3	estado intermediário de detecção de óleo
E4	informa ao usuário ausência de óleo no béquero 03 e solicita adição de óleo

E5	habilita o controle de aquecimento do béquer 03
E6	desabilita o controle de aquecimento do béquer 03 e transfere o óleo do béquer 03 para o reator por meio do acionamento da bomba 3
E7	habilita os controles da bomba 5 (pressurizadora), dos bicos injetores, de aquecimento do reator e das pastilhas de Peltier
E8	transfere parte do metanol do béquer 01 para o reator por meio do acionamento da bomba 2
E9	desliga a bomba 2 e adiciona um valor ao contador metanol
E10	contador metanol tem seu valor zerado
E11	setpoint de temperatura do reator é aumentado para 70�C para a destilação do metanol não reagido e habilita o acionamento intermitente da bomba 1, retirando o metanol não reagido do reator conforme o tempo definido pelo usuário para o término da reação
E12	desabilita os controles da bomba 5 (pressurizadora), dos bicos injetores, de aquecimento do reator, das pastilhas de peltier e informa ao usuário que o tempo de mistura programado foi atingido
E13	abertura da válvula solenoide de alta pressão e acionamento da bomba 4 para retirada da mistura do reator para o béquer 02

Quadro 1 – Estados e suas descrições.

Fonte: Autoria própria.

Descrição das transições	
t1	variável auto/man = 1
t2	variável auto/man = 0
t3	botão início acionado
t4	30 segundos decorridos no estado E2 e botão início acionado
t5	detecção de óleo pelo sensor capacitivo
t6	não-detecção de óleo pelo sensor capacitivo
t7	detecção de óleo pelo sensor capacitivo
t8	temperatura do óleo no Béquer 03 atinge o setpoint
t9	40 segundos decorridos no estado E6
t10	60 segundos decorridos no estado E7
t11	7 segundos decorridos no estado E8
t12	60 segundos decorridos no estado E9
t13	contador metanol atinge o valor 5
t14	tempo de mistura programado atingido
t15	15 minutos decorridos no estado E11
t16	botão início acionado
t17	60 segundos decorridos no estado E13

Quadro 2 – Transições e suas descrições.

Fonte: Autoria própria.

3.5. Teste de produção de biodiesel

Os resultados obtidos no teste de produção de biodiesel por meio dos métodos descritos na Subseção 2.4, utilizando o protótipo do reator, são apresentadas no gráfico da Figura 11 como porcentagens de conversões relativas de biodiesel ao longo do tempo em relação a maior conversão relativa, que foi obtida após 240 minutos de reação. Nota-se que as pesagens das fases de glicerina separada das duas primeiras amostras retiradas ficaram muito próximas da resolução da balança utilizada, de 1g, portanto os valores de conversão relativa dessas amostras podem não representar precisamente os valores reais.

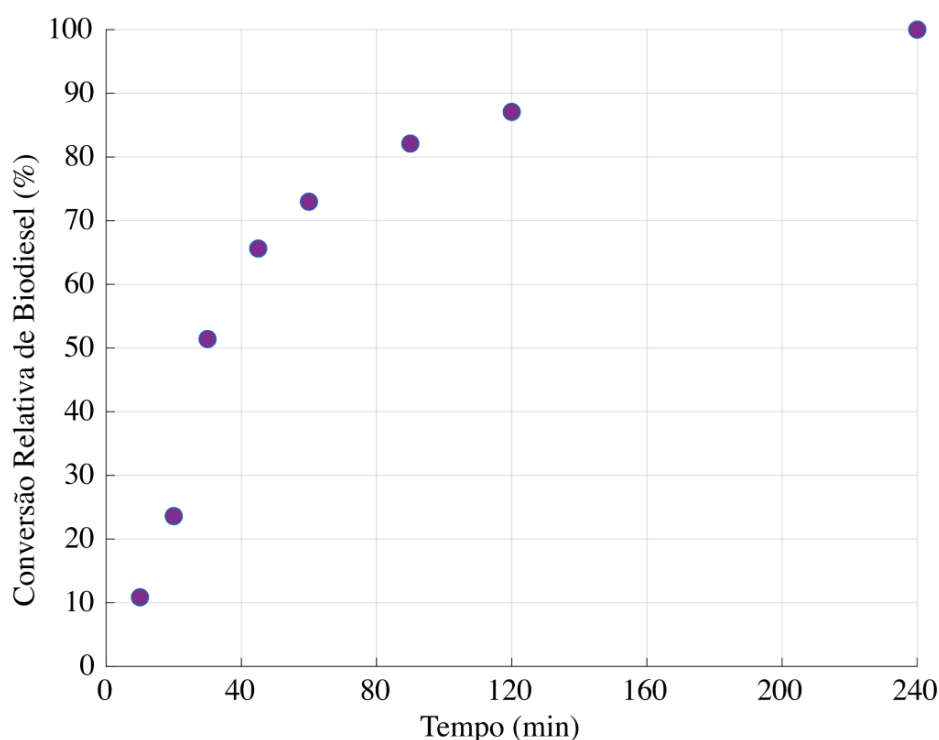


Figura 11 – Conversão relativa de biodiesel.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 12-A) apresenta os valores de temperatura registrados e a 12-B) os valores de potência aplicada na resistência elétrica instalada no reator durante o teste de produção de biodiesel. Não houve o uso de uma abordagem *anti-windup*, porém o esforço de controle foi limitado, com a potência máxima aplicada a resistência definida em 250W. O óleo é aquecido a partir do instante 0 até aproximadamente 800 segundos, quando o metanol misturado com o catalisador é adicionado gradualmente ao reator em um período de aproximadamente 500 segundos. Um fato importante que pode ser observado nesse gráfico

é de que a diferença entre as temperaturas registradas pelo sensor A e pelo sensor B diminui significativamente após a adição desse reagente, de uma diferença de aproximadamente 11°C para uma diferença de aproximadamente 4°C , representando uma temperatura mais homogênea da mistura.

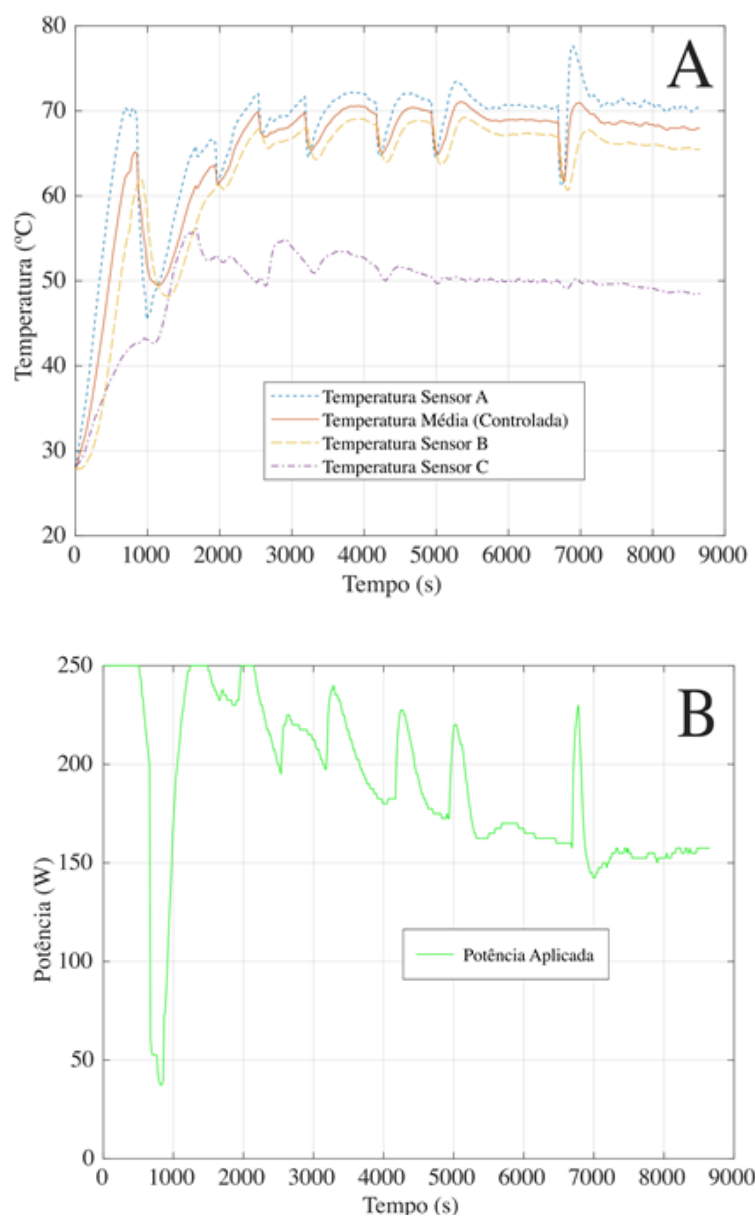


Figura 12 – Temperaturas e potência registradas durante o ensaio do reator.

Fonte: Autoria própria.

A primeira amostra foi retirada do reator após 600 segundos decorridos da adição total do metanol, a uma temperatura média de $63,63^{\circ}\text{C}$ e a segunda amostra foi retirada após 1200 segundos, a uma temperatura média de 69°C , visualizado no gráfico aos 2565 segundos. As

demais retiradas de amostras também podem ser visualizadas implicitamente no gráfico da Figura 12 com a observação das diminuições abruptas de temperatura, ocasionadas pela pausa dos sistemas de pressurização e pela recirculação forçada da mistura por meio das bombas de transferência, até o tempo de aproximadamente 8600 segundos, quando a amostra de 120 minutos foi retirada. É possível observar também que o esforço de controle médio para o mesmo *setpoint* de temperatura do reator diminui após a retirada de cada amostra.

Na Figura 13 é apresentada a amostra de 1000cm^3 que foi retirada do reator aos 240 minutos, após 8 horas de decantação. Nela é possível observar a fase de glicerina na parte inferior do béquer e de biodiesel na parte superior. Vale ressaltar que ambos os produtos obtidos não são adequados para utilização sem antes passar pelas demais etapas do processo de produção industrial de biodiesel, como por exemplo a neutralização, a purificação para retirada de outros compostos como o catalisador, sabão e óleo não reagido, empregando-se diferentes métodos de lavagem e o refinamento dos produtos, etapas essas que não foram abordadas nessa pesquisa.



Figura 13 – Resultado da amostra após decantação.

Fonte: Autoria própria.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A construção do protótipo de reator para produção de biodiesel em escala de laboratório com a utilização de materiais alternativos possibilitou a aplicação prática dos conhecimentos de mecânica, informática, elétrica e dos conhecimentos específicos de controle e automação. Os atuadores utilizados foram capazes de manter a temperatura da mistura considerada ótima para a reação. Os controladores implementados, apesar da simplicidade, foram considerados satisfatórios. No entanto, sugere-se considerar a implementação de uma abordagem *anti-windup* nos controladores utilizados em trabalhos

futuros. A automação com a utilização de uma tela interativa permite ao usuário a realização de ajustes nos parâmetros de reação e o acompanhamento do processo em tempo real.

O protótipo construído apresenta algumas limitações mecânicas que devem ser melhoradas tais como: organização dos componentes elétricos, das tubulações e das vedações. Dessa forma, evita vazamentos que podem impactar na conversão da reação. A utilização de um agitador mecânico em conjunto com os jatos colidentes pode ser futuramente investigada para verificar a possibilidade de obtenção de resultados melhores de conversão de biodiesel em tempos menores de mistura.

Novos testes podem ser realizados para investigar a influência do acionamento intermitente dos bicos injetores na velocidade de conversão de biodiesel e para identificar a causa das pequenas oscilações de temperatura observadas durante os testes de implementação do controlador de temperatura do béquer.

5. REFERÊNCIAS

BACK, N.; OGLIARI, A.; DIAS, A.; SILVA, J. *Projeto Integrado de Produtos: planejamento, concepção e modelagem*. Barueri: Editora Manole, ago. 2008.

GHASEMI, M.; MOLAEI DEHKORDI, A. Transesterification of waste cooking oil to biodiesel using KOH/ γ -Al₂O₃ catalyst in a new two-impinging-jets reactor. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, [S. l.], v. 53, n. 31, p. 12238–12248, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ie403408r>.

(ISA) INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. *Instrumentation symbols and identification*. ISA-5.1-2009. Research Triangle Park, NC: ISA Standards, 2009.

MA, F.; HANNA, M. A. Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology*, [S. l.], v. 70, n. 1, p. 1–15, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00025-5).

OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. [S. l.]: Pearson Universidades, 2010. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=iL3FYgEACAAJ>.

PASHA, M.; DAI, L.; LIU, D.; GUO, M.; DU, W. An overview to process design, simulation and sustainability evaluation of biodiesel production. *Biotechnology for Biofuels*, [S. l.], v. 14, jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01977-z>.

REYES, J. F.; MALVERDE, P. E.; MELIN, P. S.; DE BRUIJN, J. P. Biodiesel production in a jet flow stirred reactor. *Fuel*, [S. l.], v. 89, n. 10, p. 3093–3098, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.06.002>.



SHEN, Y. H.; CHENG, J. K.; WARD, J. D.; YU, C. C. Design and control of biodiesel production processes with phase split and recycle in the reactor system. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, [S. l.], v. 42, n. 5, p. 741–750, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2011.01.010>.

TABATABAEI, M.; AGHBASHLO, M.; DEHHAGHI, M.; PANAHI, H. K. S.; MOLLAHOSSEINI, A.; HOSSEINI, M.; SOUFIYAN, M. M. Reactor technologies for biodiesel production and processing: A review. *Progress in Energy and Combustion Science*, [S. l.], v. 74, p. 239–303, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2019.06.001>.

APÊNDICE – Informações sobre o artigo

Contribuição dos autores

Resumo/Abstract/Resumen: Alexandre Both, Leandro Chies; **Introdução:** Alexandre Both, Leandro Chies; **Referencial** Alexandre Both, Leandro Chies; **Métodos:** Alexandre Both, Leandro Chies; **Resultados:** Alexandre Both, Leandro Chies; **Considerações finais:** Alexandre Both, Leandro Chies; **Referências:** Alexandre Both, Leandro Chies; **Revisão do manuscrito:** Alexandre Both, Leandro Chies; **Aprovação da versão final publicada:** Alexandre Both, Leandro Chies.

CRediT - Taxonomia de Papéis de Colaborador - <https://credit.niso.org/>

As opiniões e informações expressas neste manuscrito, no que diz respeito tanto à linguagem quanto ao conteúdo, não refletem necessariamente a opinião da **Tecnia – Revista de Educação, Ciência e Tecnologia do IFG**, de seus editores e do Instituto Federal de Goiás. As opiniões são de responsabilidade exclusiva dos respectivos autores.

Histórico editorial

Submetido: 26 de setembro de 2024.

Aprovado: 27 de outubro de 2025.

Publicado: 13 de outubro de 2026.



Como citar o artigo - ABNT

BOTH, Alexandre; CHIES, Leandro. Construção e Automação de um Protótipo de Reator para Produção de Biodiesel. **Tecnia – Revista de Educação, Ciência e Tecnologia do IFG**, Goiânia, v. 11, n. 2, p. e110214, 2026. DOI: 10.56762/tecnia.v11i2.2838 <https://doi.org/10.56762/tecnia.v11i2.2838>.

Processo de Avaliação

Revisão por pares duplo-cega (*Double blind peer review*).

Conflito de Interesses

Não declarado.

Avaliadores

Dois pareceristas ad hoc avaliaram este artigo e não autorizaram a divulgação dos seus nomes.

Editor(a) Seção

Prof. Dr. Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini Vicente (IFG).