



# Aplicação de lógica Fuzzy no controle de pH de sacarificador usado na produção de bioetanol a partir do amido da batata

Application of Fuzzy logic in pH control of saccharifier used in bioethanol production from potato starch

I. C. S. Souza; R. R. Fonseca\*

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Sergipe, 49107-230, São Cristóvão - Sergipe, Brasil*

*\*rodolphorf@academico.ufs.br*

*(Recebido em 27 de novembro de 2025; aceito em 11 de fevereiro de 2026)*

A demanda energética global e o efeito do consumo de combustíveis fósseis na crise climática, impulsiona a busca por energias renováveis. Assim, o bioetanol emerge como alternativa viável. A complexidade operacional inerente ao processo não-linear de produção de bioetanol demanda a aplicação de técnicas avançadas de controle para assegurar segurança e eficiência no processo. Deste modo, este trabalho descreve o desenvolvimento e a avaliação de um controlador híbrido Fuzzy-PID para o controle de pH na etapa de sacarificação do processo de produção de bioetanol a partir do amido de batata, em comparação com controladores PI e PID. A modelagem matemática envolveu o balanço de íons  $H^+$  e  $OH^-$  e a dinâmica da atividade enzimática em função do pH, implementados no ambiente de simulação. Foram simulados três cenários operacionais, os quais foram avaliados com base na análise dos indicadores de desempenho. Os resultados demonstraram que o controlador Fuzzy-PID superou o PI e o PID em todas as condições, apresentando menores valores de IAE e ISE, além de respostas mais rápidas e suaves a distúrbios, obtendo um esforço no atuador da linha de solução básica 27,67% menor em relação ao PI e no atuador da linha de solução ácida um valor 57385 vezes menor em relação ao PID no cenário com ruído na medição do pH. Assim, conclui-se que a lógica Fuzzy é uma abordagem eficaz para o controle avançado de processos não lineares, principalmente na presença de ruído, contribuindo para qualidade e eficiência operacional em bioprocessos industriais.

Palavras-chave: controle de pH, lógica Fuzzy, bioetanol.

Global energy demand and effects of fossil fuels to the climate crisis, underscores the need for renewable energy sources. Within this context, bioethanol emerges as a viable alternative with diverse commercial applications. The operational complexity inherent in bioethanol production that is a nonlinear process, necessitates the application of advanced control techniques to ensure both process safety and efficiency. Accordingly, the present study describes the application and evaluation of a hybrid Fuzzy-PID controller for pH control during the saccharification stage of bioethanol production from potato starch, in comparison with PI and PID controllers. The mathematical modeling considering the balance of  $H^+$  and  $OH^-$  ions and the dynamics of enzymatic activity as a function of pH, was implemented within a simulation environment. Three operational scenarios were simulated and assessed through the analysis of performance indicators. The results demonstrated that the Fuzzy-PID controller outperformed the PI and PID controllers under all conditions, yielding lower IAE and ISE values, as well as faster and smoother responses to disturbances. Furthermore, it achieved an actuator effort 27.67% lower for base solution stream valve than that calculated to PI controller and an actuator effort 57,385 times lower for acid solution stream valve than that obtained with PID controller, considering pH noise measure. These findings indicate that Fuzzy logic constitutes an effective approach for advanced control of nonlinear processes, mainly in cases of noise measurements, contributing to enhanced quality and operational efficiency in industrial bioprocesses.

Keywords: pH control, Fuzzylogic, bioethanol.

## 1. INTRODUÇÃO

O aumento na demanda energética global é um fenômeno intrinsecamente ligado ao contínuo avanço da industrialização e à constante expansão populacional [1]. Esse aumento na necessidade por energia é ainda mais acentuado devido à iminente escassez das reservas globais de combustíveis fósseis, que ainda representam a maior fonte energética do mundo, com uma parcela

de 79% no consumo final de energia em 2022, correspondendo a uma redução de 2,1% em relação a 2012 [2]. Paralelamente, a atual crise climática, desencadeada principalmente pela liberação de gases de efeito estufa, tem intensificado a urgência da busca e adoção de fontes de energia renováveis. Nesse contexto, os biocombustíveis, os quais compreendem os combustíveis derivados de biomassa, surgem como alternativa e parte integrante da solução para atenuar os efeitos das alterações climáticas, oferecendo benefícios significativos nos âmbitos econômico, social e ambiental [3, 4].

No âmbito dos biocombustíveis, o bioetanol se destaca como a opção mais viável em longo prazo, reduzindo as emissões de carbono em até 80%, sendo também o mais amplamente utilizado e produzido em escala global, tendo gerado 2,5 EJ de energia em 2022 [5, 6] e alcançando um marco histórico na sua produção em 2024, totalizando 117,4 bilhões de litros [7]. Além disso, o etanol de origem renovável apresenta diversas aplicações comerciais, sendo utilizado no setor de transporte, na produção de alimentos, bebidas e plásticos, como componente em solventes para uso na indústria farmacêutica e de cosméticos e em diversos processos de outras indústrias químicas [8].

A predominância da produção de bioetanol de primeira geração continua sendo a alternativa mais adotada, graças às tecnologias existentes e ao custo de produção acessível, de modo que os principais produtores deste biocombustível utilizam matérias-primas de origem amilácea [9]. Simultaneamente, a cadeia produtiva de batata enfrenta consideráveis desperdícios ao longo de seu ciclo, com aproximadamente 15 a 24% das batatas colhidas perdidas durante a produção devido a padrões de qualidade, e cerca de 25 a 30% da produção global descartada na comercialização devido a defeitos visuais que afetam a venda [10, 11]. Como resultado, as batatas, incluindo as cascas, descartadas, tornam-se resíduos agroindustriais passíveis de serem aproveitados como uma fonte alternativa para a produção desse biocombustível.

A produção em larga escala de bioetanol requer a participação de microrganismos, a realização de diversas etapas, a consideração de diversas variáveis e a utilização de vários equipamentos, além de ser um processo não-linear, o que confere ao processo uma elevada complexidade operacional, excedendo a capacidade dos controladores convencionais. Um exemplo dessa complexidade é o controle do pH, o qual exerce um papel essencial na atividade enzimática durante a sacarificação: a produção de açúcares fermentescíveis ocorre de forma eficiente apenas quando o pH se mantém dentro da faixa ideal para a enzima. Os estudos de Mironescu et al. (2009) [12] demonstraram que, fora desse intervalo, a formação de maltose torna-se inviável e o processo é interrompido. Diante disso, torna-se indispensável o emprego de técnicas de controle avançado capazes de manter o pH estável, assegurando a segurança e a eficiência operacional [13].

Portanto, o controlador Fuzzy se configura como uma alternativa eficiente em relação aos métodos convencionais de controle automático. Isso ocorre porque emprega a lógica Fuzzy (difusa ou nebulosa), que utiliza interpretação linguística para lidar com dados imprecisos e subjetivos, fundamentando-se no conhecimento humano para estabelecer regras e funções de controle. Apesar disso, a lógica Fuzzy ainda é um tema pouco pesquisado no aspecto de controle do etanol obtido a partir de biomassa, o que abre caminho para a exploração da sua utilização nesse processo [14].

Deste modo, o presente estudo teve como propósito avaliar a viabilidade de implementação de um controlador Fuzzy-PID, visando aprimorar o controle do pH durante a etapa de sacarificação no processo de produção de bioetanol, com base na análise dos indicadores de desempenho.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Planta de produção de bioetanol

O presente estudo baseou-se no modelo da planta de produção de bioetanol a partir do amido da batata, conforme proposto por Oliveira et al. (2022) [13], e complementada pelos modelos de reatores descritos por Nagy (2007) [15] e Fonseca et al. (2018) [16], conforme apresentado no P&ID deste processo na Figura 1. Nesse diagrama, as variáveis do processo estão representadas da seguinte forma: Fa corresponde a vazão volumétrica de alimentação de amido; Fenz, a de

enzimas; NaOH, a de hidróxido de sódio; HCl a de ácido clorídrico; e Fs, a vazão volumétrica total correspondente à saída do reator enzimático. A planta completa é composta por um reator enzimático (sacarificador), um biorreator (fermentador), um tanque de reciclo celular e um sistema de filtração.

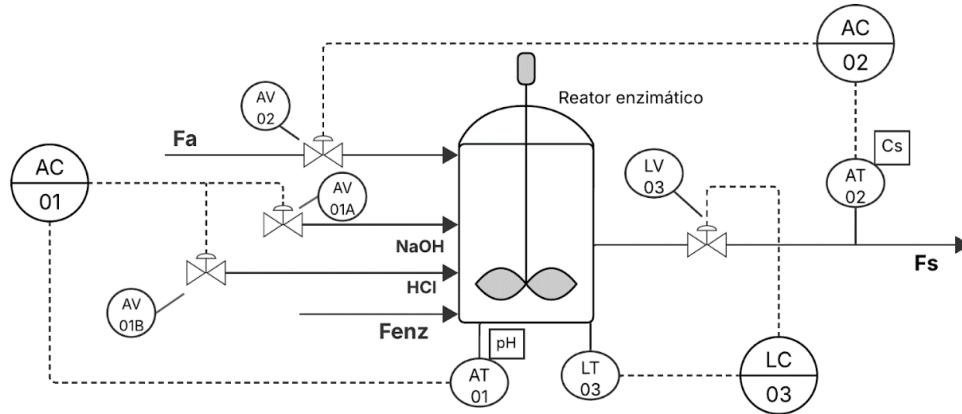


Figura 1: P&ID do reator enzimático. Fonte: Adaptado de Oliveira et al. (2022) [13].

O processo de sacarificação considera mistura perfeita em um reator contínuo de tanque agitado (CSTR), operando inicialmente em regime estacionário e com ausência de perdas térmicas. A alimentação do reator inclui correntes contendo amido e a enzima glucoamilase, sendo o nível no CSTR mantido constante, por meio do controle de vazão. Para regular a concentração de glicose na saída do sacarificador, utilizou-se um controlador PI, cuja variável manipulada é a vazão de entrada de amido.

À vista disso, com objetivo de controlar o pH do meio reacional durante a reação enzimática, neste trabalho foram desenvolvidos dois sistemas de controle distintos, para fins de comparação: um controlador PI e um controlador Fuzzy-PID. Ambos sistemas utilizaram como variáveis manipuladas a vazão de solução ácida de HCl e de solução básica de NaOH com estratégia *split-range*, empregando atuadores gerenciados simultaneamente pelo controlador, como ilustrado na Figura 2. A escolha dessas soluções baseou-se no fato de ambas se dissociarem completamente, permitindo ajuste direto e preciso da concentração de íons  $H^+$  e  $OH^-$  e facilitando a modelagem matemática para a simulação computacional. Adicionalmente, os íons conjugados de ambas soluções ( $Cl^-$  e  $Na^+$ ) são inertes, não interferindo nas reações do sistema [17]. Ademais, foram também modeladas as dinâmicas de desnaturação enzimática e variações na atividade catalítica em função do desvio do pH ideal.

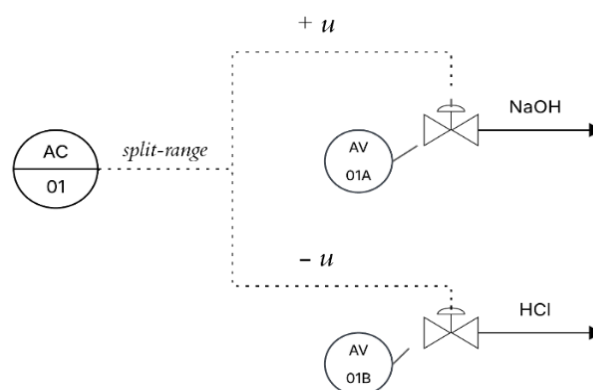


Figura 2: Estratégia genérica de controle *split-range* de pH.

### 2.1.1. Modelagem Matemática do pH e Desnaturação Enzimática

Para representar dinamicamente o comportamento do pH no reator de sacarificação, realizou-se o balanço de massa para os íons de hidrogênio ( $H^+$ ) e de hidroxila ( $OH^-$ ), considerando as dosagens externas de ácido (Eq.1) e de base (Eq.2) uma fonte interna de prótons, representada de forma simplificada e empírica pela conversão da taxa de hidrólise enzimática de amido - a qual é calculada a cada instante da simulação e propagada para as demais equações do modelo - em fluxo de  $H^+$  equivalente (Eq. 3), conforme descrito a seguir.

$$H_i = \frac{F_{HCl} \cdot C_{HCl} \cdot 1000}{MM_{HCl}} \quad (1)$$

$$OH_i = \frac{F_{NaOH} \cdot C_{NaOH} \cdot 1000}{MM_{NaOH}} \quad (2)$$

$$H_{interno} = \frac{r_{enz} \cdot A_S \cdot L_S \cdot 1000}{MM_{C_6}} \quad (3)$$

Em que:

- $C_A(0)$ : Concentração inicial de amido no sacarificador [84 kg.m<sup>-3</sup>];
- $C_{enz}(0)$ : Atividade inicial da enzima no sacarificador [7,2816x10<sup>4</sup> U.m<sup>-3</sup>];
- $C_{HCl}$ : Concentração de HCl [10 kg.m<sup>-3</sup>];
- $C_{NaOH}$ : Concentração de NaOH [20 kg.m<sup>-3</sup>];
- $C_{S1}$ : Concentração de glicose na saída do sacarificador [60,02 kg.m<sup>-3</sup>];
- $F_{HCl}$ : Vazão de entrada de HCl [m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>];
- $F_{NaOH}$ : Vazão de entrada de NaOH [m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>];
- $H_i$ : Fluxo molar de entrada de íons  $H^+$  [mol.h<sup>-1</sup>];
- $H_{interno}$ : Termo empírico que quantifica o fluxo interno de prótons equivalentes [mol.h<sup>-1</sup>];
- $k_I(t)$ : Taxa de hidrólise enzimática no tempo t [kg.m<sup>-3</sup>.h<sup>-1</sup>];
- $k_{ce,max}$ : Atividade máxima da enzima [7,5x10<sup>-7</sup> kg.U<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>];
- $k_g$ : Constante de modulação associada a glicose acumulada [1,22 kg.m<sup>-3</sup>];
- $k_m$ : Constante de Michaelis-Menten [0,406 kg.m<sup>-3</sup>];
- $k_s$ : Constante de modulação associada ao amido [62,7 kg.m<sup>-3</sup>];
- $MM_{C_6}$ : Massa Molar da C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> [180 g.mol<sup>-1</sup>];
- $MM_{HCl}$ : Massa Molar do HCl [36,46 g.mol<sup>-1</sup>];
- $MM_{NaOH}$ : Massa Molar de NaOH [40 g.mol<sup>-1</sup>];
- $OH_i$ : Fluxo molar de entrada de íons  $OH^-$  [mol.h<sup>-1</sup>];
- $A_S$ : Área da seção transversal do reator [1,37 m<sup>2</sup>];
- $L_S$ : Nível de líquido no reator [m].

A remoção física dos íons  $H^+$  do meio reacional ocorre pela saída do reator enzimático, sendo o respectivo fluxo molar representado por  $F_{H,out}$  [mol.h<sup>-1</sup>]. Esse termo é formalmente definido na Equação 4 do balanço de espécies. Adicionalmente, a dinâmica da concentração de  $H^+$  no sacarificador foi determinada mediante a aplicação do Balanço de Massa para um sistema de mistura perfeita, conforme expresso na Equação 5.

$$F_{H,out} = H_{atual} \cdot (F_{HCl} + F_{NaOH}) \quad (4)$$

$$\frac{d[H^+]}{dt} = \frac{H_i + H_{interno} - OH_i - F_{H,out}}{A_S \cdot L_S} \quad (5)$$

Além disso, a fim de evitar instabilidades numéricas, estabeleceu-se um valor mínimo positivo de 10<sup>-9</sup> para a quantidade líquida de prótons livres no meio [mol.h<sup>-1</sup>], com o intuito de prevenir que variações transientes ou erros de arredondamento matemático resultem em concentrações negativas ou nulas, o que inviabilizaria o cálculo logarítmico. Essa determinação está formalizada na Equação 6.

$$[H]^+ = \max([H]^+, 10^{-9}) \quad (6)$$

O pH foi determinado por meio da Equação 7, que previamente converte a concentração de mol.m<sup>-3</sup> para mol.L<sup>-1</sup>.

$$pH = -\log_{10} \left( \frac{[H^+]}{1000} \right) \quad (7)$$

Em paralelo, a constante cinética de hidrólise catalítica [ $k_{Ce}$ , em kg.U<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>], empregada na equação de velocidade de Michaelis-Menten, foi dinamicamente modulada com base na atividade enzimática [ $f(pH)$ ], formalizada na Equação 8. Esta última é diretamente influenciada pela proximidade do pH em relação ao seu valor ótimo, estabelecido em 4,5 [18]. Essa relação causal foi quantificada por intermédio de uma função gaussiana centrada no pH ótimo, conforme evidenciado na Equação 9 [19].

$$k_{Ce} = k_{Ce,max} \cdot f(pH) \quad (8)$$

$$f(pH) = \exp \left( -\frac{(pH - pH_{\text{ótimo}})^2}{2\sigma^2} \right) \quad (9)$$

De tal forma,  $k_{Ce,max}$  corresponde à taxa catalítica máxima, enquanto o parâmetro  $\sigma$ , que define a sensibilidade da atividade enzimática às variações de pH, foi atribuído neste estudo um valor referente a uma sensibilidade moderada e igual a 0,5. Consequentemente, à medida que o pH se afasta do valor ótimo, observa-se uma redução progressiva na atividade enzimática, o que reproduz quantitativamente o comportamento característico de enzimas sensíveis ao pH.

Com base nisso, implementou-se o modelo proposto no ambiente de simulação, empregando-se uma abordagem orientada a objetos, e procedeu-se com a configuração dos controladores.

## 2.2 Controlador Proporcional-Integral e Proporcional-Integral-Derivativo

O projeto do controlador Proporcional-Integral (PI) e Proporcional-Integral-Derivativo (PID) para realizar o ajuste do pH no sacarificador, seguiu um procedimento clássico de controle de processos. A sintonia do controlador PI foi realizada por meio da aplicação do método da curva de reação (Ziegler-Nichols em malha aberta), uma abordagem clássica amplamente utilizada para determinar os parâmetros de sistemas dinâmicos. O procedimento experimental consistiu em primeiro aplicar um degrau unitário na vazão de NaOH ao sistema em malha aberta; em seguida registrar a resposta temporal do pH e identificar os parâmetros característicos da curva - ganho estático (K), tempo morto (td) e constante de tempo ( $\tau$ ), através de análise gráfica do ponto de inflexão e assíntota; e por fim calcular os ganhos proporcional (Kp), integral (Ki) e derivativo (Kd) conforme as relações empíricas estabelecidas por Ziegler e Nichols em 1942 [20].

## 2.3 Controlador Fuzzy-PID

O controlador Fuzzy-PID adotado nesta pesquisa foi implementado com base na lógica Fuzzy do tipo Mamdani, empregando uma base de 49 regras adaptadas a partir do modelo clássico de Mamdani, amplamente descrito na literatura [21]. Foram utilizadas sete variáveis linguísticas — Grande Negativo (GN), Médio Negativo (MN), Pequeno Negativo (PN), Zero (ZR), Pequeno Positivo (PP), Médio Positivo (MP) e Grande Positivo (GP) —, com funções de pertinência triangulares. A operação lógica adotada para a composição das regras foi o operador AND, garantindo a combinação simultânea das variáveis de entrada. As regras foram definidas considerando como variáveis de entrada o erro (E) e a variação do erro (dE), seguindo a estrutura: SE (dE é X) E (E é Y), ENTÃO a saída é Z.

Para a etapa de defuzzificação, empregou-se o método de cálculo do centróide. A estrutura completa do controlador Fuzzy-PID implementado encontra-se ilustrada na Figura 3. O controlador Fuzzy-PID gera o sinal de saída a partir de regras Fuzzy e da integração das ações proporcional, integral e derivativa, permitindo um controle eficiente dos fluxos dos reagentes. A

seleção dessas entradas e saídas é fundamental para garantir que o pH seja mantido dentro da faixa desejada, promovendo a estabilidade do processo e evitando oscilações indesejadas, aspecto essencial em processos químicos sensíveis.

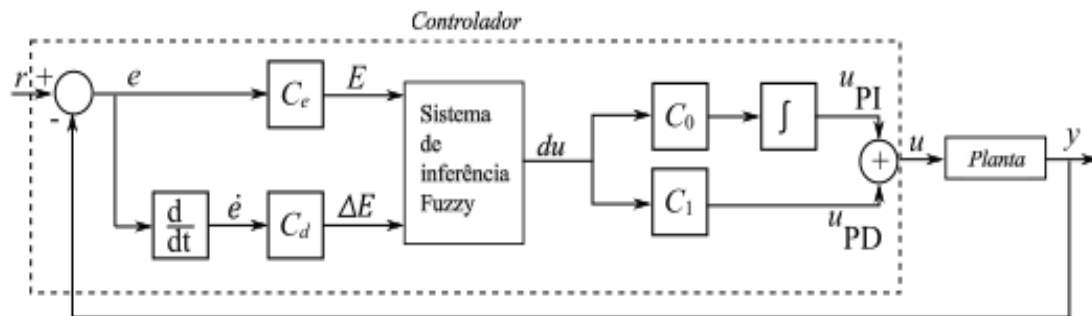


Figura 3: Estrutura do bloco Fuzzy PID em uma malha de controle no Simulink®. Fonte: Adaptado de The MathWorks, Inc. [22].

O modelo do controlador considerou duas entradas, o erro do pH ( $e$ ) e a variação desse erro ao longo do tempo ( $\Delta e$ ), e uma única saída configurada em esquema *split-range*, conforme ilustrado anteriormente na Figura 2, de modo que valores positivos ativassem a entrada da solução básica (NaOH) e negativos acionassem a entrada da solução ácida (HCl), ambas moduladas para corrigir o desvio de pH.

Diferentemente do controlador PID convencional, no controlador Fuzzy-PID cada ganho atua como fator de escala em pontos estratégicos do laço de controle:

- $C_e$ : Ajusta o sinal de erro ( $E$ ) antes da entrada no Fuzzy, ponderando o erro no cálculo da saída do Fuzzy;
- $C_d$ : Ajusta a variação do erro ( $\Delta E$ ), ponderando-a no cálculo da saída do Fuzzy;
- $C_0$ : Funciona como ganho no ramo PI (aplicado antes do integrador);
- $C_1$ : Funciona como ganho no ramo PD (multiplicando diretamente a saída derivativa).

Assim,  $C_e$  e  $C_d$  condicionam os sinais de entrada do Fuzzy, enquanto  $C_0$  e  $C_1$  regulam a intensidade das ações integral e derivativa na composição da ação de controle.

## 2.4 Simulações

As simulações computacionais foram realizadas empregando um método numérico de integração com passo variável, configurado para um tamanho de passo mínimo de  $10^{-9}$ , passo máximo de 0,01, com tolerância de erro máximo relativo de  $10^{-4}$  e de erro máximo absoluto de  $10^{-6}$ . Para comparar de forma equitativa o desempenho dos controladores PI, PID e Fuzzy-PID, todos foram submetidos a simulações extensivas em cenários operacionais idênticos. Ou seja, cada controlador enfrentou exatamente as mesmas situações de teste. Os cenários avaliados foram:

Cenário 1: com o pH inicial em 4, abaixo do ideal, aplicando um degrau de +0,5 unidades de pH no instante de tempo = 0h;

Cenário 2: com o pH inicial em 5, acima do ideal, aplicando um degrau de -0,5 unidades de pH no instante de tempo = 0h;

Cenário 3: com ruído de magnitude 0,2 durante toda a simulação.

Cada simulação seguiu um protocolo de quatro etapas: 1) inicialização do sistema em regime permanente; 2) introdução da perturbação em tempo programado; 3) coleta e armazenamento dos dados operacionais; e 4) repetição do mesmo cenário para o outro tipo de controlador. Essa

padronização assegurou comparabilidade entre os controladores avaliados. Os dados gerados serviram de base para a análise de desempenho descrita no item 2.5.

## 2.5 Análise de Desempenho

A análise de desempenho dos controladores PI e Fuzzy-PID foi conduzida com base nos dados obtidos nas simulações descritas anteriormente, considerando critérios quantitativos que avaliam a qualidade do controle.

A Integral do Erro Absoluto (IAE), determinada pela Equação 10, corresponde à soma das áreas abaixo da curva  $|e(t)|$ , de maneira que quanto menor for o valor do IAE, melhor será o desempenho do controlador em minimizar os erros de controle durante ao longo do tempo de operação do sistema.

$$IAE = \int |e(t)| dt \quad (10)$$

A Integral do Erro Quadrático (ISE), calculada pela Equação 11, é um índice que penaliza de forma mais intensa os desvios maiores, pois erros de maior magnitude são amplificados de forma quadrática, refletindo com precisão seu impacto no desempenho do controlador [23]. Essa característica torna o ISE especialmente sensível a picos de erro, enfatizando não apenas a magnitude, mas também a duração desses desvios. Um valor menor de ISE indica que o controlador está conseguindo minimizar eficazmente tanto a intensidade quanto a persistência dos erros, o que geralmente se traduz em uma resposta mais rápida e suave do sistema.

$$ISE = \int e(t)^2 dt \quad (11)$$

O Esforço de Controle (CE), calculado pela Equação 12, mede a intensidade e duração dos esforços de controle, avaliando a eficiência e suavidade das ações ( $u$ ). Esse índice é fundamental para a análise do impacto das configurações de controle sobre a estabilidade do sistema e a capacidade de realizar ajustes graduais, prevenindo oscilações que possam comprometer o desempenho do processo e aumentar o consumo de energia. Valores elevados de CE caracterizam uma operação de natureza mais agressiva, enquanto valores reduzidos indicam uma operação mais suave.

$$CE = \int |\Delta u| dt \quad (12)$$

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Sintonia dos Controladores

Como base para a realização da sintonia tanto do controlador PI quanto do Fuzzy-PID, a Figura 4 apresenta a resposta à aplicação do degrau unitário na vazão de NaOH em malha aberta do sistema no tempo de 35h. A partir desta resposta, determinou-se os parâmetros dinâmicos da função de transferência que relaciona o pH com a vazão de NaOH, como o ganho estático ( $K_p$ ), o tempo de atraso ( $t_d$ ) e constante de tempo ( $\tau$ ).

A partir da análise da curva de reação característica, identificou-se o ponto de inflexão. Logo, ao traçar a reta tangente nesse ponto, foi possível determinar os parâmetros do modelo de primeira ordem com tempo de atraso, resultando nos seguintes valores 0,267 [pH.L<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>] para  $K_p$ , 0,59 [h] para  $t_d$  e 1,5 [h] para  $\tau$ .

Em seguida, os parâmetros do controlador PI foram calculados segundo as fórmulas de Ziegler-Nichols (1942) [20], como citado anteriormente. A partir disso, foi possível calcular e determinar os parâmetros, encontrando  $K_C = 8,57$  e  $\tau_1 = 1,96$ .

Além disso, os parâmetros utilizados na sintonia do controlador Fuzzy-PID, conforme ilustrado na Figura 3, foram obtidos com base na sintonia do controlador PID, que resultou em valores de  $K_C = 11,42$ ,  $\tau_I = 3,0$  e  $\tau_D = 0,295$ .

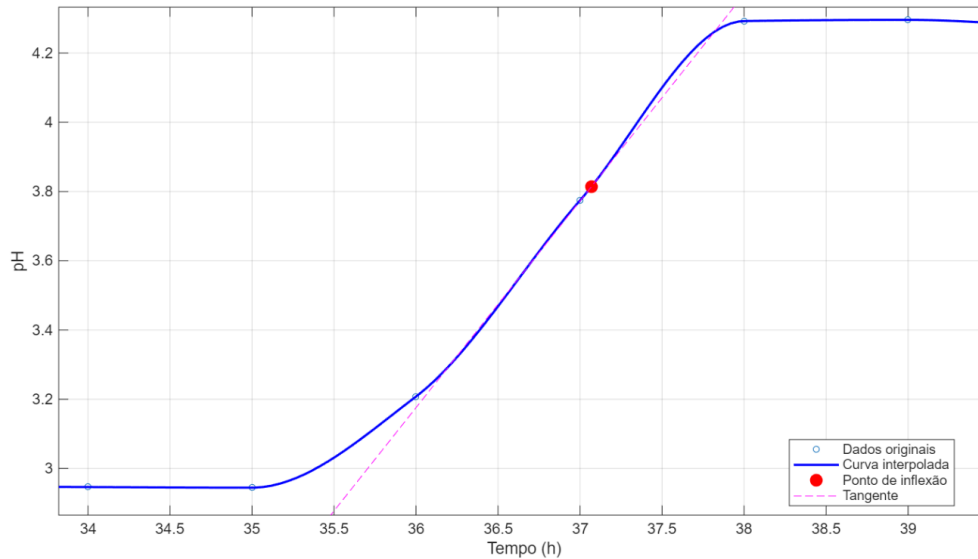


Figura 4: Curva de reação em malha aberta com reta tangente no ponto de inflexão.

Como descrito por Ying (2000) [23], e conforme exposto na documentação on-line do MATLAB®[22], para entradas normalizadas em um universo de discurso  $[-L, L]$  (para 'e' e  $\Delta e$ ) e saída em um universo de discurso  $[-H, H]$ , assumindo que  $H = 2L$ , os ganhos  $K_C$ ,  $K_I$  e  $K_d$  de um PID relacionam-se aos parâmetros do Fuzzy-PID por meio das Equações 13, 14 e 15, em que  $C_e$  é um valor assumido com base na faixa esperada do erro da planta.

$$C_d = \frac{C_e}{2K_i} \left( K_C - \sqrt{K_C^2 - 4K_iK_d} \right) \quad (13)$$

$$C_0 = \frac{K_i}{C_e} \quad (14)$$

$$C_1 = \frac{K_d}{C_d} \quad (15)$$

Portanto, considerando  $C_e$  igual a 1, os demais parâmetros ( $C_d$ ,  $C_0$  e  $C_1$ ) foram calculados a partir das equações de equivalência descritas anteriormente, obtendo-se  $C_d = 0,57$ ;  $C_0 = 9,68$  e  $C_1 = 5,96$ . Com base nesses resultados, configurou-se o controlador Fuzzy-PID e realizaram-se as simulações propostas.

### 3.2 Desempenho dos controladores nas simulações

As simulações dos Cenários 1 e 2 possibilitaram a avaliação da resposta do sistema a variações no *setpoint*, um aspecto de suma importância na produção de bioetanol, uma vez que cada etapa do processo requer uma alteração no SP do pH devido aos microrganismos e enzimas empregados, conforme previamente demonstrado. No Cenário 1, o sistema partiu de um SP inicial de 4,0; valor abaixo do ideal, sendo submetido, no instante  $t = 0$  h, a um degrau positivo que elevou o SP para 4,5. Já na simulação do Cenário 2, houve a aplicação de um degrau negativo de 0,5 unidades de pH também no instante  $t = 0$  h, partindo de um pH inicial de 5,0, acima do ideal.

As Figuras 5 e 6 ilustram o comportamento temporal das seguintes variáveis: a concentração de amido no interior do reator ( $C_A$ ) a concentração de enzimas ( $C_e$ ), a concentração de glicose no efluente ( $C_S$ ), a vazão volumétrica de alimentação de amido ( $F_a$ ), o nível de líquido no reator ( $L_s$ ) e a vazão volumétrica de saída ( $F_s$ ) para os Cenários 1 e 2, respectivamente.

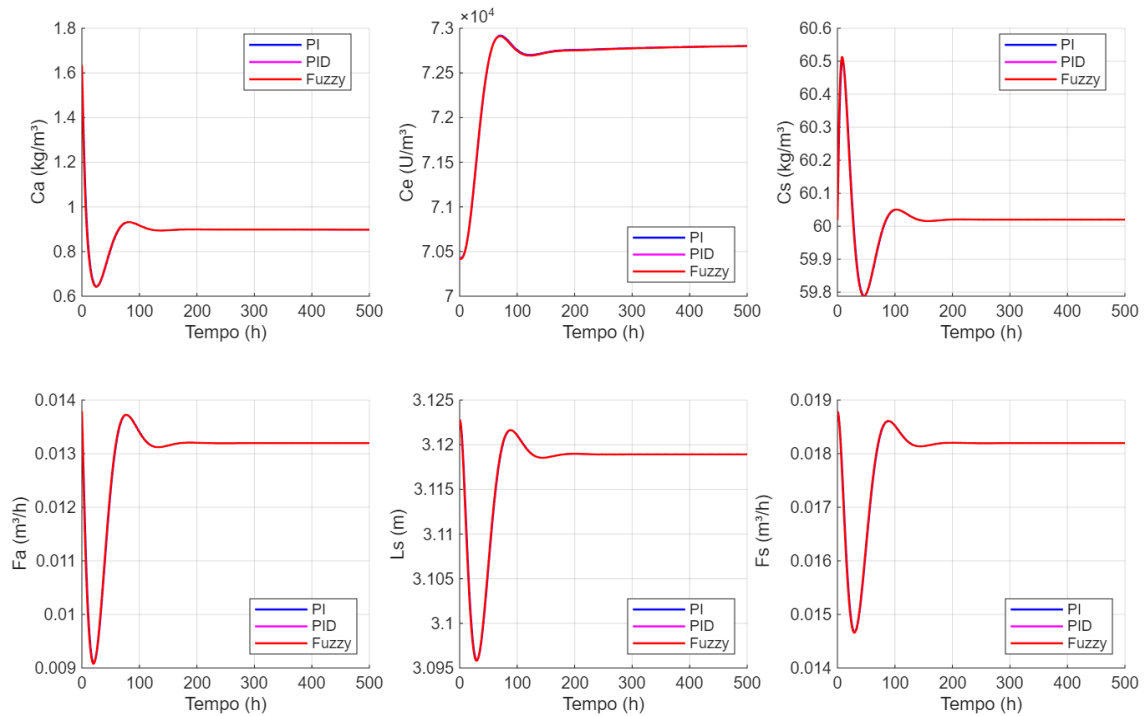


Figura 5: Resposta das variáveis no sacarificador no Cenário 1.

Conforme apresentado nas Figuras 5 e 6, observa-se que, embora as perturbações em degrau aplicadas ao *setpoint* de pH tenham sido de magnitudes iguais, mas de sinais opostos, o impacto dinâmico observado sobre as variáveis de processo foi essencialmente idêntico para ambos os casos em todas as estratégias de controle testadas.

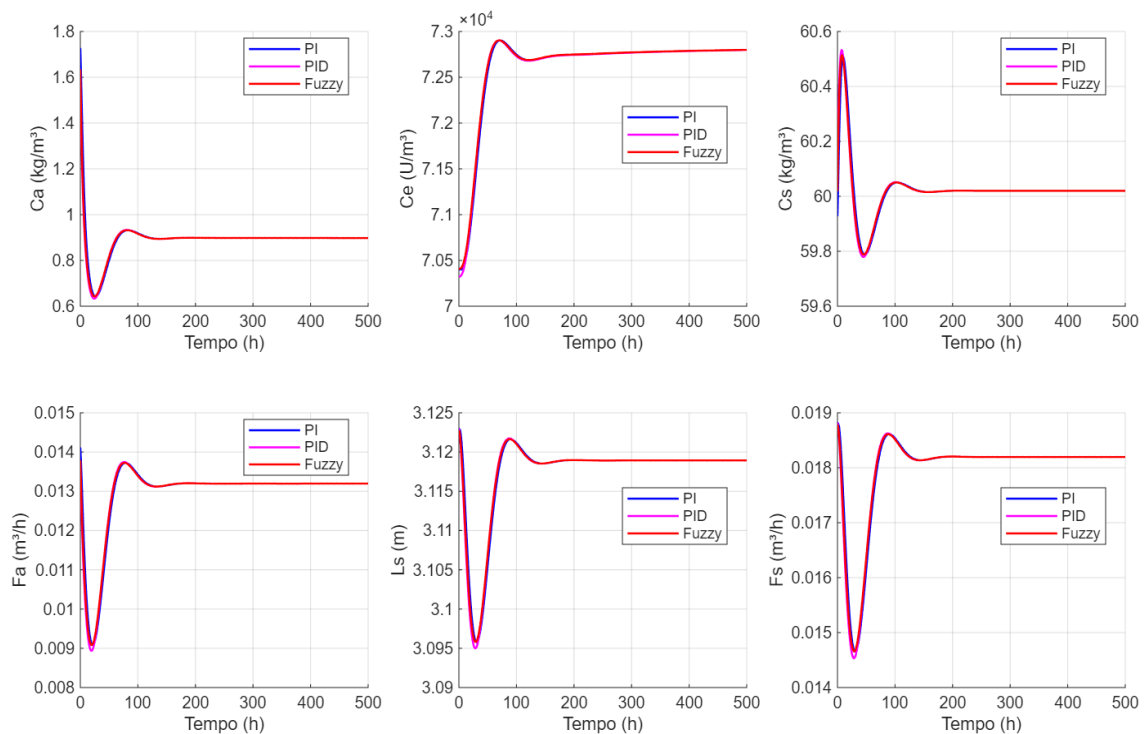


Figura 6: Resposta das variáveis no sacarificador no Cenário 2.

A resposta do sistema demonstrou consistência com a sensibilidade da glucoamilase a essa variável operacional. Dessa forma, ao ajustar o *setpoint* do pH para o nível ótimo da enzima, observou-se um aumento progressivo da concentração enzimática e, conseqüentemente, uma redução significativa em Ca. Além disso, a elevação na taxa de hidrólise resultou no aumento de Cs acima do SP, seguida por uma ligeira convergência assintótica para o valor de referência. Conforme evidenciado nos Cenários anteriores, esse comportamento foi uma consequência da atuação do sistema de controle, que implementou um aumento progressivo na vazão de alimentação para compensar os desvios de conversão e manter a estabilidade da variável controlada. Esse aumento de Fa provocou também a elevação do nível do reator e, subsequentemente, da vazão de saída, até que ambas as variáveis atingissem um novo estado estacionário.

Este conjunto de respostas evidenciam que, além de influenciar diretamente a cinética enzimática, alterações no *setpoint* do pH podem induzir efeitos em cascata nas variáveis de composição e operação de um CSTR, demandando coordenação integrada entre as malhas de controle de pH, glicose e nível para a obtenção de uma nova condição operacional estável.

Além disso, em ambos Cenários, o controlador Fuzzy-PID apresentou a resposta mais ágil (Figuras 7 e 8, Cenário 1 e Figuras 9 e 10, Cenário 2) entre os métodos avaliados alcançando o ponto de ajuste (SP) em aproximadamente 8 horas — desempenho substancialmente superior ao obtido pelo controlador PI, que requereu cerca de 20 horas para atingir a mesma condição. Observou-se, ainda, que o Fuzzy-PID superou ligeiramente o PID, cuja convergência ao SP ocorreu com um acréscimo de apenas 30 minutos em relação ao primeiro. Adicionalmente, o controlador Fuzzy-PID apresentou menor magnitude de *undershoot*, no Cenário 6, quando comparado aos demais controladores. Essa vantagem no tempo de acomodação evidencia a capacidade adaptativa intrínseca da lógica *Fuzzy* para lidar com a não linearidade do processo, possibilitando ajustes mais precisos e eficientes nas vazões de base e ácido.

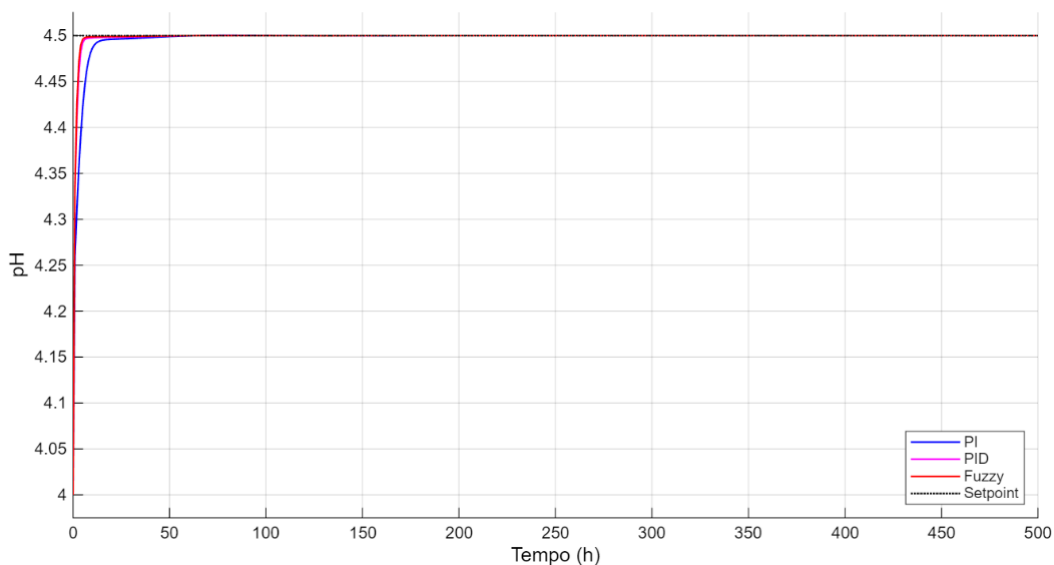


Figura 7: Comparação entre o controlador PI, PID e Fuzzy-PID na variação do pH ao longo do tempo no Cenário 1.

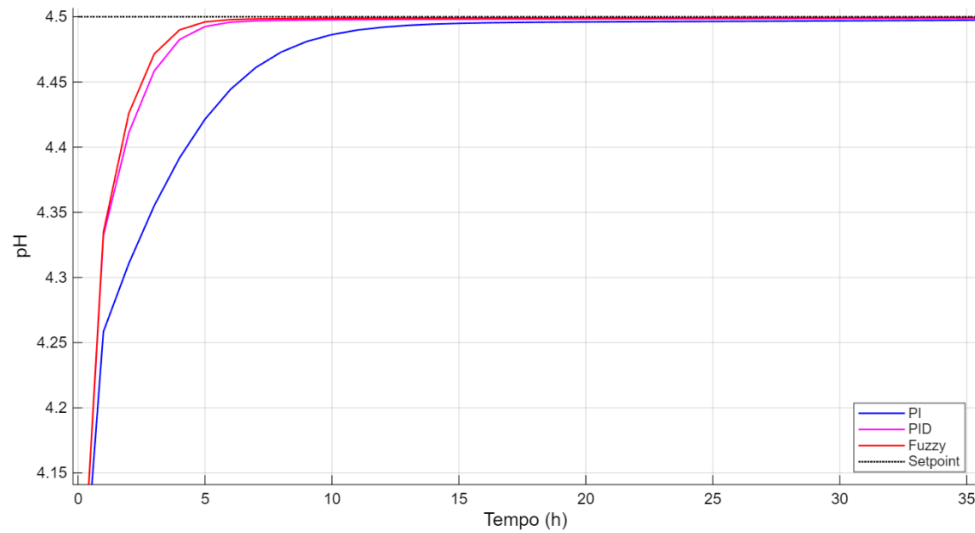


Figura 8: Ampliação da análise comparativa entre os controladores PI, PID e Fuzzy-PID, evidenciando a variação do pH ao longo do tempo no Cenário 1.

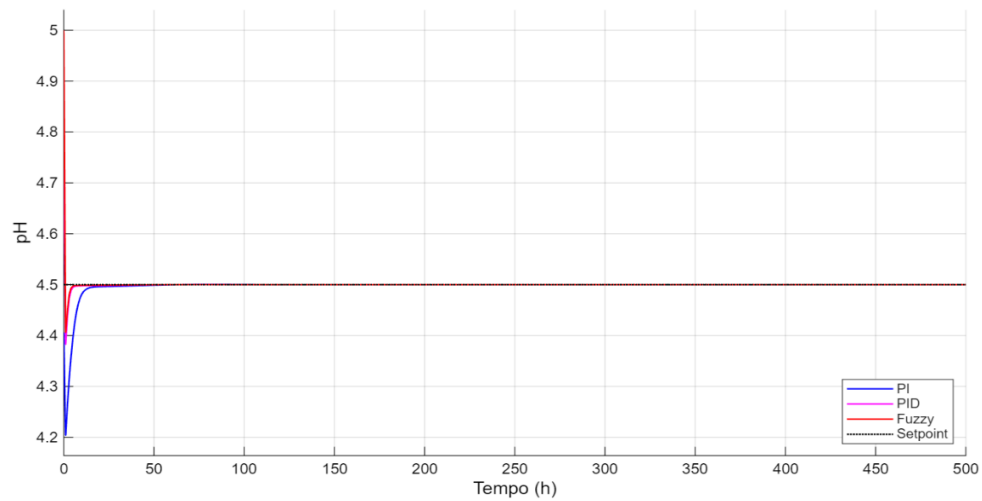


Figura 9: Comparação entre o controlador PI, PID e o Fuzzy-PID na variação do pH ao longo do tempo no Cenário 2.

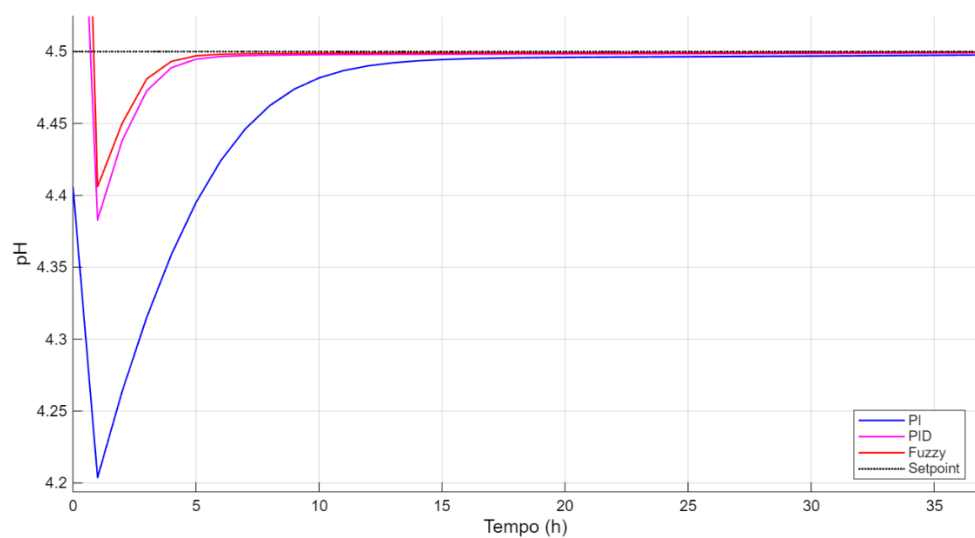


Figura 10: Ampliação da análise comparativa entre os controladores PI, PID e Fuzzy-PID, evidenciando a variação do pH ao longo do tempo no Cenário 2.

As Figuras 11 e 12 que ilustram a vazão de base nos Cenários 1 e 2, respectivamente — corroboram com a manutenção de valores de CE próximos entre os três controladores avaliados, com uma divergência mais evidente no Cenário 2 (Tabela 1). Nessa condição, o controlador PI apresentou o menor esforço de controle em ambos os Cenários, ao passo que o PID registrou o maior esforço no Cenário 1 e o Fuzzy-PID, no Cenário 2.

Por outro lado, o controlador Fuzzy-PID apresentou os melhores desempenhos para os índices de IAE e ISE em ambos os Cenários. Conforme os resultados, no Cenário 1 e no Cenário 2, o controlador PID obteve reduções no IAE de 51,06 e 80,06%, respectivamente, e no ISE de 38,29 e 93,38%, quando comparado ao PI. Já o Fuzzy-PID registrou reduções ainda mais expressivas, variando de 56,86 a 86,23% para o IAE, além de alcançar 39,94% de diminuição no ISE no Cenário 1 e 95,81% no Cenário 2.

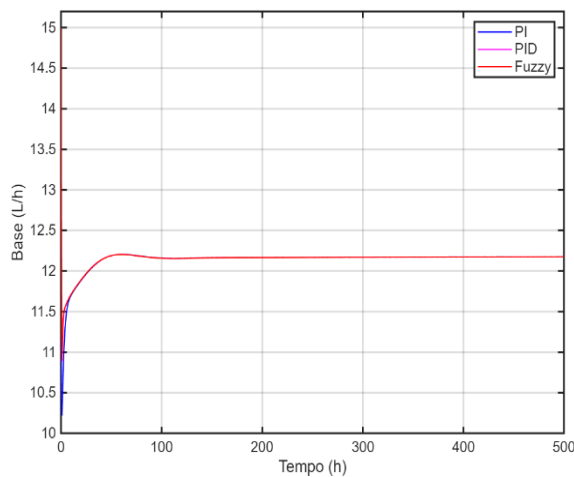


Figura 11: Vazão de NaOH no Cenário 1.

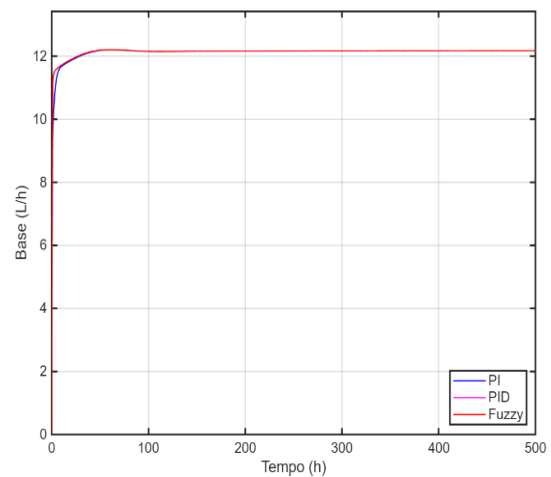


Figura 12: Vazão de NaOH no Cenário 2.

Tabela 1: Comparação dos desempenhos dos controladores PI, PID e Fuzzy-PID nos cenários 1 e 2.

Cenário	Controlador	IAE	ISE	CE (NaOH)	CE (HCl)
1	PI	1,323	0,265	6069,502	0
	PID	0,648	0,163	6074,039	0
	Fuzzy-PID	0,571	0,159	6073,944	0
2	PI	1,192	0,177	6064,370	0
	PID	0,238	0,012	6066,344	7,500
	Fuzzy-PID	0,164	0,007	6066,793	1,943

Por fim, no Cenário 3 os controladores foram submetidos a uma condição crítica mediante a inserção de um ruído branco com magnitude de 0,2 no sinal de medição do pH. Desta forma, a partir da análise da Figura 13, nota-se que as variáveis do sistema apresentaram um padrão de resposta distinto em comparação com os Cenários anteriores. Enquanto nos casos prévios as variáveis apresentaram comportamento ascendente ou descendente antes de se estabilizarem, neste Cenário registraram respostas lineares oscilatórias, particularmente notórias na simulação com o controlador PI.

Este comportamento oscilatório pode ser atribuído principalmente à influência do ruído na medição do pH, que introduziu perturbações na malha de controle. As oscilações observadas demonstram que mesmo variações de pequena amplitude no pH são capazes de gerar impactos cascata em todas as variáveis operacionais do reator enzimático, evidenciando o alto acoplamento dinâmico do sistema e a sensibilidade do processo biológico às condições de pH do meio.

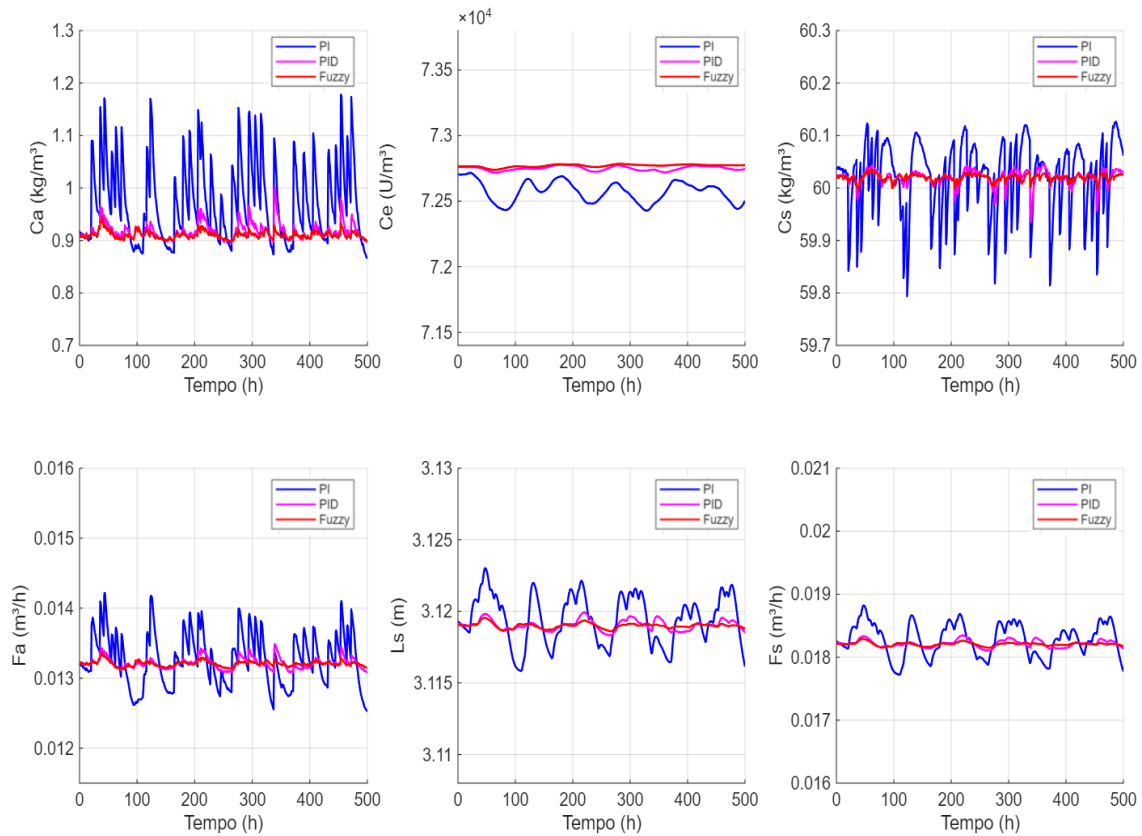


Figura 13: Resposta das variáveis no sacarificador no Cenário 3.

Analisando a Figura 14, é possível notar que o Fuzzy-PID atenuou melhor as flutuações induzidas pelo ruído, quando comparado ao PI e ao PID. Tal observação já havia sido realizada em simulações empregando os mesmos tipos de controladores com Cenário de ruído no sinal de leitura da variável de processo por Fonseca et al. (2013) [25]. Este comportamento pode ser atribuído à capacidade inerente de filtragem de ruído presente na etapa de fuzzificação dos controladores Fuzzy, que apresentou os menores valores de *undershoot* (4,38%) e *overshoot* (7,98%). Esta arquitetura é intrinsecamente projetada para interpretar e processar a imprecisão característica das variáveis de entrada.

Contrariamente ao esperado, o controlador PID demonstrou maior estabilidade (*undershoot* de 4,38% e *overshoot* de 18,05%) comparado ao controlador PI (*undershoot* de 6,70% e *overshoot* de 32,04%). Esta aparente contradição à teoria clássica de controle — que prevê maior sensibilidade da ação derivativa a ruídos — pode ser explicada pela presença de um filtro de ruído integrado à implementação do controlador PID no ambiente de simulação utilizado.

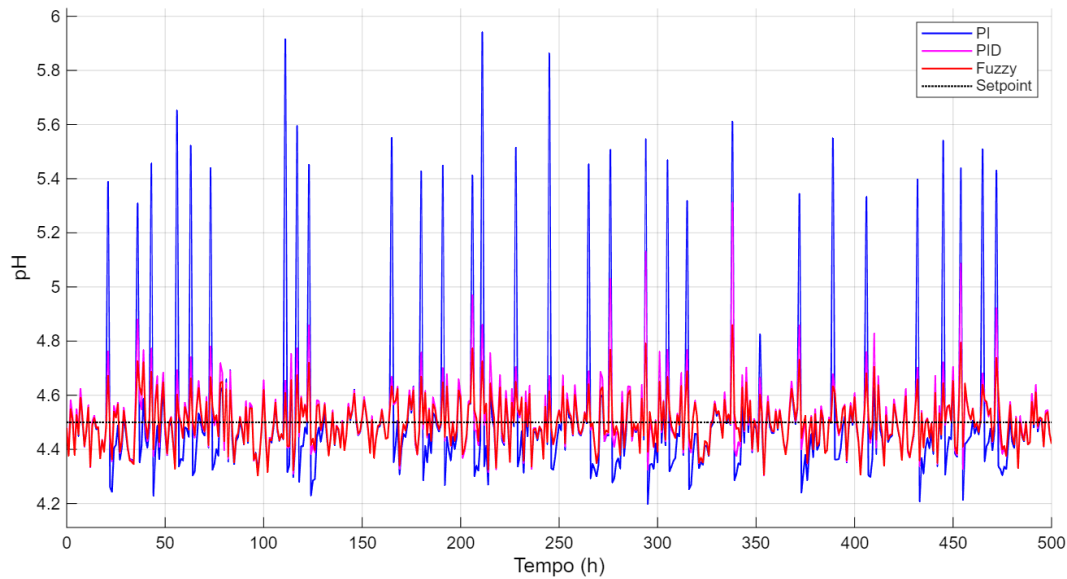


Figura 14: Comparação entre o controlador PI, PID e o Fuzzy-PID na variação do pH ao longo do tempo no Cenário 3.

Essa característica pode introduzir um viés na comparação direta com o controlador PI, já que este não dispõe do mesmo mecanismo de atenuação. Entretanto, tal recurso reflete práticas industriais comuns, nas quais filtros são incorporados para viabilizar o uso da ação derivativa. O controlador Fuzzy-PID, por sua vez, apresenta capacidade intrínseca de filtragem de ruído na etapa de fuzzificação, assegurando condições comparativas realistas e reforçando um dos pontos fortes da lógica Fuzzy.

Adicionalmente, observa-se nas Figuras 15 e 16 que o ruído induziu oscilações de elevada amplitude e persistência nas vazões de NaOH e HCl, respectivamente. Sob essas condições, o controlador PID manteve praticamente constante o fluxo de HCl como variável de atuação, enquanto os demais controladores recorreram predominantemente ao NaOH.

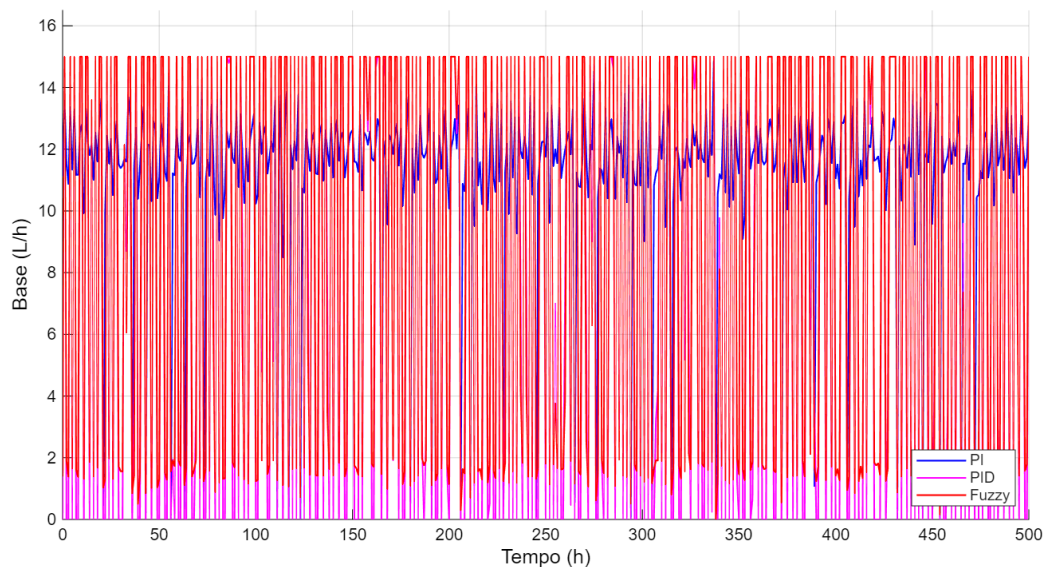


Figura 15: Vazão de NaOH no Cenário 3.

Validando a interpretação gráfica da Figura 15, a Tabela 2 registra redução de aproximadamente 51,12% no IAE e de 89,07% no ISE para o Fuzzy-PID, enquanto o PID apresentou atenuação de 40,62% no IAE e 79,96% no ISE. Em relação ao CE, nota-se uma

significativa vantagem do controlador Fuzzy-PID no esforço geral, que obteve um esforço no atuador de base 27,67% menor em comparação ao PI. No que tange ao esforço empregado no atuador de ácido, o Fuzzy-PID apresentou uma redução de 99,61% em relação ao PI e um esforço 57.395 vezes menor em relação ao PID, o qual apresentou o maior esforço. Essa considerável diferença percentual no CE de HCl é atribuída ao fato dos controladores PI e Fuzzy-PID praticamente não ativarem a solução ácida.

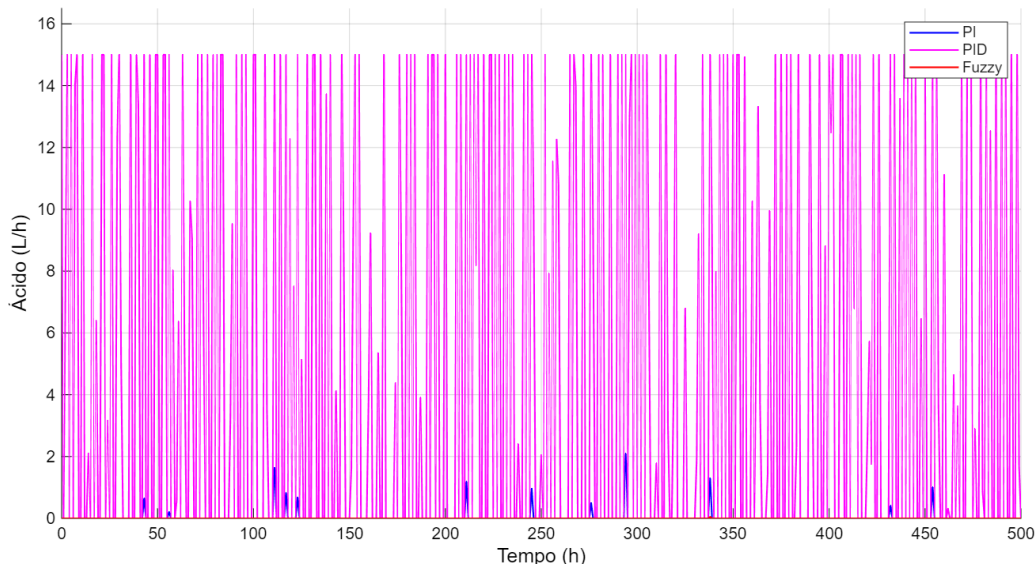


Figura 16: Vazão de HCl no Cenário 3.

Portanto, os resultados demonstram que o controlador que contém a aplicação da lógica *Fuzzy* atuou de forma mais eficiente, caracterizada pela execução de ajustes mais suaves na variável manipulada. Essa estratégia de controle pode promover a minimização do desgaste dos atuadores e a redução do consumo de energia e insumos, enquanto manteve a variável de processo consistentemente próxima ao SP estabelecido, além de evitar picos de erro.

Este desempenho superior reflete maior precisão e estabilidade operacional, evidenciando a capacidade do controlador Fuzzy-PID de compensar perturbações com menor intensidade de ação, sem comprometer a qualidade do controle. Tal resultado é particularmente valioso em contextos industriais, uma vez que combina economia de recursos, redução do estresse mecânico e maior confiabilidade no atendimento às especificações do processo, garantindo um funcionamento mais econômico da operação, características essas já evidenciadas no trabalho de Rathore et al. (2021) [26].

Tabela 3: Comparação dos Desempenhos dos Controladores PI, PID e Fuzzy-PID no Cenário 3.

Cenário	Controle	IAE	ISE	CE (NaOH)	CE (HCl)
Ruído	PI	72,03	37,01	5619,54	11,44
	PID	42,79	7,42	3824,73	2578,33
	Fuzzy-PID	35,12	4,05	4063,93	0,05

Ressalta-se que este estudo apresenta limitações inerentes à simplificação do modelo: não foram considerados (i) perdas térmicas no reator, (ii) decaimento da atividade enzimática (meia-vida da enzima), (iii) reações paralelas no sacarificador (e.g., isomerização, degradação térmica de açúcares, inversão da glicose) [27], os quais representam fatores que impactam no controle do pH e na cinética reacional em cenários reais. Embora tais simplificações possam superestimar os

rendimentos absolutos, a vantagem relativa do Fuzzy-PID mantém validade, como comprovado nos resultados obtidos.

#### 4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados avaliados, conclui-se que o controlador Fuzzy-PID destaca-se pela capacidade de proporcionar respostas mais rápidas, com menor erro acumulado e assegurando estabilidade mesmo sob condições adversas. Embora o controlador PID tenha obtido desempenho satisfatório em situações com perturbações leves, sua eficácia diminui em ambientes mais desafiadores, como aqueles com presença significativa de ruído — uma condição comum no setor industrial — que pode resultar em instabilidade.

Os melhores valores dos índices IAE e ISE reforçam o potencial do Fuzzy-PID como estratégia eficiente para o controle de processos biotecnológicos não lineares, sujeitos a incertezas e flutuações operacionais, apresentando o menor tempo de acomodação para atingir o *setpoint* e a capacidade de manter a estabilidade do processo, como utilizando o mesmo esforço dos outros controladores avaliados em cenários com pequenas perturbações. Além disso, a capacidade do controlador Fuzzy-PID de compensar perturbações ruidosas com menor intensidade de ação e sem comprometer a qualidade do controle, conferem benefícios qualitativos importantes. Portanto, o uso de lógica Fuzzy mostra-se promissor para o controle do pH na sacarificação do bioetanol de amido de batata.

Para trabalhos futuros, recomenda-se estender esta aplicação a sistemas multivariáveis e explorar algoritmos de ajuste adaptativo dos conjuntos Fuzzy. Essas melhorias podem potencializar sua aplicação, tanto em termos de produção de bioetanol como na garantia de maior robustez para este sistema de controle.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro à pesquisa.

#### 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Zaky AS, French CE, Tucker GA, Du C. Improving the productivity of bioethanol production using marine yeast and sea water-based media. *Biomass Bioenergy*. 2020 Aug;139:105615
2. REN21. Renewables 2024. Global status report. Global overview [Internet]; 2024 [citado 11 mar 2025]. Disponível em: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2024\\_GlobalOverview\\_Full\\_Report\\_with\\_endnotes\\_web.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2024_GlobalOverview_Full_Report_with_endnotes_web.pdf).
3. Ma Y, Wang XR, Li T, Zhang J, Gao J, Sun ZY. Hydrogen and ethanol: Production, storage, and transportation. *Int J Hydrogen Energy*. 2021 Aug; 46(54):27330-48. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.03.182
4. IPCC. Climate change 2023: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)] [Internet]. Geneva (CH): IPCC; 2023 [citado 2023 set 24]. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/longer-report>.
5. IEA [Internet]. Tracking clean energy progress 2023; 2023 [citado 2023 set 24]. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>.
6. Periyasamy S, Beula Isabel J, Kavitha S, Karthik V, Mohamed BA, Gizaw DG, et al. Recent advances in consolidated bioprocessing for conversion of lignocellulosic biomass into bioethanol – A review. *Chem Eng J*. 2023 Feb;453:139783. doi: 10.1016/j.cej.2022.139783
7. Renewable Fuel Association (RFA). 2025 pocket guide final RFA. Washington (DC): RFA; 2025. Disponível em: <https://ethanolrfa.org/file/2913/2025%20Pocket%20Guide.pdf>.
8. Xie S, Liu H, Wang Y, Zhang C, Li Y, Wang Z, et al. Bioethanol to jet fuel: Current status, challenges, and perspectives. *Renew Sustain Energy Rev*. 2024;192:114240. doi: 10.1016/j.rser.2023.114240
9. Niu L, Liu L, Zhang J, Scali M, Wang W, Hu X, et al. Genetic engineering of starch biosynthesis in maize seeds for efficient enzymatic digestion of starch during bioethanol production. *Int J Mol Sci*. 2023 Feb 15;24(4):3927. doi: 10.3390/ijms24043927

10. Rauf AR, Marimin M, Nurhayati P, Suprehatin S. Food loss and waste in potato supply chains: a systematic literature review and framework development approach. IOP Conf Ser Earth Environ Sci. 2024 Dec;1417(1):012023.
11. Muller TA, Spinosa WA, Resende JTV, Constantino LV, Guerra EP, Wrobel LDL, et al. Produção de etanol de batata refugo via processo fermentativo: uma proposta para a destinação adequada de resíduos orgânicos de amiláceas. In: Fontes de biomassa e potenciais de uso. [s.l.]: Atena Editora; 2019. p. 67-73.
12. Mironescu M, Ropciuc S, Gutt G, Mironescu I, Gutt G. Influence of the liquefied starch composition and pH on the saccharification at the obtaining of maltose syrup. Bull Univ Agric Sci Vet Med Cluj-Napoca Agric. 2009;66(2):364-9.
13. Oliveira AF, Santos FR, Fonseca RR. Fuzzy logic based plantwide control applied to ethanol production from potato starch. J Eng Exact Sci. 2022 Jan 20;8(1):1-16. doi: 10.18540/jcecvl8iss1pp12596-01
14. Mohammadzadeh A, Sabzalian MH, Zhang C, Castillo O, Sakthivel R, El-Sousy FFM. An introduction to Fuzzy and Fuzzy control systems. In: Modern adaptive Fuzzycontrol systems. Cham: Springer; 2023. p. 1-3. doi: 10.1007/978-3-031-17393-6\_1
15. Nagy ZK. Model based control of a yeast fermentation bioreactor using optimally designed artificial neural networks. Chem Eng J. 2007;127(1-3):95-109.
16. Fonseca RR, Sencio RR, Franco IC, da Silva FV. An adaptive fuzzy feedforward-feedback control system applied to a saccharification process. Chem Prod Process Model. 2018;13(4):20180014.
17. Petrucci RH, Herring FG, Madura JD, Bissonette C. General chemistry: principles and modern applications. 12th ed. London: Pearson; 2022.
18. Cardona CA, Sanchez OJ, Gutierrez LF. Process synthesis for fuel ethanol production. Boca Raton (US): CRC Press; 2010.
19. Gemmecker Y, Winiarska A, Hege D, Kahnt J, Seubert A, Szaleniec M, Heider J. A pH-dependent shift of redox cofactor specificity in a benzylalcoholdehydrogenase of *Aromatoleum aromaticum* EbN1. Appl Microbiol Biotechnol. 2024;108(1):410.
20. Ziegler JG, Nichols NB. Optimum settings for automatic controllers. Trans ASME. 1942 Nov;64(8):759-65.
21. Kovacic Z, Bogdan S. Fuzzy controller design: theory and applications. Boca Raton (US): CRC Press; 2018.
22. The MathWorks, Inc. Fuzzy PID Controller [Internet]. Natick (MA): The MathWorks, Inc.; 2025 [citado 11 jul 2025]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/Fuzzy/Fuzzypidcontroller.html>.
23. Ying H. Fuzzy control and modeling: analytical foundations and applications. New York (US): IEEE Press; 2000. (IEEE Press Series in Biomedical Engineering).
24. Seborg DE, Edgar TF, Mellichamp DA. Process Dynamics and Control. 4th ed. New York (US): John Wiley & Sons; 2016.
25. Fonseca RR, Schmitz, JE, Fileti AMF, da Silva FV. A fuzzy-split range control system Applied to a fermentation process. Bioresour Technol. 2013;142:475-82.
26. Rathore AS, Mishra S, Nikita S, Priyanka P. Bioprocess control: current progress and future perspectives. Life. 2021;11(6):557. doi: 10.3390/life11060557
27. Pacheco TF, Mendes TD. Guia prático para caracterização de enzimas. Brasília (DF): Embrapa Agroenergia; 2021. (Documentos / Embrapa Agroenergia, 35). Disponível em: <https://www.Guia-pra769tico-para-a-caracterizac807a771o-de-enzimas.pdf>.