

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE UM CONTROLADOR PID APLICADO AO REATOR CSTR USANDO EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2023.4165

Marcos Antônio Leandro - marcos352354@gmail.com
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Mateus Henrique da Costa - mateushcosta@yahoo.com.br
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Resumo: Determinar os melhores ajustes de controle para problemas de natureza multiobjetiva é um dos motivos para o desenvolvimento de métodos de busca via computação evolutiva. Este estudo apresenta uma ferramenta computacional, que busca os melhores ajustes dos parâmetros de um controlador proporcional integral e derivativo para a planta do reator químico Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR). Neste estudo são considerados três pontos de operação, e são aplicados degraus de temperatura como entrada para o sistema. O algoritmo evolução diferencial é usado para determinar os parâmetros do controlador, penalizando os indivíduos que não satisfaçam os objetivos do problema. Os três parâmetros de controle ganhos proporcional, integral e derivativo serão as variáveis de otimização. O tempo de subida, tempo de acomodação, erro em regime permanente e sobressinal serão usados como parâmetros de desempenho.

Palavras-chave: Evolução Diferencial, CSTR, Controle PID

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE UM CONTROLADOR PID APLICADO AO REATOR CSTR USANDO EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

1 INTRODUÇÃO

Os reatores das indústrias químicas são fundamentais em diversos tipos de processos e reações. O *Continuous Stirred Tank Reactor* (CSTR) é amplamente utilizado no processo químico industrial (ASSIS, 2021). As reações precisam ser controladas em condições específicas, um dos parâmetros a serem controlados é a temperatura. De acordo com BARUAH e DEWAN (2017) a temperatura é o critério de controle mais importante para a operação segura e confiável da planta, uma pequena variação pode ser prejudicial a toda reação. No entanto, o sistema é não linear e sujeito a perturbações, deste modo, o reator precisa ser rigorosamente controlado (DEULKAR e HANWATE, 2020). Segundo OGATA (2010, p. 521) o controlador mais utilizado nas indústrias é o controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) devido sua simplicidade e robustez.

Infelizmente há uma grande dificuldade de encontrar os ganhos do controlador PID utilizando métodos clássicos, por esta razão vem sendo muito utilizado algoritmo de otimização (KHANDUJA E BHUSHAN, 2021). Na literatura é possível encontrar vários trabalhos relacionados a empregabilidade dos algoritmos evolutivos para otimizar os parâmetros do controlador PID aplicado ao reator CSTR, como exemplo em COSTA et al. (2010) que utiliza o algoritmo genético e em BARUAH e DEWAN (2017), fazem uma comparação entre os algoritmos genético (AG), otimização por enxame de partículas (PSO) e método clássico Ziegler-Nichols (ZN). Neste caso, os algoritmos de otimização apresentaram resultados mais satisfatórios em comparação com o método clássico.

O objetivo deste trabalho é a sintonia do controlador PID aplicado a uma planta de um reator químico CSTR, os três parâmetros do controlador são as variáveis de otimização que é feita através do algoritmo de evolução diferencial (ED). O algoritmo é usado para determinar os parâmetros do controlador, penalizando os indivíduos que não satisfaçam os objetivos do problema. O tempo de subida, tempo de acomodação, erro em regime permanente e sobressinal são usados como parâmetros de desempenho da planta.

O algoritmo de ED, foi desenvolvido por STORN e PRICE (1997), trata-se de um método de busca direta estocástica que surgiu de tentativas de resolver o problema de ajuste polinomial de Chebychev. Kenneth Price introduziu a ideia de usar diferenças de vetores para perturbar a população de vetores (indivíduos) resultando em um método que requer poucas variáveis de controle, é de rápida convergência, fácil de usar e robusto (OLIVEIRA, 2006).

Após a introdução na seção 1, a seção 2 apresenta o processo do reator CSTR e a implementação no *SIMULINK*, a seção 3 faz uma breve apresentação do controlador PID, a seção 4 discute sobre o algoritmo de evolução diferencial, a seção 5 mostra a estrutura do algoritmo utilizada neste artigo. A seção 6 esboça os resultados e, finalmente, na seção 7 é apresentada a conclusão seguida das referências.

2 O PROCESSO CSTR

A planta utilizada neste estudo é um processo químico CSTR, diabático, não linear, com uma reação irreversível de primeira ordem exotérmico. Este processo tem um

comportamento dinâmico em malha aberta muito variável devido à sensibilidade paramétrica, possui vários pontos de operação, e oscilações sustentadas. O equilíbrio de massa e energia gera as equações para o problema, na forma adimensional (RUSSO, 1996).

$$\frac{d}{d\tau} x_1 = -\varphi x_1 k(x_2) + q(x_{1f} - x_1) \quad (1)$$

$$\frac{d}{d\tau} x_2 = \beta \varphi x_1 k(x_2) - (q + \delta)x_2 + \delta m + q x_{2f} \quad (2)$$

$$k(x_2) = \exp\left(\frac{x_2}{1 + \frac{x_2}{\gamma}}\right) \quad (3)$$

Onde X_1 é a concentração, X_2 é a temperatura (variável controlada), e m é a temperatura do invólucro de resfriamento (variável manipulada). $k(x_2)$ é uma função e os valores dos parâmetros são apresentados na Tabela 1. Todas as variáveis e a função $k(x_2)$ são apresentados como adimensionais.

Tabela 1 – Valores dos parâmetros para o processo.

β	θ	δ	γ	q	x_1	x_2
8,0	0,072	0,3	20,0	1,0	10	10

Fonte: Costa et al., (2010).

A Tabela 2 traz os valores das variáveis x_1 e x_2 em regime estacionário. Para os parâmetros dados na Tabela 1, o processo exibe três pontos de operação sendo que o segundo é instável.

Tabela 2 – Pontos de operação.

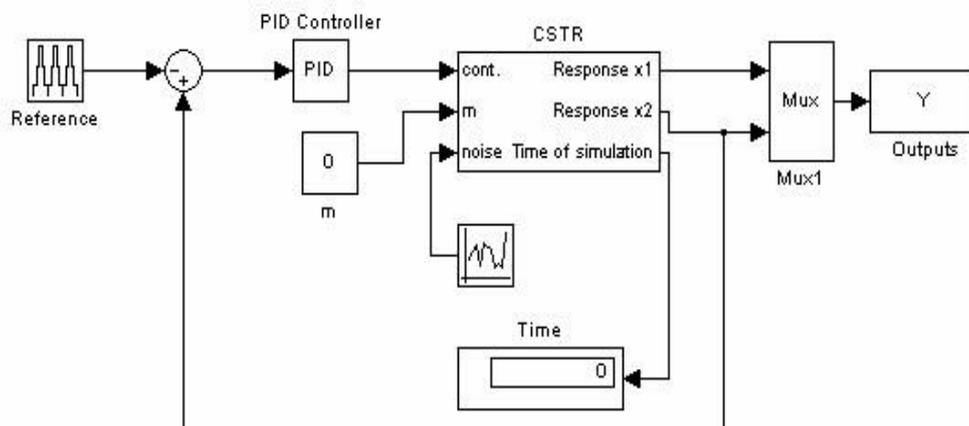
	1º	2º	3º
x_1	0,8560	0,5528	0,2354
x_2	0,8859	2,7517	4,7050
m	0	0	0

Fonte: Costa et al., (2010).

Baseando na dinâmica e nas equações que modelam este sistema, THOMAZ e SILVA (2000) implementaram um modelo em malha aberta utilizando o software *SIMULINK* do MATLAB™. Neste modelo, a variável controlada (temperatura) foi realimentada e, as características do sistema em malha fechada sem controlador foram obtidas. No sistema realimentado foi inserido um bloco controlador que na Figura 1 é representado por um PID.

Para este sistema o objetivo a ser atingido é o menor erro em regime permanente (e_{rp}) possível, e as restrições impostas ao problema: sobressinal (M_p) não deve ultrapassar 15%, o tempo de subida (t_s) e o tempo de acomodação (t_a) não devem ser maiores que 50 ms e 500 ms, respectivamente.

Figura 1 – Modelo do CSTR em malha fechada com controlador PID.



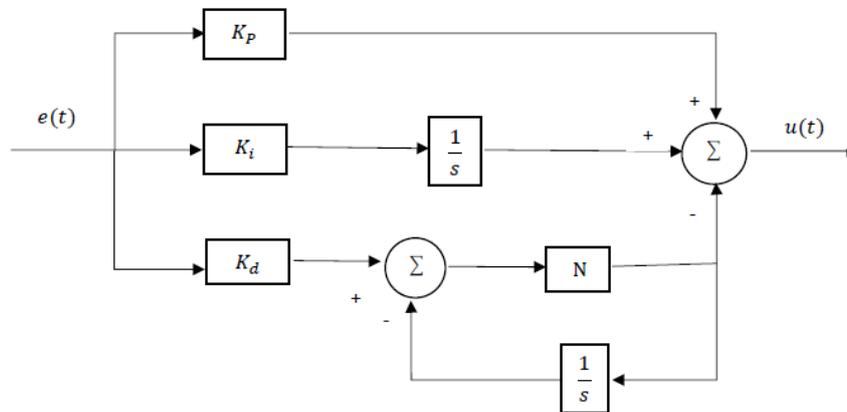
Fonte: Elaborado pelos autores.

3 CONTROLE PID

Em um sistema de controle PID, existem três parâmetros a serem determinados: ganho proporcional (K_p), ganho integral (K_i) e ganho derivativo (K_d). Essas componentes podem ser usadas tanto sozinhas, como combinadas entre si e também simultaneamente.

O parâmetro ganho proporcional atua no sistema de forma a reduzir o erro em regime permanente. Porém um aumento muito grande na constante proporcional pode aumentar as oscilações da resposta transitória. Na existência de erro em regime permanente, o ganho integral atua na tentativa de eliminá-lo. O ganho derivativo tem caráter antecipativo e pelo valor instantâneo da variável controlada prediz a ocorrência de um sobressinal e gera uma ação contrária para que este sobressinal não ocorra (COSTA et al., 2010). Na Figura 3 é apresentado um modelo de um controlador PID.

Figura 3 – Detalhes do controlador PID.



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2014).

4 ALGORITMO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

Em um algoritmo ED, inicialmente é criada uma população aleatória com NP indivíduos em forma de vetores com D dimensões, cobrindo toda uma região de busca já estabelecida. Em seguida a população inicial é modificada a cada interação criando novas populações. A nova população pode sofrer mutação, cruzamento e seleção, que são operadores na ED. Em cada geração estes indivíduos são testados usando simulações da planta do processo químico e classificados de acordo com seu desempenho, dado pela função de custo. O critério de parada pode ser tanto um número máximo de interações ou um erro mínimo a ser atingido.

Na mutação a população é modificada através da adição da diferença vetorial ponderada ($X_\beta^{(q)} - X_\gamma^{(q)}$), que é multiplicada pelo fator F que controla a amplitude do vetor diferença, onde são gerados os vetores doadores $V^{(q+1)}$. Sendo X_α , X_β e X_γ indivíduos distintos escolhidos aleatoriamente entre a população atual com NP indivíduos. Vale ressaltar que a população deve ser igual ou superior a 4 para garantir uma quantidade suficiente de indivíduos na execução do método (LAZZAROTTO et al., 2007). O processo de mutação pode ser escrito da seguinte forma:

$$V^{(q+1)} = X_\alpha^q + F_p(X_\beta^{(q)} - X_\gamma^{(q)}) \quad (4)$$

Onde:

- α , β , e γ devem ser inteiros, distintos entre si, e pertencer ao intervalo $\{1, \dots, N_p\}$.
- F_p é um número real, positivo pertencente ao intervalo $[0, 2]$, e deve ser fornecido pelo usuário.

O operador de cruzamento é introduzido utilizando a componente do vetor doador e do vetor alvo (X), para aumentar a diversidade dos indivíduos que sofreram a mutação. Os componentes do vetor experimental $u^{(q+1)}$ são formados pela seguinte comparação:

$$u_i^{(q+1)} = V_i^{(q+1)}, \text{ se } r_i \leq CR \quad (5)$$

$$u_i^{(q+1)} = X_i^q, \text{ se } r_i \leq CR, i = 1, \dots, n \quad (6)$$

Onde:

- r_i é um número aleatório no intervalo $[0,1]$.
 - X_i as componentes do vetor alvo e CR a probabilidade de o cruzamento ocorrer.
 - CR é compreendido no intervalo $[0,1]$, e deve ser fornecido pelo usuário.
- O método de cruzamento pode ser binomial ou exponencial (STORN e PRICE, 1997).

O operador de cruzamento consiste em determinar os indivíduos que farão parte da próxima geração, onde são realizados testes sobre a população criada. Na condição que $X < u^{(q+1)}$, o vetor alvo avança para a próxima geração. Caso $X > u^{(q+1)}$, o vetor experimental avança para a próxima geração. Vale ressaltar que a comparação é feita através do custo de cada vetor (LAZZAROTTO et al., 2007).

As estratégias da ED podem ser modificadas alterando a forma de obtenção dos operadores de mutação e cruzamento. Sua notação é ED/i/j/k, onde:

i - Especifica o vetor (X_α) a ser perturbado, se o vetor da população for escolhido aleatoriamente, então é representado por "rand", ou se admitiu o vetor de menor custo da população, então é representado por "best";

j - Determina o número de vetores de diferença usados para a perturbação de X_α na obtenção do vetor doador;

k - Determine o tipo de cruzamento, onde que *exp* é exponencial e *bin* é binomial.

5 ESTRUTURA DO ALGORITMO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

Neste estudo o objetivo é encontrar os melhores ajustes dos ganhos proporcional, integral e derivativo do controlador PID usando o algoritmo de ED. O modelo não linear do CSTR em *SIMULINK* (Figura 2) é utilizado na obtenção dos parâmetros considerados na função objetivo. O cromossomo para o controlador PID é dividido em Três seções, cada uma correspondendo a um parâmetro deste controlador. Na Tabela 3, são mostrados os limites dos parâmetros do controlador PID.

Tabela 3 – Pontos de operação do CSTR.

	Limite inferior	Limite superior
K_p	0,1	150
K_i	0	120
K_d	0	40

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os parâmetros dos controladores foram representados em código Binário, com: 32 alelos por variável a ser otimizada. O algoritmo adotado é o DE/rand/1/bin com 15 indivíduos, 30 gerações e probabilidade de cruzamento de 90%. As respostas do sistema foram avaliadas para entradas em degrau entre os pontos de operação. O primeiro ponto de operação varia de 0 a 0,8859°C, o segundo ponto de operação é um degrau de 0,8859 a 2,7517°C e o terceiro ponto de operação é um degrau de 2,7517 a 4,7050°C. O modelo gerado no *SIMULINK* permite a avaliação de todas as especificações de desempenho desejadas.

O algoritmo é guiado por uma função de custo cujo objetivo é a minimização do erro em regime permanente, adicionado a uma penalidade mais rigorosa pela violação das especificações de tempo de subida, tempo de acomodação e sobressinal, como segue:

Minimizar: erro em regime permanente + penalidade pela violação das restrições

*Penalidade para sobressinal: se acima do valor máximo: penalidade = $1000 * (\text{limite atual})$ ou: penalidade = 0*

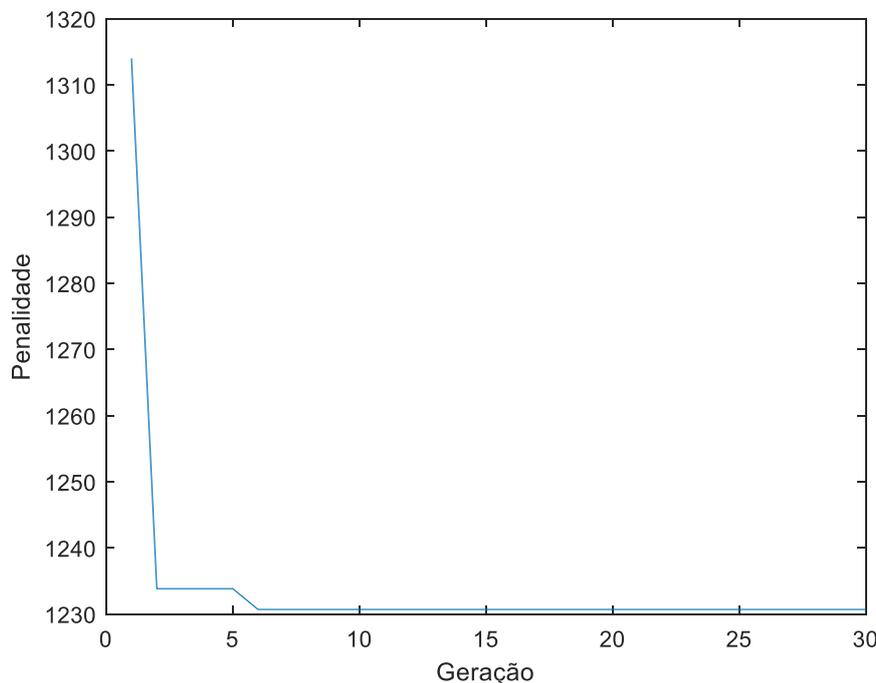
*Penalidade para tempo de acomodação: se acima do valor máximo: penalidade = $250 * (\text{limite atual})$ ou: penalidade = 0*

*Penalidade para tempo de subida: se acima do valor máximo: penalidade = $5000 * (\text{limite atual})$ ou: penalidade = 0.*

6 RESULTADOS

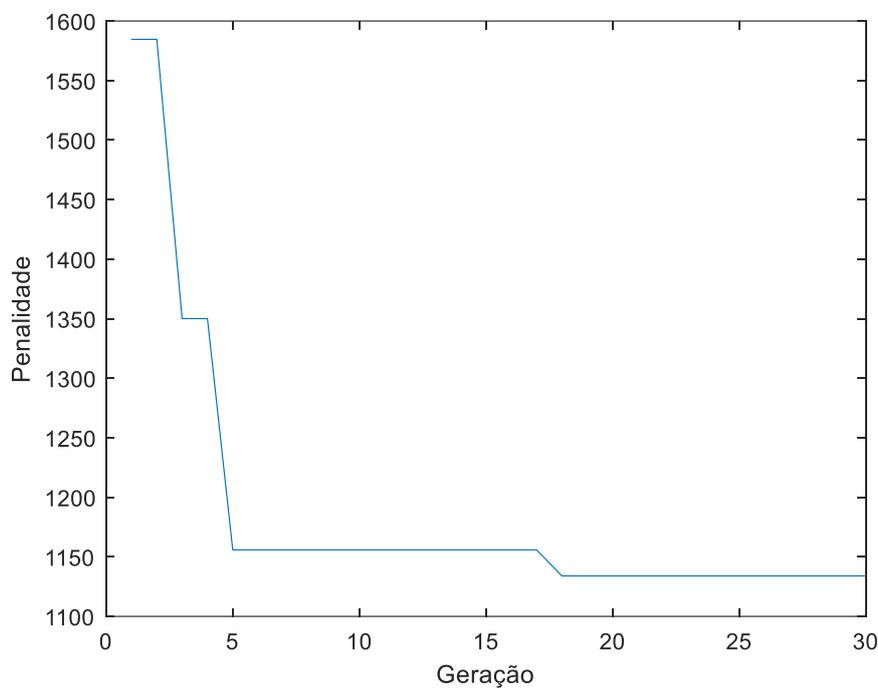
O sistema foi simulado para entradas em degrau entre os pontos de operação e, no algoritmo, foi selecionada a melhor solução de cada geração até atingir o número máximo de gerações estipuladas, que no caso foram 30. As Figuras 4 - 6 mostram a convergência da função objetivo para os três pontos de operação; sendo a Figura 4 a convergência para um degrau entre zero e o primeiro ponto de operação, a Figura 5 para um degrau entre o primeiro e o segundo pontos de operação e a Figura 6 para um degrau entre o segundo e o terceiro pontos de operação. Estas soluções apresentaram características de desempenho semelhantes.

Figura 4 – Convergência para o primeiro ponto de operação.



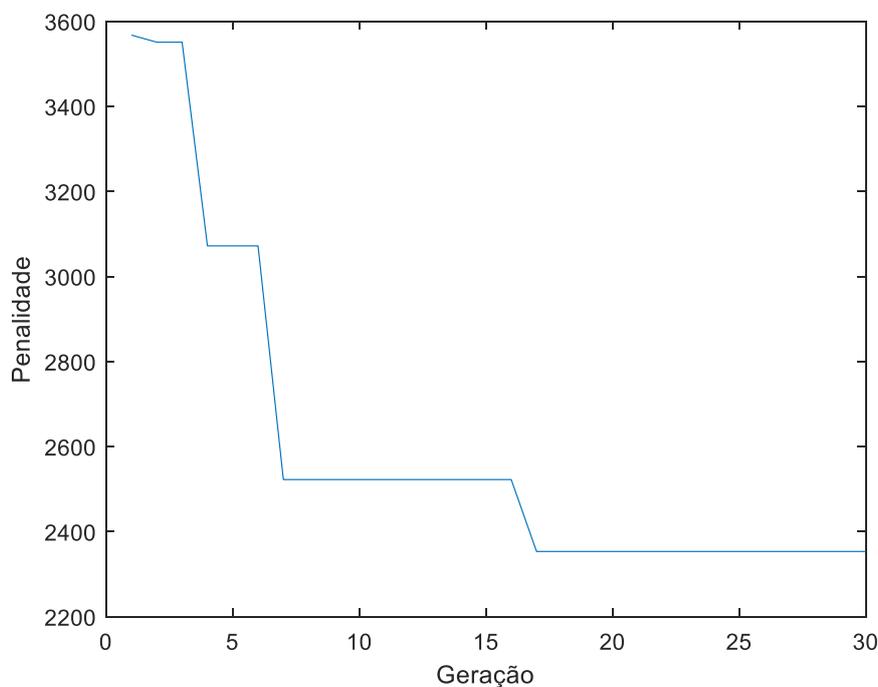
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 5 – Convergência para o segundo ponto de operação.



Fonte: Elaborado pelos autores.

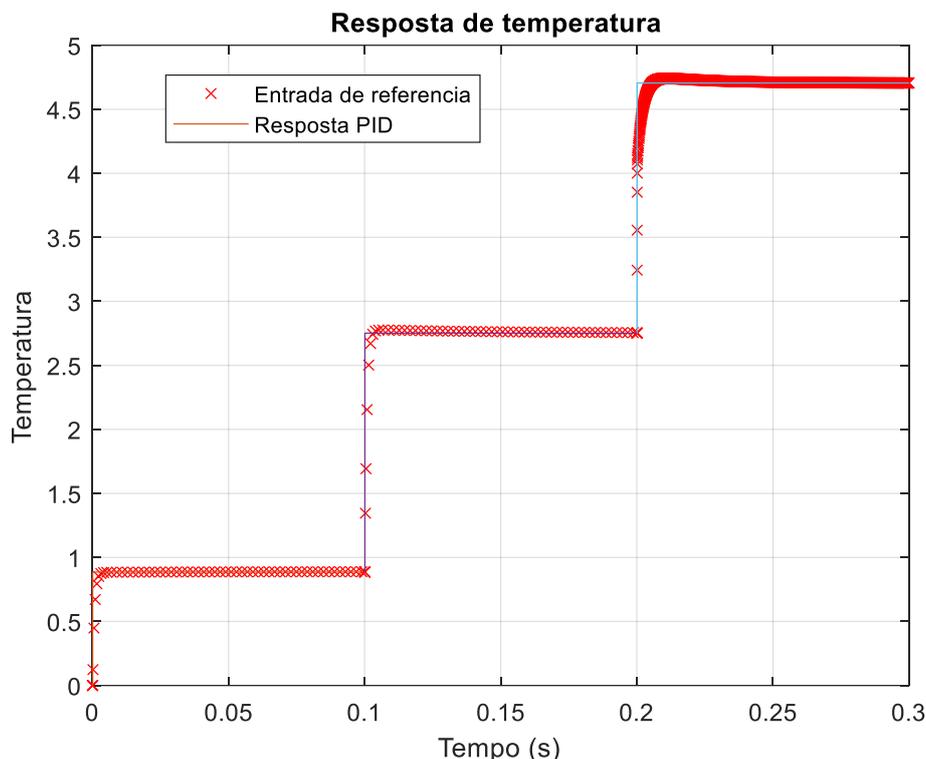
Figura 6 – Convergência para o terceiro ponto de operação.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 7 mostra a resposta da temperatura para os melhores ajustes do controlador encontrados pelo algoritmo de otimização aplicados nos degraus entre os três pontos de operação do processo CSTR.

Figura 7 – Resposta da temperatura para os três pontos de operações.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Na Tabela 4 são apresentados os melhores ajustes do controlador e os valores das variáveis de desempenho usadas pelo algoritmo para buscar a melhor solução do problema.

Tabela 4 – Variáveis de desempenho nos três pontos de operação.

Ponto de operação	1º	2º	3º
K_p	150	141.2810	150
K_i	140	140	0
K_d	0	0	1.9897
Erro em regime permanente	0,0868	0,1477	0.1464
Sobressinal	0	0.0017	0,0022
Tempo de subida	0,0010	0,0010	0,0010
Tempo de acomodação	0,1573	0,1028	0.0865

Fonte: Elaborado pelos autores.

Pela tabela é possível notar que os objetivos estabelecidos pelos critérios de desempenho foram alcançados, ou seja, um erro em regime permanente relativamente pequeno, tempo de subida e acomodação dentro dos limites estipulados (menores que 50

ms e 500 ms, respectivamente) e sobressinal menor que 15% para todos os pontos de operação.

7 CONCLUSÃO

O uso de ferramentas computacionais para o ajuste dos parâmetros de controladores é essencial para obter boas respostas das variáveis de controle em problemas complexos. A ED se mostra aqui, uma poderosa ferramenta na determinação e otimização dos parâmetros dos controladores devido a sua facilidade de implementação e robustez no tratamento do espaço de busca.

Neste trabalho, o sistema utilizado é não linear e instável em um de seus pontos de operação. A escolha da estratégia de controle PID é feita pela sua simplicidade de implementação e grande empregabilidade na indústria.

Observando as respostas obtidas nos três pontos de operação, é possível concluir que as especificações de desempenho foram atendidas. A escolha dos ajustes das variáveis de controle que melhor atendeu às especificações de desempenho do processo foi realizada com sucesso pela função de penalização.

AGRADECIMENTOS

Ao programa institucional de iniciação científica voluntária (PICV) do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais pela oportunidade, e ao professor Dr. Mateus Henrique Costa pela orientação.

REFERÊNCIAS

ASSIS, Luiz Gustavo de. **PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM UM REATOR INDUSTRIAL QUÍMICO**. 2021. Monografia – Curso de Engenharia Mecânica. Universidade de Taubaté, São Paulo, 2021.

BARUAH, Swapnadeep; DEWAN, Lillie. A comparative study of PID based temperature control of CSTR using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization. In: **2017 International conference on emerging trends in computing and communication technologies (ICETCCT)**. IEEE, 2017. p. 1-6.

COSTA, Mateus H.; SILVA, Valceres VR; CANDÉ, Samba. Seleção da Estratégia de Controle através da Otimização On-Line de Parametros para um Sistema Não Linear. **Mecânica Computacional**, v. 29, n. 94, p. 9193-9203, 2010.

DEULKAR, Pratyush; HANWATE, Sandeep. Analysis of PSO-PID controller for CSTR temperature control. In: **2020 IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC)**. IEEE, 2020. p. 1-6.

KHANDUJA, Neha; BHUSHAN, Bharat. Optimal design of FOPID Controller for the control of CSTR by using a novel hybrid metaheuristic algorithm. **Sādhanā**, v. 46, n. 2, p. 104, 2021.

LAZZAROTTO, Patrick; DELGADO, Myriam; MUNARETTO, Anelise. Otimização em Redes de Sensores utilizando Evolução Diferencial para determinação de Clusters-heads. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES, XXV**, p. 1-6, 2007.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2010. 809 p.

OLIVEIRA, Giovana Trindade da silva. **Estudo e aplicação da evolução diferencial**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2006.

RUSSO JR, Louis Peter. **Bifurcation behavior of an exothermic CSTR**. Rensselaer Polytechnic Institute, 1996

SILVA, CAIO E.; VR, VALCERES; SILVA, LANE MR BACCARINI. **CONTROLADOR PID SINTONIZADO POR ALGORITMO GENÉTICO GUIADO POR OTIMIZAÇÃO COLABORATIVA**, 2014.

STORN, Rainer; PRICE, Kenneth. Differential evolution-a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. **Journal of global optimization**, v. 11, n. 4, p. 341, 1997.

Thomaz, V.O. e Silva, V.V.R., (2000). **Projeto de um controlador para um processo químico não linear**. Anais do VIII Seminário de Iniciação Científica, pp. 69

**INSTRUCTIONS FOR PREPARATION AND SUBMISSION OF MANUSCRIPTS TO THE
SCIENTIFIC COMMITTEE OF THE 51º BRAZILIAN CONGRESS ON ENGINEERING
EDUCATION AND VI INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON EDUCATION IN
ENGINEERING – COBENGE 2023**

Abstract: *Determining the best control settings for problems of a multi-objective nature is one of the reasons for the development of search methods via evolutionary computation. This study presents a computational tool that seeks the best parameter adjustments of a Proportional integral-derivative controller for the Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) chemical reactor plant. In this study, three operating points are considered, and temperature steps are applied as input to the system. The Differential Evolution Algorithm is used to determine the controller parameters, penalizing the individuals that do not satisfy the problem objectives. The three control parameters proportional, integral and derivative Gains will be the optimization variables. Rise time, settling time, steady-state error and overshoot are used as performance parameters.*

Keywords: *Differential evolution, CSTR, PID control.*