



Otimização de controle PID utilizando algoritmos genéticos

Arlei Fonseca Barcelos
arlei@csn.com.br
AEDB

Renan Silva Lopes
renansilvalopes@gmail.com
AEDB

Resumo: O método de Ziegler-Nichols proporcionou uma nova visão de controle automático de processos, pois permitiu solucionar diversos problemas de ajustes dos parâmetros (k_p , k_i , k_d), empregando uma metodologia relativamente simples e eficaz, aplicada em diversos processos industriais até hoje. No entanto, tal método exige percepção e conhecimento da malha do sistema a ser controlado, visto que se baseia na tentativa e erro, tornando os parâmetros de ajustes mais complexos e em alguns casos não garante os melhores resultados. Desta forma, o presente estudo teve como objetivo desenvolver por meio do método de inteligência artificial com algoritmos genéticos, otimizadores que buscam a melhor função para controlar o sistema. Neste segmento foi utilizado ferramentas para determinar de modo matemático as melhores aproximações para solução de qualquer erro, visando encontrar parâmetros ótimos para o sistema controlado.

Palavras Chave: Controle - Algoritmos Genéticos - Parâmetros Ótimos - -



1. INTRODUÇÃO

Uma crescente evolução da indústria, no que se refere à área de processos industriais automatizados, começou a surgir um mercado cada vez mais exigente e competitivo, obrigando uma produção cada vez mais independente de trabalho manual. Esta nova concepção alcançou excelentes resultados, quando no século XX, iniciaram-se de fato os estudos e aplicações de controle automático à indústria. Após este avanço da ciência e da tecnologia, os estudos foram investigados com mais dedicação, o que culminou no desenvolvimento de um método de ajuste altamente eficiente, que ficou conhecido como Método de Ziegler-Nichols.

No entanto, o método de controle PID frequentemente utilizado nos processos industriais possui resultados eficientes desde que seja realizado de forma criteriosa, pois o mesmo exige percepção e conhecimento da malha do sistema a ser controlada pelo projetista. “Os métodos heurísticos de sintonia dos controladores PID são métodos empíricos, baseados na experiência acumulada dos operadores. Estas metodologias, na realidade, constituem um conjunto de regras práticas que auxiliam a busca por uma solução aproximada para o problema de sintonia dos controladores” (ZIEGLER e NICHOLS, 1942).

O método de inteligência artificial utilizando AG (Algoritmos Genéticos) funciona como uma forma de otimização do sistema, que busca a melhor função para o controle do mesmo. “Verifica-se que a sintonia pelo AG possui desempenho superior ao da sintonia do PID pelo método heurístico, não proporcionando nenhuma sobre-elevação e tempo de estabilização menor” (NETO e GOMES, 2010).

Para LIMA (2014), o processo segue da seguinte forma:

- 1) Inicializa-se a população de indivíduos;
- 2) Avalia-se cada indivíduo na população;
- 3) Selecionam-se os melhores pais para gerar novos indivíduos, aplicando-se os operadores de recombinação e mutação a estes pais de forma a gerar os indivíduos da nova geração;
- 4) Apagam-se os velhos membros da população;
- 5) Se o tempo acabou, ou os melhores indivíduos satisfaz os requerimentos da solução do problema, retorne-o, caso contrário volta-se para o passo 3.

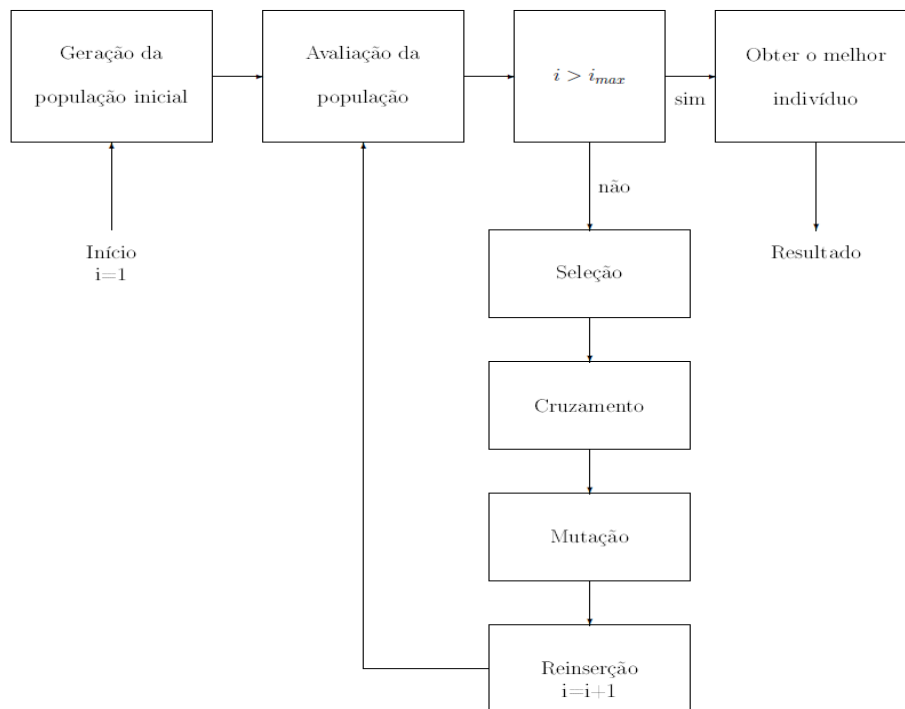


Figura 1: Diagrama de fluxo do AG. Fonte: NOGUEIRA (2006)

Com base no estudo de algoritmos genéticos, onde sua implementação proporciona de modo matemático, melhores aproximações para a solução de qualquer erro, serão realizados testes através de um método com algoritmo genético, utilizando o MATLAB® como ferramenta computacional para a realização das simulações, com uso do aplicativo Optimization Tool. Através desta aplicação, será possível encontrar parâmetros ótimos que se basearão na função objetivo ou fitness function, que é a função na qual a otimização é pretendida. A priori, a base do projeto está totalmente voltada na busca pelo indivíduo que melhor se adaptará a função objetivo ou fitness function, que irá minimizar o erro no tempo. Depois de manipuladas as equações e encontrada a função objetivo, serão inseridos os dados no aplicativo Optimization Tool e, para comprovar a estabilidade ou instabilidade do sistema.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi utilizado um método de ajuste dos parâmetros de controladores PID. Tal ajuste tem caráter automático e será baseado na minimização de uma função da Integral do Erro Absoluto multiplicado pelo tempo (ITAE – Integral of Time multiplied by Absolute Error). A minimização será realizada através da aplicação dos Algoritmos Genéticos utilizando o MATLAB® e a ferramenta Optimization Tool.

Os algoritmos genéticos são utilizados para resolução de problemas de otimização. Logo, há a necessidade da criação de uma função de custo ou função fitness, que é a função que será testada o indivíduo que terá melhor aptidão para a resolução do problema, ou seja, o indivíduo que minimizará a função.

Segundo SIVANANDAM e DEEPA (2010), a avaliação é feita através de uma função que melhor represente o problema e tem como objetivo fornecer uma medida de aptidão de cada indivíduo da população atual, que vai dirigir o processo de busca.

Procuramos uma função que devesse convergir com um menor tempo de subida (t_r), com um menor tempo de pico (t_p), com um menor overshoot (PO), e menor tempo de



acomodação (ts), que neste trabalho será usado o critério de 2%. A função custo foi definida como sendo o somatório do valor absoluto do erro em cada amostra de tempo.

Vale ressaltar que, o que a função de custo faz é receber os valores dos parâmetros do controlador (K_p , K_i e K_d) vindos do AG e aloca-los na função do controlador:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad \text{Equação 1}$$

O próximo passo é verificar o erro da resposta no tempo com a planta e o controlador em MF e, finalmente, somar os valores absolutos de erro em cada instante de tempo. Os indivíduos que melhor atenderem aos requisitos (minimizar a função de custo), serão escolhidos como os mais aptos à sobrevivência, e estes então serão os ganhos K_p , K_i e K_d

2.1. DESCRIÇÃO DA FUNÇÃO

“Um índice de desempenho é uma medida quantitativa do desempenho de um sistema e é escolhido de modo que a ênfase seja dada às especificações de sistemas importantes”. (DORF e BISHOP, 2001)

Segundo DORF e BISHOP (2001), para um sistema de controle ótimo, os parâmetros do sistema devem ser ajustados de modo que o índice de desempenho alcance um valor extremo, mais comum que seja um valor mínimo. Portanto, o melhor sistema é definido como o sistema que minimiza esse índice.

Entre os índices de desempenho baseados no erro, têm-se o índice da Integral do erro ao quadrado (ISE – Integral of the Square of the Error), que tem como característica atuar em grandes proporções para erros maiores, assim como atuar em pequenas proporções para erros menores, onde tende a apresentar uma resposta rápida com uma baixa estabilidade relativa.

$$ISE = \int_0^t e^2(t) dt \quad \text{Equação 2}$$

Um outro índice de desempenho baseado no erro é o índice da Integral do valor absoluto do erro (IAE – Integral of the Absolute magnitude of the Error), caracterizada por um amortecimento razoável, tendo um máximo sobressinal sem que haja muita oscilação na resposta.

$$IAE = \int_0^t |e(t)| dt \quad \text{Equação 3}$$

O índice da Integral do tempo multiplicado pelo quadrado do erro (ITSE – Integral of Time multiplied by the Squared Error) caracteriza-se por atuar em pequenas proporções para erros iniciais grandes e, à medida que aumenta o tempo na resposta transitória, atua em maiores proporções.



$$ITSE = \int_0^t te^2(t)dt$$

Equação 4

Entre os índices de desempenho baseados no erro um comumente utilizado é o índice da Integral do erro absoluto multiplicado pelo tempo (ITAE – Integral of Time multiplied by Absolute Error).

Este índice de desempenho tem característica de reduzir grandes erros iniciais, assim como erros posteriores ocorridos na resposta transitória. Tal característica torna o máximo sobressinal pequeno na resposta e as oscilações se tornam bem amortecidas.

$$ITAE = \int_0^t t|e(t)|dt$$

Equação 5

Onde $e(t)$ é o sinal do erro no instante t , que corresponde à diferença entre o sinal de saída $y(t)$ e o sinal de referência $r(t)$ em um sistema de malha fechada.

Entre os índices de desempenho apresentados anteriormente, o índice ITAE é o que apresenta melhor seletividade entre todos, ou seja, o valor mínimo é instantaneamente identificável quando houver variações nos parâmetros do sistema.

2.2. DESCRIÇÃO DO PROGRAMA NO MATLAB

O Algoritmo Genético gera a população inicial e realiza a seleção dos melhores indivíduos, que são as variáveis do controlador PID (ganhos K_p , K_i e K_d), tais resultados gerados no Optimization Tool são recebidos pela função do controle e, com isso, calcula-se o erro que será um valor unitário (entrada degrau unitário), subtraído pela saída que será função do controle multiplicada pela planta que será simulada em malha fechada.

Após calculado o erro, calcula-se a função fav que é representada como um dos índices de desempenho ITAE, apresentado anteriormente, podendo ser compreendido como o somatório do erro absoluto ponderado no tempo que significa que é feita a soma de todo o valor de erro em cada instante e multiplicado pelo instante do tempo t em um intervalo de 0 a 50 segundos, multiplicado por uma resolução dt de 0.001 que reduz o valor da função fav . Sabendo que é a função fitness que se deseja minimizar, quanto menor for a função fav , menor será erro.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Feita a abordagem do desenvolvimento do algoritmo da função de custo, e mostrado como foram configurados os operadores genéticos e as opções de busca no AG, foram feitas as simulações computacionais no MATLAB® e no SIMLUINK®. Para melhor entendimento, primeiramente, é rodado o AG no Optimization Tool, e seus valores de resposta são exportados ao workspace do MATLAB®. Neste campo, os ganhos K_p , K_i e K_d são substituídos na equação 1, apresentada na seção 2.

Analizados os resultados das funções LIT no domínio da frequência, tanto para funções estáveis como instáveis, a fim de testar o AG no ajuste dos parâmetros do controlador PID. Para cada planta serão apresentados gráficos da resposta do sistema no domínio do tempo (com o controlador ajustado pelo AG), e a saída do controlador, variável manipulada (MV).



Para um sistema estável e grau relativo igual a 4:

$$G(s) = \frac{50s + 750}{s^5 + 30s^4 + 335s^3 + 1690s^2 + 3624s + 2240}$$

O AG gerou os seguintes ganhos do controlador PID:

$$K_{pid}(s) = 6,6 + \frac{5,723}{s} + 1,921s$$

O índice de desempenho do sistema estável é mostrado na Tabela 1 após a inserção do controlador PID é apresentado abaixo:

Tabela 1: Índices de desempenho do sistema da Planta 1

Desempenho	Controlador PID
tr(s)	1,37
ts(s)	3
tp(s)	2,41
PO(%)	2,5
yinf	1

Na figura 2 é mostrado a resposta no tempo da Planta 1 com o controlador PID para uma entrada degrau unitário em malha fechada com realimentação unitária.

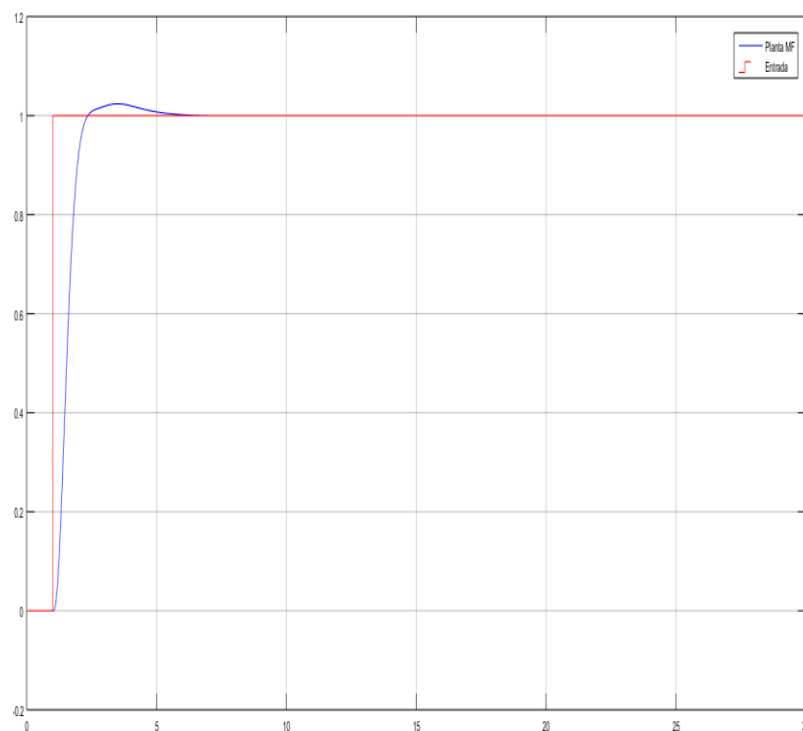


Figura 2: Resposta no tempo da Planta 1 com o controlador PID em malha fechada



A resposta da variável manipulada (MV) atinge um valor muito alto, tornando-se inviável para sistemas reais e improvável de ser realizado em termos práticos conforme mostrado na Figura 3.

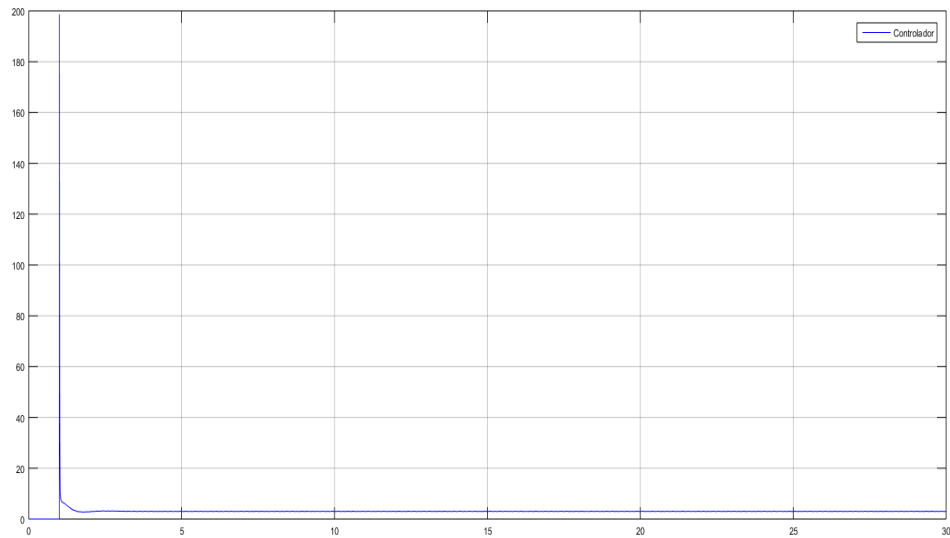


Figura 3: Resposta da variável manipulada para Planta 1

Para a resolução deste problema, foram limitados os ganhos do controlador na geração dos indivíduos no AG. Estes ganhos serão limitados em 1 para os três ganhos K_p , K_i e K_d , respectivamente e apresentados conforme Figura 4

Constraints:				
Linear inequalities:	A:	<input type="text"/>	b:	<input type="text"/>
Linear equalities:	Aeq:	<input type="text"/>	beq:	<input type="text"/>
Bounds:	Lower:	<input type="text" value="[0 0 0]"/>	Upper:	<input type="text" value="[1 1 1]"/>
Nonlinear constraint function:	<input type="text"/>			
Integer variable indices:	<input type="text"/>			

Figura 4: Limitações dos ganhos do controlador PID da Planta 1

Desta forma, foi rodado novamente o AG com os ganhos limitados e gerou os seguintes resultados do controlador PID:

$$K_{pid}(s) = 0,565 + \frac{1}{s} + 0,03s$$



Os índices de desempenho do sistema estável mostrados na Tabela 2 após a inserção do controlador PID utilizando ganhos limitados é apresentado abaixo:

Tabela 2: Índices de desempenho do sistema da Planta 1 para os novos ganhos limitados

Desempenho	Controlador PID
tr(s)	9,39
ts(s)	7,56
tp(s)	11,2
PO(%)	0,296
yinf	1

Na figura 5 é mostrado a resposta no tempo da Planta 1 com o controlador PID para uma entrada degrau unitário em malha fechada com realimentação unitária com os ganhos limitados, onde a resposta atinge o valor de entrada degrau unitário em aproximadamente 10 segundos tornando-se mais lenta quando comparado com a resposta apresentada na figura 2.

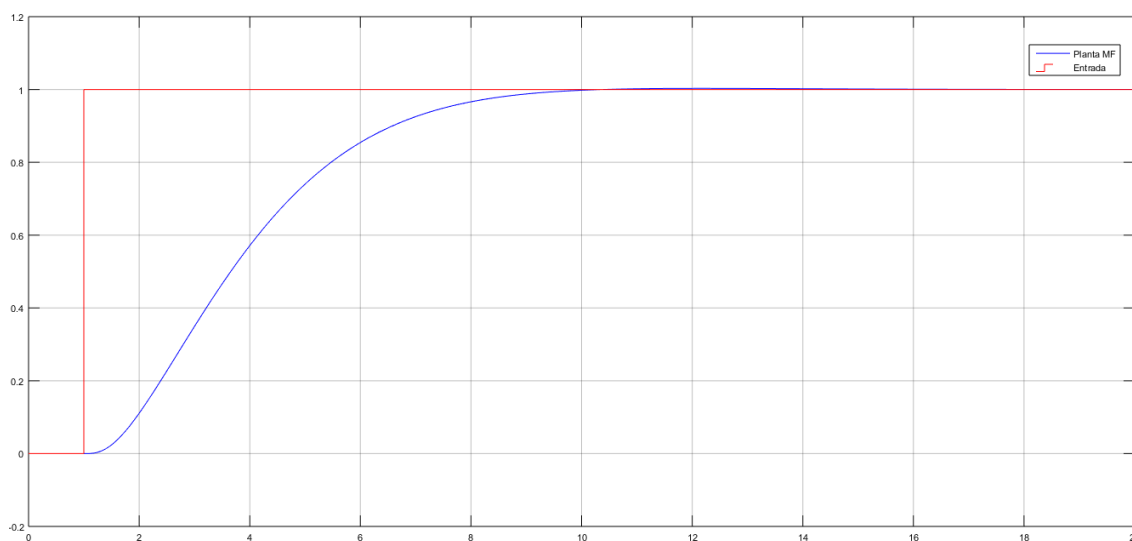


Figura 5: Resposta no tempo da Planta 1 com o controlador PID em malha fechada com os ganhos limitados



A resposta da variável manipulada (MV) atinge um valor muito abaixo quando se compara com a MV da apresentada na figura 3, tornando-se factível para sistemas reais e totalmente provável de ser realizado em termos práticos conforme mostrado na Figura 6.

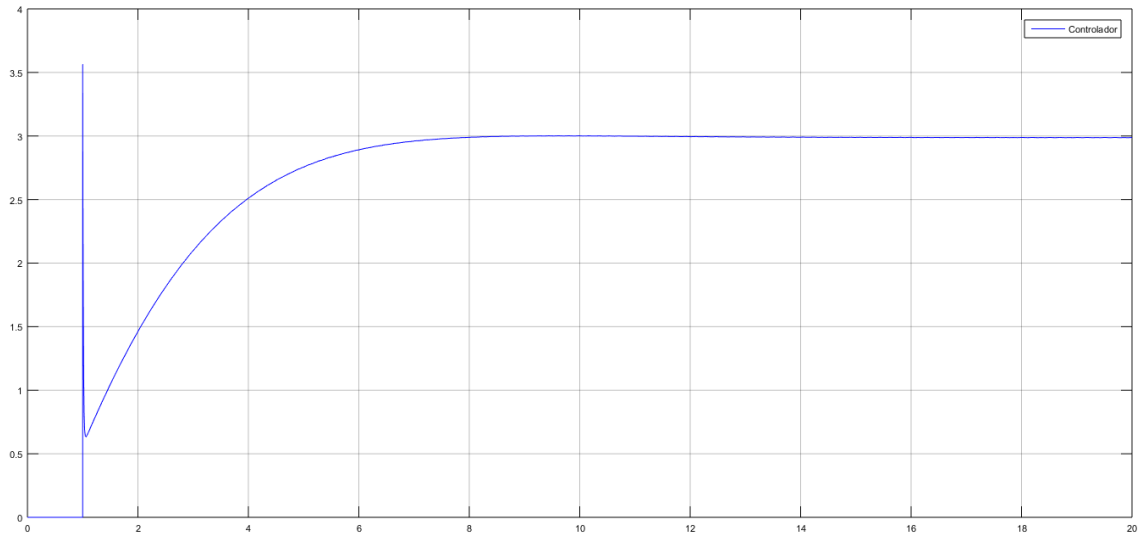


Figura 6: Resposta da variável manipulada para planta 1 para os novos ganhos

Para Sistema instável de fase não-mínima e grau relativo igual a 2.

$$G(s) = \frac{s^3 + 6s^2 - 2s + 1}{s^5 + 3s^4 + 29s^3 + 15s^2 - 3s + 60}$$

O AG gerou os seguintes ganhos:

$$K_{pid}(s) = 2,528 + \frac{12,199}{s} - 0,471s$$

Os índices de desempenho do sistema instável mostrados na Tabela 3 após a inserção do controlador PID é apresentado abaixo:

Tabela 3: Índices de desempenho do sistema da Planta 2

Desempenho	Controlador PID
tr(s)	0,764
ts(s)	13,1
tp(s)	1,02
PO(%)	26
yinf	1



Na figura 7 é mostrado a resposta no tempo da Planta 2 com o controlador PID para uma entrada degrau unitário em malha fechada com realimentação unitária.

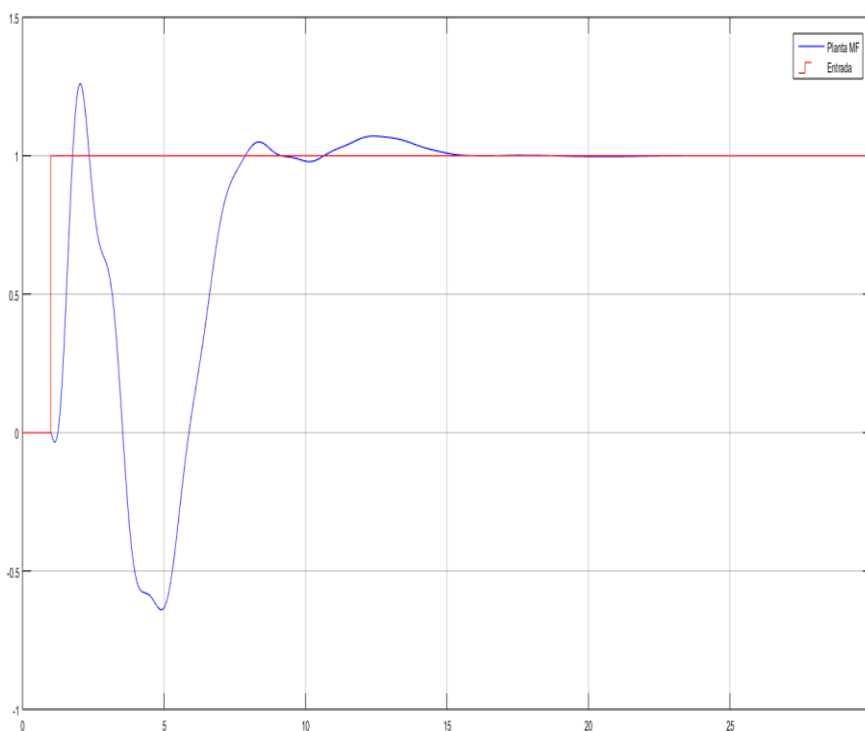


Figura 7: Resposta no tempo da Planta 2 com o controlador PID em malha fechada

A resposta da variável manipulada (MV) atinge um valor negativo no início e posteriormente atingindo um valor com amplitude positiva, tornando-se inviável para sistemas reais e improvável de ser realizado em termos práticos conforme mostrado na Figura 8.

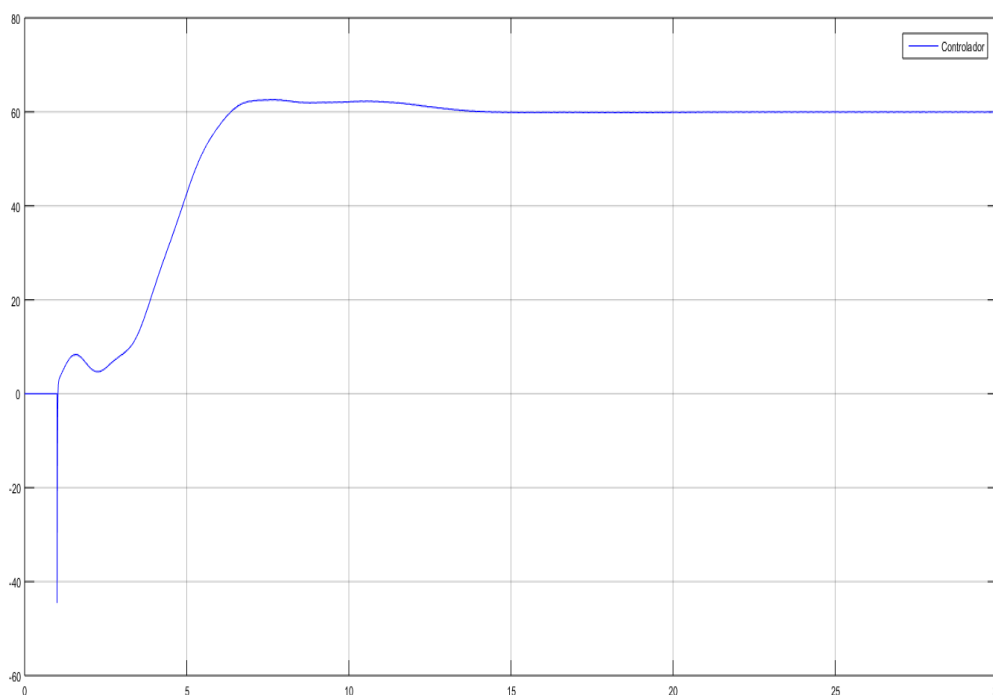


Figura 8: Resposta da variável manipulada para Planta 2



Para resolução deste problema, foram limitados os ganhos do controlador na geração dos indivíduos no AG. Estes ganhos serão limitados em 20 para os três ganhos K_p , K_i e K_d , respectivamente:

Constraints:			
Linear inequalities:	A:	<input type="text"/>	b: <input type="text"/>
Linear equalities:	Aeq:	<input type="text"/>	beq: <input type="text"/>
Bounds:	Lower:	<input type="text" value="[0 0 0]"/>	Upper: <input type="text" value="[20 20 20]"/>
Nonlinear constraint function: <input type="text"/>			
Integer variable indices: <input type="text"/>			

Figura 9: Limitações dos ganhos do controlador PID da Planta 2

Desta forma, foi rodado novamente o AG com os ganhos limitados e gerou os seguintes resultados do controlador PID:

$$K_{pid}(s) = 2,589 + \frac{12,7444}{s} + 0,041s$$

Os índices de desempenho do sistema estável mostrados na Tabela 5 após a inserção do controlador PID utilizando ganhos limitados é apresentado abaixo:

Tabela 1: Índices de desempenho do sistema da Planta 2 para os novos ganhos limitados

Desempenho	Controlador PID
tr(s)	0,894
ts(s)	13,3
tp(s)	11,3
PO(%)	11,8
yinf	1

Na figura 10 é mostrado a resposta no tempo da Planta 2 com o controlador PID para uma entrada degrau unitário em malha fechada com realimentação unitária com os ganhos limitados, onde a resposta atinge o valor de entrada degrau unitário rapidamente e em seguida acontece a queda e estabilização da resposta ao degrau unitário em aproximadamente 15 segundos onde a princípio se apresenta muito similar quando comparado com a resposta apresentada na figura 7.

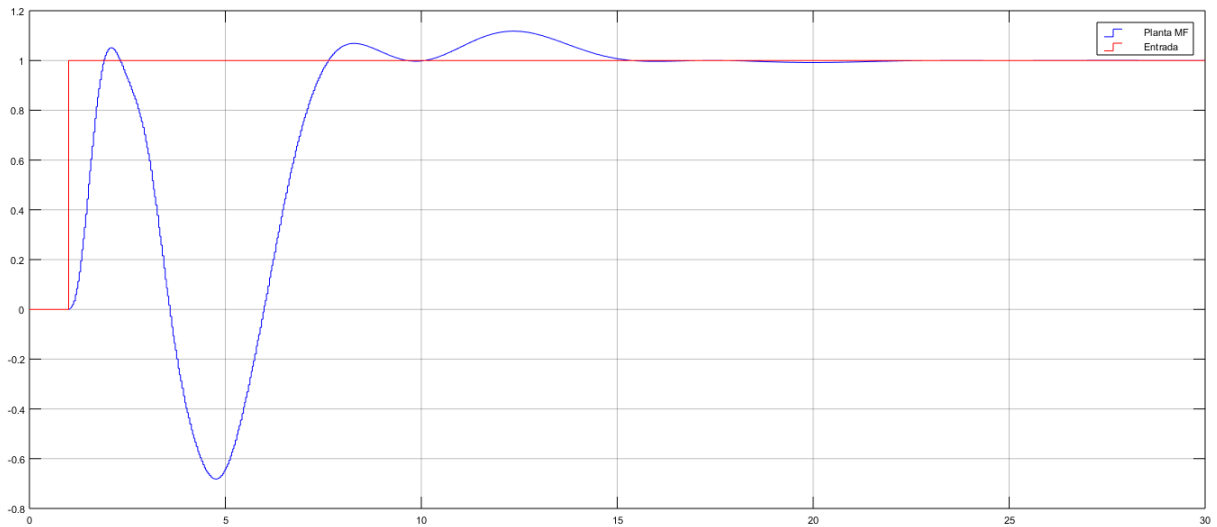


Figura 10: Resposta no tempo da Planta 2 com o controlador PID em MF com os ganhos limitados

A resposta da variável manipulada (MV) não atinge um valor de amplitude negativa e ocorre a estabilidade do sinal com o mesmo tempo quando se compara com a MV da apresentada na figura 8 e ocorre a, tornando-se factível para sistemas reais e totalmente provável de ser realizado em termos práticos conforme mostrado na Figura 11.

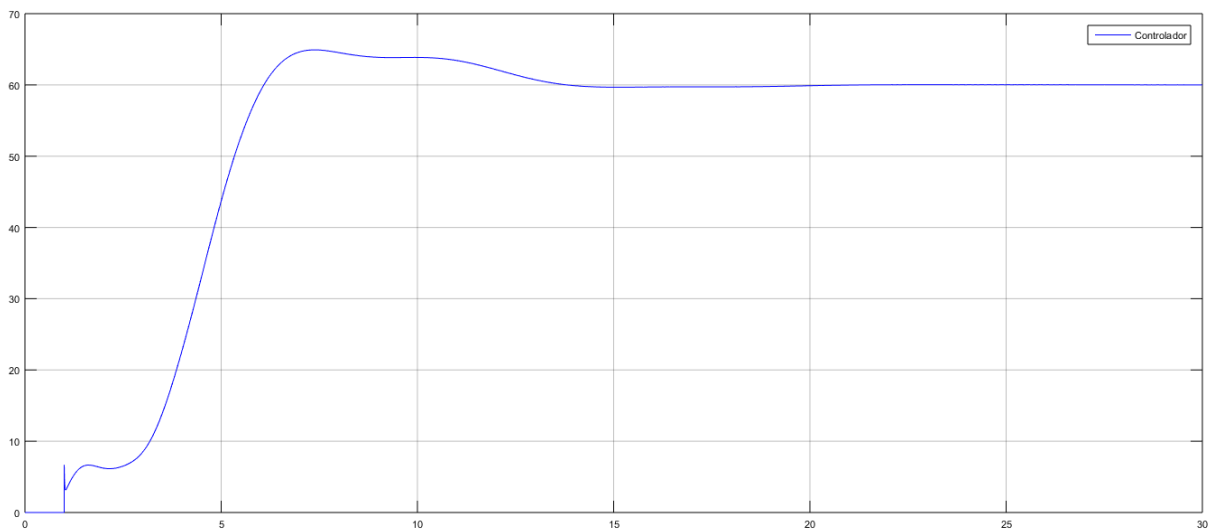


Figura 11: Resposta da variável manipulada para planta 2 para os novos ganhos

4. CONCLUSÃO

Nas simulações computacionais realizadas, foi verificado que em alguns casos, o sistema é estabilizado pelo Algoritmo Genético, porém, o sinal de controle da saída do controlador é muito alto e de difícil manuseio em plantas reais. Devido a este fato, foram limitados os parâmetros do controlador, a fim de que se chegasse a uma resposta satisfatória com o sinal de controle variando entre 0 e 100. Em outros casos, mesmo com a limitação dos ganhos, o sinal de controle ficou muito alto, tornando inviável a aplicação em um sistema real.

De maneira geral, o Algoritmo Genético conseguiu estabilizar todas as plantas e estas obtiveram bons índices de desempenho e chegaram ao regime permanente com rapidez e em todos os casos, o sistema atendeu ao critério de 2% de acomodação.



Para o uso do Algoritmo Genético em sistemas estáveis, deve ser avaliada a necessidade de se desprender um alto custo computacional para geração dos parâmetros K_p , K_i e K_d , sendo que ele pode ser facilmente controlado por métodos clássicos, como foi mostrado neste trabalho.

Os Algoritmos Genéticos são uma excelente ferramenta na busca de otimização para qualquer problema de engenharia. O único inconveniente é que para plantas reais, deve-se levantar a função de transferência da planta, o que na maioria das vezes não é algo tão simples de ser feito.

Para trabalhos futuros, uns pontos interessantes de busca e investigação, seriam: criar o algoritmo genético independente da ferramenta do MATLAB®; para plantas onde a saída do sinal de controle é alta, verificar-se a possibilidade da utilização de um filtro passa baixas, e, por último, realizar-se criação da função de custo ou função fitness para cada índice de desempenho, para que com isso seja possível manipular a resposta da maneira mais conveniente para o sistema e o projetista.

5. REFERÊNCIAS

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. Optimal settings for automatic controllers. Transactions of the Asme, v. 64, p. 759-768, 1942.

NETO, A. F. S., GOMES, F. J., Controladores PID: Introduzindo Inteligência Computacional no Controle Industrial, COBENGE 2010, XXXVIII Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2010.

NOGUEIRA, V. N. (2006) Uso de Algoritmos Genéticos no Projeto de Controladores PID Ótimos para Plantas Estáveis ou Instáveis, Tese de Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica.

SIVANANDAM, S. N.; DEEPA, S. N. Introduction to Genetic Algorithms. Heidelberg: Springer, 2010. ISBN 978-3-540-73189-4.

DORF, R. C., BISHOP, R. H. Sistemas de Controle Modernos: 8. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2001 ISBN 0-201-30864-9