

08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

UTILIZAÇÃO DA ESTRATÉGIA ESTRITAMENTE DOMINANTE DA TEORIA DOS JOGOS PARA SINTONIA OTIMIZADA DE CONTROLADORES PI

Rodolfo Menezes Ribeiro¹ – rodolfom.ribeiro@hotmail.com

Artur Martins Almeida¹ – a_martinsa@yahoo.com.br

Marlon José do Carmo² – marloncarmo@ieee.org

¹ Engenharia de Controle e Automação, CEFET-MG, Unidade de Leopoldina - Leopoldina, Brasil

² Departamento de eletroeletrônica, CEFET-MG, Unidade de Leopoldina - Leopoldina, Brasil

Resumo. O controlador do tipo PI (Proporcional + Integral) é muito utilizado nas indústrias, mas, muitas vezes, sua sintonia é realizada manualmente e de forma empírica. Existem métodos de sintonia para ajustar estes controladores, mas estes métodos clássicos muitas vezes não apresentam uma boa resposta para o controle de plantas que apresentem não linearidades. Este trabalho propõe a otimização na sintonia de um controlador PI, utilizando uma estratégia da teoria dos jogos, denominada de estratégia estritamente dominante. O método desenvolvido foi simulado e validado em uma planta RC, via sistema de prototipagem Arduino. Com os resultados obtidos com a aplicação do método na planta, obteve-se uma melhora na resposta dinâmica da planta proposta e até uma eliminação do sobressinal quando comparado com o método de Ziegler e Nichols, tornando o método factível de ser utilizado na prática.

Palavras-Chaves: Otimização, Controlador PI, Teoria dos Jogos.

1. INTRODUÇÃO

Para continuar competindo no mercado, as empresas procuram manter uma melhoria contínua da sua produção e de seus equipamentos. Com isso, algumas empresas precisaram investir altos valores em tecnologias de controle e automação industrial. Algumas vantagens de se automatizar um processo são:

- Aumento da produtividade;
- Maior padronização do produto;
- Redução do custo de trabalho;

- Aumento do nível de qualidade dos produtos;
- Aumento da confiabilidade do sistema;
- Aumento do nível de segurança da unidade; e
- Redução de rotinas manuais;

Com o passar do tempo foram criados métodos matemáticos para representação de um sistema dinâmico, um exemplo desta representação é a função de transferência, onde a representação se dá no domínio da frequência complexa contínua ou discreta. A função de transferência é utilizada para representar, de forma simples, uma equação diferencial ou a diferenças que relaciona a variável de entrada com a variável de saída.

Sistemas de controle podem ser de malha aberta ou malha fechada. O controle de malha aberta não possui realimentação, este consiste na aplicação de um sinal de controle na entrada, esperando-se que a saída do sistema apresente um determinado comportamento desejado.

Para melhorar a solução de problemas como ruídos, distúrbios da planta e variações paramétricas da planta, utilizam-se sistemas de controle de malha fechada. Estes sistemas são constituídos de sensores no qual é medida a variável de saída, e a partir das leituras destas variáveis, é possível ajustar corretamente o valor de entrada para que o sistema se comporte da maneira desejada. O sistema de controle de malha fechada está representado na Figura 1

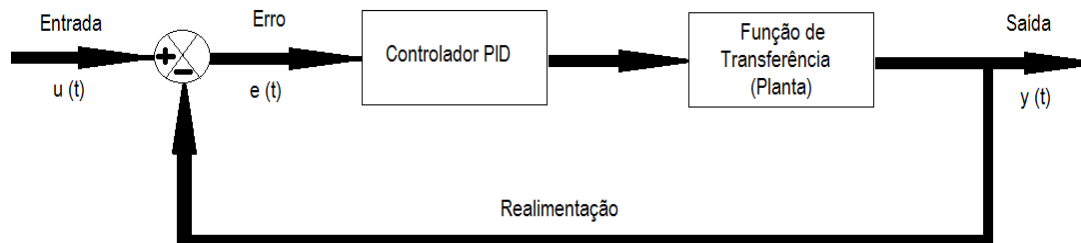


Figura 1 - Sistema de Malha Fechada

O valor desejado de um sistema é ajustado de acordo com as necessidades do processo, e se tem uma retroalimentação ou *feedback*, fechando-se, assim, a malha de controle. O mecanismo de malha fechada melhora a resposta do sistema a controlar, no tocante a ruídos e perturbações, porém, em muitos casos, não é possível eliminar o erro em regime ou melhorar a resposta transitória. Portanto, é necessário inserir um mecanismo de compensação denominado de controlador, (Campos e Teixeira, 2006). Este recebe um sinal comparação construído pela entrada (valor desejado ou *Setpoint*) e o valor medido na saída (Variável de processo). Caso se tenha um sinal de erro diferente de zero, o controlador ajusta o valor da ação de controle de forma a mitigar o erro.

Existem diversos métodos de sintonia de controladores PID que já estão em uso. Dentre esses métodos podem ser citados : Ziegler e Nichols, Lambda, Cohen-Coon, Haalman, Chien, Hrones e Reswick 0% e Chien, Hrones e Reswick 20%.

O principal critério para sintonia do controlador é a estabilidade da planta. Os índices de desempenho mais utilizados para controle de uma planta de segunda ordem, ou que possa ser aproximada de segunda ordem, são identificados na *Figura 2* (Hey, 1997).

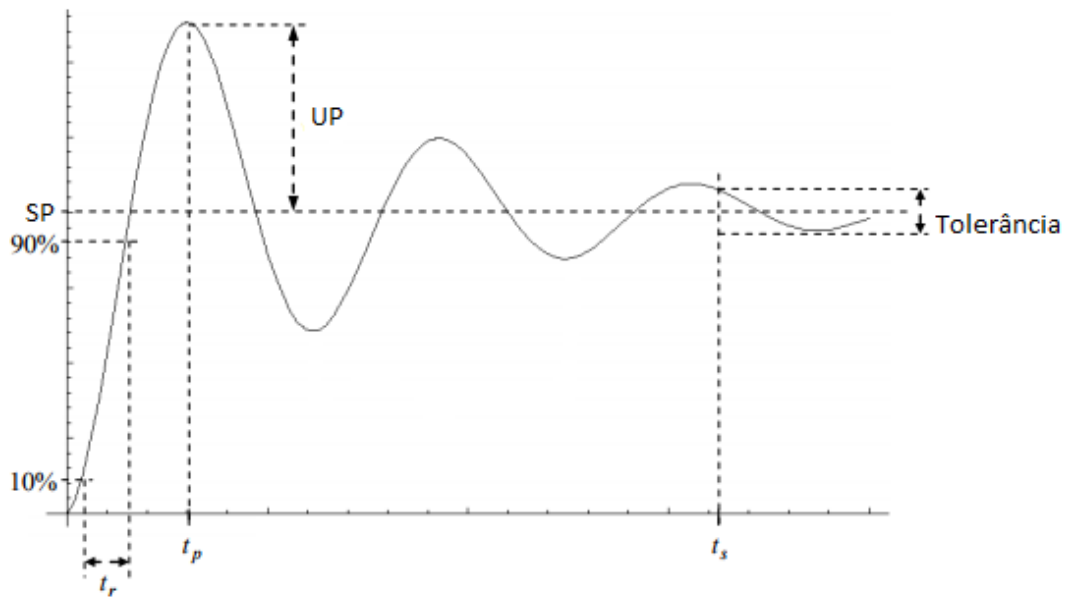


Figura 2 - Resposta dinâmica de uma malha de controle

Os índices mencionados na *Figura 2* são:

SP – *Setpoint* (valor de referência);

t_r – *Rise time* (tempo de subida);

t_p – *Peak time* (tempo de pico);

t_s – *Settling time* (tempo de acomodação);

UP – *Overshoot* (sobressinal).

Para verificação do desempenho da planta, um outro índice para indicar o quão bom é o método de sintonia para um controlador PID é o IAE (Integral do erro absoluto), e sua expressão é representada por (1).

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (1)$$

O valor “ $e(t)$ ” é a diferença entre o valor medido da variável de processo e o valor desejado em um instante de tempo (t) ao longo de um intervalo estabelecido (Campos e Teixeira, 2006). O IAE é usado para quantificar um erro devido a uma perturbação de uma função (Carmo, 2006).

Devido à importância de se obter um projeto com o menor erro de regime transitório possível e levando em consideração as limitações dos equipamentos, a otimização apresentada neste trabalho visa minimizar o valor de IAE para obtenção dos parâmetros de controle.

O método de otimização desenvolvido neste trabalho pode ser utilizado para diversas plantas, mas teve como foco uma função de transferência de primeira ordem mais tempo morto, sendo esse um aproximador de diversas dinâmicas, no qual pode ser chamado de método de identificação a três parâmetros (Carmo, 2006), representado por (2):

$$G(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (2)$$

Para a obtenção dos parâmetros K, τ e θ foi utilizado o método de Smith, lembrando que este é um método de identificação por malha aberta. Este método consiste em aplica um degrau unitário em uma planta de malha aberta e coletar os dados nos pontos desejados (Santos, Carmo e Menezes, 2013).

Com a obtenção da curva de reação, é extraído um ponto em 28,3% da inclinação da curva e outro ponto em 63,2%, estes pontos são t_1 e t_2 respectivamente estão representados na *Figura 3*.

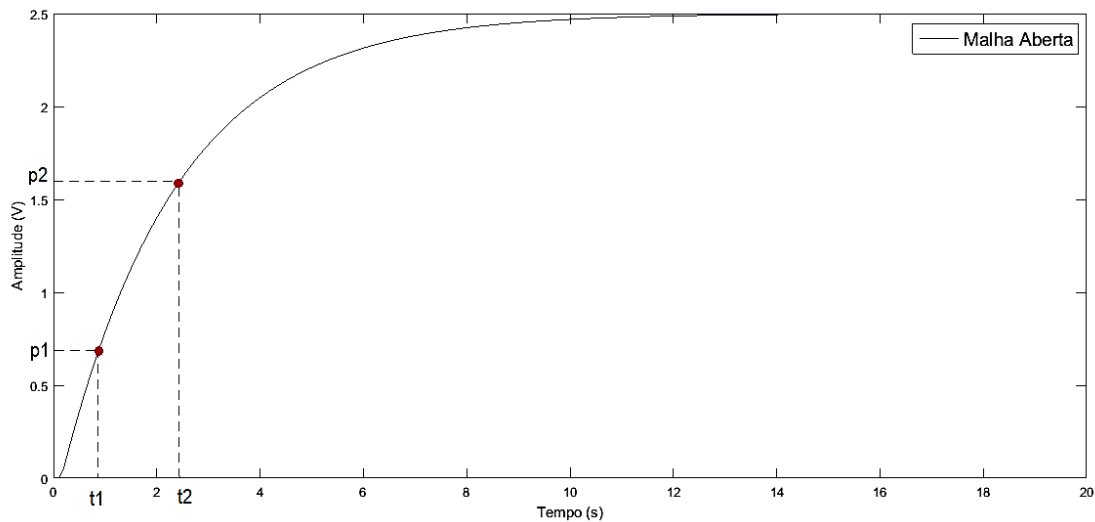


Figura 3 - Curva de Reação do Modelo da Planta RC em Malha Aberta

A partir destes dois pontos e com (3), (4) e (5) e podem ser obtido os parâmetros:

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (3)$$

$$\tau = 1.5 (t_2 - t_1) \quad (4)$$

$$\theta = t_2 - \tau \quad (5)$$

Mesmo com o controlador PI sendo utilizado em larga escala nas indústrias, os ajustes dos parâmetros são realizados manualmente ou por algum método convencional e, com isso, muitas das vezes não apresentam uma resposta dinâmica desejada. Com o avanço tecnológico, há a necessidade de um ajuste fino dos controladores para o aumento da produtividade, precisão e melhoria dos mecanismos de atuação.

As metaheurísticas, como o AG apresentam elevado tempo para produzir uma resposta otimizada dos controladores PID, tornando, em muitos casos, sua aplicação proibitiva, quer

seja por complexidade de implementação, quer seja por esforço computacional. Há poucos trabalhos que utilizam técnicas da Teoria dos Jogos para otimização dos parâmetros do controlador PI (Carraro, 2012). A teoria de jogos possui menor complexidade e custo computacional comparado com as metaheurísticas, fazendo com que esta seja mais atrativa para implementação.

Este trabalho tem com objetivo de realizar a junção da Teoria dos Jogos com a teoria de controle para desenvolver um método de otimização para controladores PI. Dado o objetivo geral, é possível estabelecer os seguintes objetivos específicos: investigar uma metodologia específica da teoria de jogos para implementação em malhas de controle, codificar esta metodologia no matlab, modelar a planta a ser controlada, otimizar o controlador PI para o modelo obtido da planta e validação do método na planta real.

2. TEORIA DOS JOGOS

Segundo Jhon Von Neumann (Brígida et al., 2004), a teoria dos jogos de uma maneira simplificada pode ser tratada como um modelo matemático criado para explicar certas situações quando ocorre pelo menos uma interação entre dois ou mais indivíduos. Estas situações são um reflexo de certas decisões tomadas por estes indivíduos ou jogadores durante a tomada de estratégia.

Todas as vezes que tivermos um conjunto de pessoas, em que suas decisões influenciarão reciprocamente umas as outras, pode-se dizer que existe um “jogo”. Em uma interação estratégica entre os participantes, sejam eles indivíduos ou organizações, são dependentes uma da outra, é neste ponto em que se aplica a Teoria dos jogos. (Fiani, 2006)

Existem diversos tipos de jogos, precisa-se descobrir qual é o mais apropriado para explicar determinada situação. Uma pergunta frequente dos interessados sobre o assunto é: Quando sabemos que é um jogo? A resposta de Fiani (Fiani, 2006) diz que em toda situações que ocorrem interações entre indivíduos racionais e estes traçam suas escolhas estratégicas para a situação, isto pode ser chamado de um jogo. Os elementos mínimos de um jogo são:

Agentes: Os agentes de um jogo podem ser chamados também de Jogadores, onde podem ser vários indivíduos em um grupo, uma única pessoa, uma empresa ou uma organização geral. Os agentes de um jogo são quem ira participar de forma ativa, como na tomada de decisões e se responsabilizar pelo resultado de suas escolhas.

Estratégias: As estratégias são determinadas pelo jogador para atingir o seu objetivo no jogo, após ter definido uma estratégia o jogador irá tomar sua decisão, lembrando que só é considerada uma estratégia quando o indivíduo crie com sua racionalidade.

Recompensas: É todo ônus ou bônus que o jogador recebe após o termino do jogo, são as causas que o jogo propôs durante sua continuidade. Toda recompensa dependerá de decisões tomadas por todos os jogadores de um jogo, sabendo que cada decisão influenciará no resultado do outro jogador.

Existem diversas classificações de jogos, serão utilizados neste trabalho os jogos simultâneos e não-cooperativos, mais precisamente um jogo que se possa eliminar as estratégias estritamente dominada.

Em alguns casos onde os jogadores têm estratégias melhores que as outras independentemente das repostar dos outros jogadores, esta estratégia chama-se dominante, na qual uma ou mais estratégias são dominadas por esta estratégia dominante. Em outras

palavras, existem estratégias de um jogador onde é a melhor opção em todas as situações possíveis no jogo.

Este método é usado normalmente em jogos simultâneos e não cooperativos, ou seja, as decisões são tomadas simultaneamente por todos os jogadores participantes e não pode ocorrer a cooperação dos jogadores em prol de um melhor resultado. Lembrando que neste jogo as estratégias de um jogador influenciam diretamente na recompensa do outro jogador.

3. METODOLOGIA E APARO EXPERIMENTAL

Para se formular um jogo foram escolhidos como jogadores para as variáveis do controlador K_p , K_i e K_d , ressaltando que a variável K_i tem relação direta com a variável K_p , as estratégias dos jogadores consistem em aumentar ou diminuir 10% do valor tomado como referência. O valor de 10% foi escolhido devido ser um valor consistente que atende as necessidades de precisão para otimização do controlador e coerente com a teoria dos jogos. A referência a ser usada foi o método de Ziegler e Nichol.

Como ambas as variáveis influenciam na curva de reação da planta, foi adotado como recompensa do jogo o valor de IAE de cada caso, como são dois jogadores onde cada jogador obtém duas estratégias, o total será de quatro casos de simulações em cada situação do jogo como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Representação do jogo proposto entre os jogadores K_i e K_p

K_i	K_p	
	Aumentar K_p em 10%	Diminuir K_p em 10%
Aumentar K_i em 10%	Caso 1, Caso 3	Caso 1, Caso 4
Diminuir K_i em 10%	Caso 2, Caso 3	Caso 2, Caso 4

As recompensas possíveis do jogador K_i são representadas pelos Casos 1 e 2 e do jogador K_p são os casos 3 e 4, onde:

- Caso 1- IAE da curva controlada mantendo o valor de K_p e aumentando o valor de K_i em 10%;
- Caso 2- IAE da curva controlada mantendo o valor de K_p e diminuindo o valor de K_i em 10%;
- Caso 3- IAE da curva controlada mantendo o valor de K_i e aumentando o valor de K_p em 10%;

- Caso 4- IAE da curva controlada mantendo o valor de K_i e diminuindo o valor de K_p em 10%.

Foi desenvolvido um algoritmo de programação que execute este método de forma automática, onde o método proposto tem como pré-requisito uma função de transferência da planta a ser analisada, a partir desta função de transferência é levantada a curva de reação em malha aberta da planta para obtenção dos parâmetros necessários

O método de Smith é usado para identificação da função da planta em malha aberta, com isto é calculado as variáveis τ e θ . A função de transferência obtida na planta RC está representada por (6)

$$G(s) = \frac{e^{-0.15s}}{2.25s + 1} \quad (6)$$

Com os parâmetros do controlador PI sendo obtido através do método de Ziegler e Nichols o próximo passo é a aplicação da teoria dos jogos para montar o jogo proposto de acordo com os componentes apresentados no anteriormente. Quando montado o primeiro jogo tem-se uma interação. Para que ocorra uma melhora significativa do controlador PI é necessário que tenha um número razoável de interações e com isso neste método o usuário irá definir quantas interações serão necessárias para uma possível otimização do controlador de acordo com os critérios desejado pelo usuário. Ressaltando que a variável usada para comparação entre os resultados é a recompensa do jogo (IAE).

Após o programa ter gerado todas as interações definidas, é mostrado os valores obtidos em cada interação e por último o valor de K_p e K_i otimizados. A partir destes valores é realizada uma simulação para comparação entre as curvas de reações estabelecidas, neste caso as curvas são: sem o controlador PI, com o controlador PI ajustado por método de Ziegler Nichols, com o controlador PI ajustado pelo método ótimo apresentado.

Com a realização da comparação dos métodos na simulação, o próximo passo é a implementação na planta RC. Para comparar os resultados reais é utilizado o controlador PI de Ziegler Nichols e posteriormente o controlador PI otimizado que apresentou melhor resultado na simulação

A fim de realizar a verificação da eficácia do método proposto, montou-se uma planta RC e com isso foram utilizados os seguintes componentes: Arduino Uno, 2 Capacitores eletrolítico de 10uF, 1 Resistor de 220k Ω , 1 Resistor de 560 Ω , 1 Protoboard e Jumpers. O circuito RC da planta está representada pela Figura 4 e foi obtido com ajuda do programa PSIM;

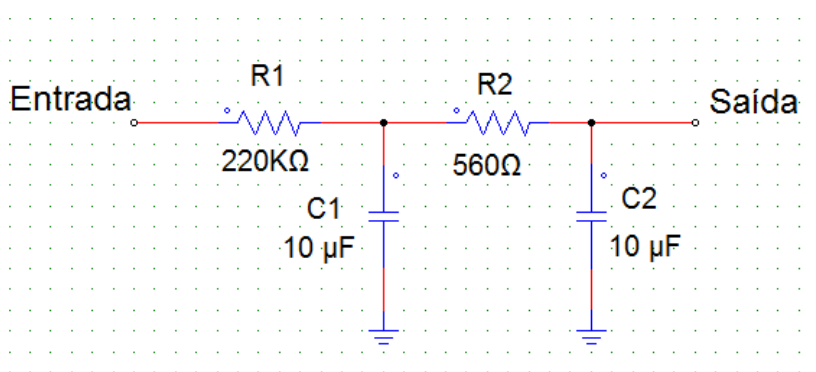


Figura 4 - Circuito RC

O Arduino Uno é uma plataforma de prototipagem muito utilizada, principalmente em projetos acadêmicos. O principal motivo de escolha dessa plataforma é devido à sua facilidade de implementação. Foi utilizado também o Scilab para aquisição e inserção de dados na planta, para comunicação do Arduino com o Scilab foi utilizado um Atom (*toolbox*) específica para esta finalidade. O Scilab contém uma extensão para programação em blocos de fácil utilização em controle, o Xcos e com ele realizou-se a comunicação com a planta

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a montagem da planta e o desenvolvimento do algoritmo para otimização dos parâmetros do controlador PI, realizou-se a simulação e a aplicação do método proposto. A tolerância do tempo de estabilização utilizada para este trabalho foi de 5%. Serão realizadas três simulações onde a primeira simulação tem-se 10 iterações; a segunda simulação tem-se 100 iterações e a terceira simulação tem-se 500 iterações.

As escolhas destes valores foram para diversificar e ampliar as faixas de valores das simulações e padronizar as mesmas a fim de comparar com o método de Ziegler Nichols. Vale ressaltar que, normalmente, quanto maior o número de iterações no jogo, melhor o resultado obtido, mas mesmo aumentando o número de iterações, existe um limite desta melhora no espaço de busca.

Após as simulações serão realizadas duas aplicações reais na planta RC a primeira utilizando um método clássico de controle referente a cada tópico e a segunda, uma aplicação utilizando a melhor simulação otimizada para realização das comparações entre os métodos.

Foram calculados os valores de IAE, t_r , t_s , t_p e UP para todas as simulações como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Comparação dos Resultados da Simulação Utilizando Ziegler Nichols Como Referência

Ziegler e Nichols	IAE	t_r (s)	t_s (s)	t_p (s)	UP(%)
Controlador PI	46,458	1,20	5,40	3,60	55,00
Controlador PI Otimizado com 10 iterações	42,267	1,20	4,77	3,30	50,56
Controlador PI Otimizado com 100 iterações	40,745	1,20	6,10	2,60	30,48
Controlador PI Otimizado com 500 iterações	22,587	1,20	1,61	1,90	1,68

A partir destes dados, pode-se verificar que o Controle PI Otimizado com 500 iterações foi o melhor método, pois obteve um menor valor de IAE, o menor tempo de assentamento, menor tempo de pico e o menor sobressinal.

Os valores das variáveis K_p e K_i de Ziegler Nichols e após as devidas iterações são representados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores das variáveis K_p e K_i utilizando Ziegler Nichols como referência

	K_p	K_i
Ziegler Nichols	13,50	27,03
Otimizado com 10 iterações	18,80	24,44
Otimizado com 100 iterações	21,82	9,89
Otimizado com 500 iterações	10,27	1,18

Com a comparação dos valores da simulação, utilizou-se os parâmetros K_p e K_i obtidos dos métodos do Controlador PI e Controlador PI Otimizado com 500 interações para realizar o teste real na planta RC. A curva obtida é representada pela Figura 5.

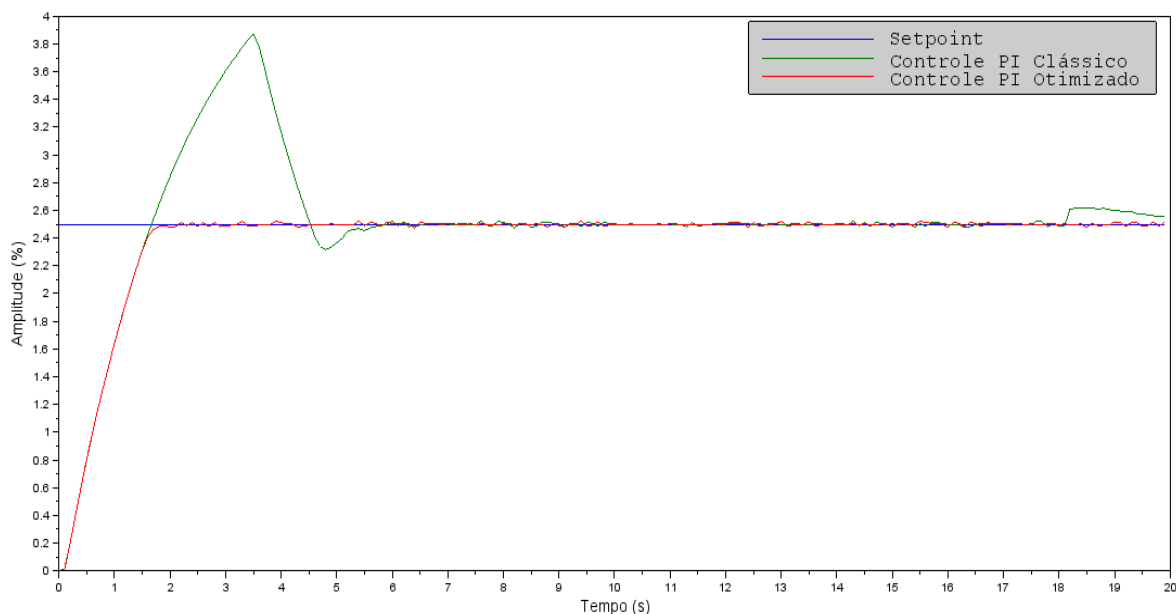


Figura 5 - Aplicação do Método Otimizado e o Método de Ziegler Nichols na Planta RC

A partir da curva de reação gerada foram obtidos os valores para melhor comparação entre os métodos, estes valores são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Comparação entre o Método de Ziegler Nichols e o Método Otimizado

Ziegler Nichols	IAE	t_r (s)	t_s (s)	t_p (s)	UP(%)
Controlador PI	44,062	1,33	5,02	3,50	54,80
Controlador PI Otimizado com 500 iterações	22,038	1,33	1,57	2,25	0,00

Os dados apresentados na simulação pela Tabela 3 e os dados gerados pela aplicação real na planta RC mostrados na Tabela 4, são valores bem próximos. Lembrando que em uma aplicação real, a planta esta sujeita a ruídos, o que pode gerar certas diferenças quando comparado a simulação. Mas em ambos os casos, tanto simulado quando aplicado, os valores

do controlador PI Otimizado com 500 interações são melhores que os valores do Controlador PI de Ziegler e Nichols.

5. CONCLUSÃO

A utilização de uma ferramenta matemática da teoria dos jogos, juntamente com as técnicas desenvolvidas para sintonia otimização do controlador PI, obteve uma melhoria na resposta dinâmica da planta. Na maioria dos métodos de sintonia iniciais utilizados observa-se que precisou utilizar 500 iterações para atingir um resultado esperado.

O método proposto foi eficiente em sua simulação bem como na validação em uma aplicação real na planta RC, obtendo resultados factíveis. Este também obteve uma melhora quando comparado com os métodos utilizados para obtenção dos parâmetros iniciais K_p e K_i , melhorando principalmente a integral do erro absoluto, o sobressinal e tempo de estabilização.

No entanto, o método proposto depende de um modelo matemático o mais próximo possível e com uma boa representatividade da planta a ser utilizada para obtenção de resultados melhores.

REFERÊNCIAS

- M. MASSA DE CAMPOS, M. C.; C.G. TEIXEIRA, H. Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais. [S.l.]: [s.n.], 2006.
- CARMO, M. J. D. Ambiente Educacional Multifuncional Integrado para Sintonia. Dissertação de Mestrado, Juiz de Fora, Agosto 2006
- OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 4ª. ed. [S.l.]: [s.n.], 2005.
- FERREIRA DOS SANTOS, M.; DO CARMO, M. J.; MENEZES TEIXEIRA, A. Identificação de Sistemas de Nível por Métodos a Três Parâmetros. 4º Congresso Científico da Semana Tecnológica – IFSP, Bragança Paulista, Outubro 2013.
- BRÍGIDA, A. S. et al. Uma Introdução a Teoria dos Jogos. II Bienal da SBM, Bahia, 25 a 29 Outubro 2004.
- FIANI, R. Teoria dos Jogos com Aplicações em Economia, Administração e Ciências Sociais. Terceira Edição. ed. [S.l.]: Campos, 2006.

USE OF THE STRATEGY STRICTLY DOMINANT OF THE THEORY OF GAMES FOR OPTIMIZED SYNONYMS OF PI CONTROLLERS

Abstract: The controller type PI (Proportional + Integral) is widely used in industries, but, the tuning is performed manually and empirically. There are tuning methods to adjust these controllers, but these classic methods do not present a good response for the control of plants that present non-linearities. This work proposes the optimization in the tuning of a PI controller, using a strategy of game theory, called strictly dominant strategy. The developed method was simulated and validated in an RC plant, through Arduino prototype system. With the results obtained with the application of the method in the plant, it was obtained an improvement in the dynamic response of the proposed plant and until a elimination of the overshoot when compared with the method of Ziegler and Nichols, making the method feasible to be used in practice.

Keywords: Optimization, PI Controller, Game Theory