

ANÁLISE COMPARATIVA DE CONTROLADORES CLÁSSICOS PD COM FILTRO E PI, POR MEIO DE RESULTADOS SIMULADOS, PROJETADOS PARA UMA MESA DE COORDENADAS XY

Cleonildo Soares Braga, cleonildosoares@ipojuca.ifpe.edu.br¹
Andrei Hudson Guedes Braga, andrei.cefet@yahoo.com.br¹
Daniel Filgueiras, daniel.filgueiras@gmail.com¹
Wilton Batista da Silva, wiltonbatista@ipojuca.ifpe.edu.br¹
Jesus Marlinaldo de Medeiros, jesus_medeiros@yahoo.com.br²

¹Instituto Federal de Pernambuco, Rodovia Pe 060, Bairro Jardim Califórnia, Ipojuca - PE

²Instituto Federal da Paraíba, Rodovia Br 230, Centro, Cabedelo – PB

Resumo: As mesas de coordenadas tem grande atuação na indústria moderna como, por exemplo, no posicionamento de peças e ferramentas para usinagem, soldagem de placas de circuito impresso e medição de geometrias complexas. Para que estas máquinas sejam eficientes é preciso que os deslocamentos efetuados por seus eixos tenham um baixo erro. Este trabalho objetiva realizar uma análise comparativa do desempenho de dois controladores clássicos projetados para o controle de posição de uma mesa de coordenadas de duas bases XY, um PD com filtro e outro PI. A mesa de coordenadas executará uma trajetória circular por meio da composição dos movimentos de suas duas bases X e Y. Será comparado o erro da resposta na ação de cada controlador e o comportamento de suas variáveis de controle. O estudo é baseado em modelos obtidos a partir de uma planta real. Os resultados foram satisfatórios tanto com relação ao erro como em robustez. O controlador PD, com filtro, destacou-se por levar a mesa a traçar uma circunferência com menor erro de trajetória.

Palavras-chave: Controle clássico, Mesa de coordenadas XY, análise comparativa do desempenho.

1. INTRODUÇÃO

No ramo da indústria, o controle automático tornou-se uma ferramenta essencial na melhoria da qualidade de um produto e na maximização dos recursos utilizados.

Um exemplo do que foi mencionado está associado às chamadas mesas de coordenadas XY e XYZ, utilizadas na indústria de máquinas ferramenta. Ainda hoje existem no mercado as que trabalham com acionamento manual por meio de volantes, o que as torna de custo mais acessível e dispensa treinamento especializado dos funcionários; mas a qualidade do produto torna-se restrito exclusivamente a habilidade do operador e de sua experiência adquirida para a qualidade do produto (Menezes Filho, 2010). O avanço em setores como o industrial e a necessidade de maior exatidão no sistema de posicionamento dessas máquinas, fez com que as mesmas fossem substituídas por mesas acionadas por motores elétricos, acionamentos hidráulicos ou pneumáticos (Júlio, 2010). Com isso, tornou-se possível a aplicação do controle de posição automático no lugar do controle manual, ganhando-se maior eficiência, velocidade e confiabilidade.

A maioria das mesas de coordenadas existentes no mercado usa dois tipos de acionamento: motor de passo, que trabalha em uma estrutura de malha aberta e o servo mecanismo, que utiliza motores de corrente contínua ou de indução em malha fechada. Assim, há a necessidade de sensores de posição (encoders) que servem para fornecer a posição angular e velocidade do eixo do motor (Menezes, 2007).

Para um bom desempenho o erro de posicionamento e a suavidade do movimento são fatores determinantes da exatidão de forma e da rugosidade da peça que se pretende fabricar, sendo o erro um dos pontos críticos desses tipos de máquinas ferramentas (Jesus, 1999). Os controladores usados nestas máquinas tem a função de minimizar o erro, ou seja, diminuir a relação entre a medida desejada, ou set point, e a medida efetuada.

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise comparativa de controladores clássicos PD com filtro e PI projetados para uma Mesa de Coordenadas XY, por meio de resultados simulados, para que a mesma possa descrever uma trajetória circular com o menor erro possível e sem saturação da variável de controle. Para isso, serão utilizados os modelos matemáticos obtidos por meio de identificação paramétrica de um protótipo real.

2. MESA DE COORDENADAS E FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA

O sistema usado neste trabalho é uma mesa de coordenadas, fabricada para realização de experimentos de controle, composto de duas bases ou plataformas, uma superior e outra inferior, que se deslocam perpendicularmente uma em relação à outra. Trabalham de forma desacoplada (ou seja, uma movimenta-se independente da outra), acionadas por motores de corrente contínua de 12 volts, conectadas a fusos por meio de um conjunto redutor de velocidade de 50:1, proporcionando uma velocidade máxima de 2,37mm/s. Os redutores também atuam como multiplicadores de torque dos motores.

Os deslocamentos das bases são detectados por “encoders”, cujos sinais são captados e processados por um computador, através de uma placa de aquisição de dados da marca QUATEC e do programa LabView. A placa contém um conversor Analógico Digital (A/D) responsável pela conversão das informações analógicas de entrada em informações digitais, e um conversor Digital Analógico (D/A) que converte as informações de saída em um nível de tensão analógica para acionamento dos motores. A Fig. 1 mostra um desenho esquemático e uma foto da mesa apresentando os principais componentes que compõem o experimento em pauta.

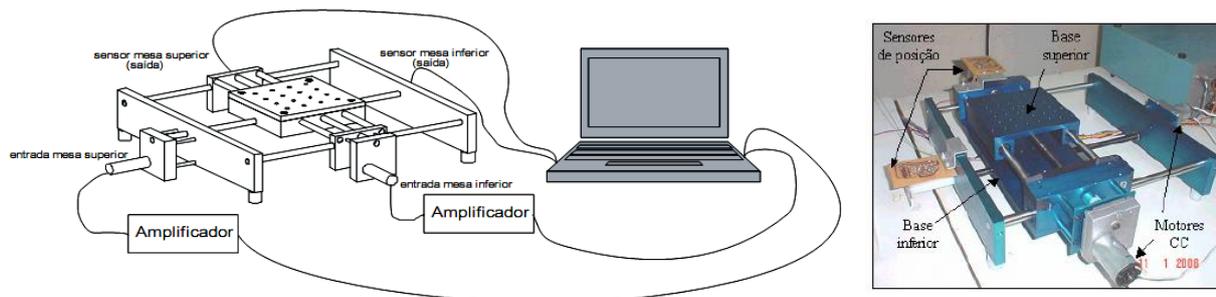


Figura 1. Mesa de coordenadas: esquema de montagem e foto real

Além dos componentes acima citados, o sistema possui uma fonte de potência DC, FOK GYEM, de quatro saídas, modelo TR-9193/A, para alimentar o circuito amplificador de potência.

O sinal de saída da placa de aquisição de dados varia entre 0V e 5V, logo, foi preciso o uso de amplificadores para fornecer uma tensão entre 0V e 12V aos motores CC.

Os modelos matemáticos das mesas inferior e superior foram obtidos utilizando-se a técnica de identificação paramétrica, em malha aberta, através do modelo de identificação BJ, (Box Jenkins), usando uma onda quadrada como sinal de excitação com amplitude de $\pm 2,5V$ e tempo de amostragem de 10ms, conforme se pode verificar nas equações (1) e (2). (Braga, 2013)

$$p_{superior}(s) = \frac{24,44}{s^3 + 68,18s^2 + 863s} \quad (\text{Base superior}) \quad (1)$$

$$p_{inferior}(s) = \frac{77,8}{s^3 + 125,3s^2 + 3665s} \quad (\text{Base inferior}) \quad (2)$$

3. PROJETO DOS CONTROLADORES PD E PI PARA QUE A MESA XY EXECUTE UMA TRAJETÓRIA CIRCULAR

3.1 Controlador PD

Os primeiros controladores projetados para o sistema de coordenadas em estudo foram do tipo PD (proporcional derivativo) com filtro e PI (proporcional integral).

Braga (2006) propôs um modelo de controlador Proporcional Derivativo. O modelo PD, apesar de adicionar ruído, normalmente de alta frequência, adiciona amortecimento ao sistema que, no caso do controle de posição da mesa de coordenadas, contribui para o uso de valores mais elevados do ganho proporcional e, assim, diminuir o erro de estado estacionário (Lourenço, 1996). Para atenuar os efeitos do ruído, Braga (2006) adicionou o filtro mostrado no modelo abaixo:

$$c(s) = K_p \left(1 + \frac{T_D s}{1 + \frac{T_D s}{N}} \right) \quad (3)$$

Onde: K_p é o ganho proporcional

T_D é o tempo derivativo

N é um número inteiro positivo e escolhido do intervalo $3 \leq N \leq 20$, (Caon Júnior, 1999).

Foi usada a técnica de alocação de pólos para a escolha dos controladores a partir dos modelos obtidos das bases superior e inferior da mesa de coordenadas. Um programa foi escrito no software MatLab para determinar os controladores que melhor atendessem as especificações de projeto.

3.1.1 Critérios de projeto dos controladores

A mesa de coordenadas utilizada neste trabalho é de baixa velocidade. O percurso máximo da base inferior da mesa de coordenadas é de 155mm e é realizado em 95,6s enquanto que a base inferior tem curso máximo de 155mm, realizado em 65,5s, ambos conseguidos com os motores acionados a plena carga. Desta forma, os projetos dos controladores para posicionamento, são limitados pelo tempo de acomodação.

Os controladores determinados, que melhor atenderam as especificações de projeto, que são, a não saturação da variável de controle e o menor erro de trajetória possível, são mostrados a seguir:

$$c_{inf} = \frac{5,496s+60}{0,0229s+1} \quad (\text{base inferior}) \quad (4)$$

$$c_{sup} = \frac{8,952s+60}{0,0373s+1} \quad (\text{base superior}) \quad (5)$$

O controlador para a base superior foi obtido para $K_p=60$, $\omega_n=22$ rad/s, $T_D=0,112$ e $N=3$, enquanto que para a base inferior foi obtido para $K_p=60$, $\omega_n=43,74$ rad/s, $T_D=0,0687$ e $N=3$.

3.2 Controlador PI

O segundo par de controladores propostos por Braga (2013) foram obtidos pelo método de Guillemín Truxal. Seu modelo foi projetado usando um modelo de referência, de modo a seguir uma trajetória polinomial do terceiro grau.

Os controladores propostos foram:

$$c_{inf} = 30 + \frac{0,20566}{s} \quad (\text{base inferior}) \quad (6)$$

$$c_{sup} = 30 + \frac{0,0409}{s} \quad (\text{base superior}) \quad (7)$$

Para este projeto, as especificações de desempenho são: fidelidade no traçado da trajetória proposta, variável de controle sem saturação e erro máximo de 2%.

4. ANÁLISE DAS RESPOSTAS SIMULADAS DOS CONTROLADORES PD COM FILTRO E PI

Segue, nesta seção, uma análise dos resultados simulados dos controladores projetados, PD e PI, para a mesa de coordenadas em estudo.

O objetivo é verificar o comportamento do sistema ao acompanhamento de uma trajetória circular. Deseja-se que o erro seja o menor possível e que a variável de controle não sature.

4.1. Controlador PD com filtro

Usando os softwares SCILAB e MATLAB, foram feitas as simulações das respostas da base superior a um sinal senoidal e da base inferior a um sinal cossenoidal. Para este trabalho os sinais terão, ambos, amplitude 50mm e frequência 0,06rad/s. A Fig. 2 e a Fig. 3 mostram o comportamento da resposta aos sinais supracitados e suas respectivas variáveis de controle. A composição destas trajetórias origina a circunferência mostrada na Fig. 4.

$$x = 50 \cdot \text{sen}0,06t \quad (\text{sinal senoidal}) \quad (8)$$

$$y = 50 \cdot \text{cos}0,06t \quad (\text{sinal cossenoidal}) \quad (9)$$

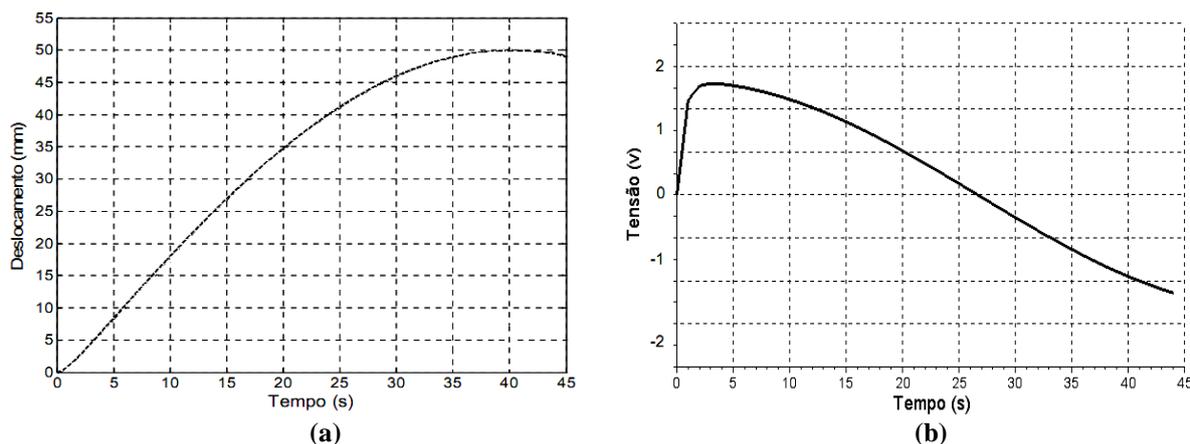


Figura 2. (a) Trecho da curva de resposta para um sinal senoidal da base inferior e (b) variável de controle da base inferior

A curva da variável de controle da base inferior manteve-se dentro do limite de saturação que, neste caso, é de $\pm 2,5V$ (saída da placa de aquisição de dados). Como a tensão que movimenta os motores CC varia entre $\pm 12V$, a variável de controle deve ser amplificada. Isto é feito por meio de amplificadores que transformam o sinal de amplitude $\pm 2,5V$ em $\pm 12V$.

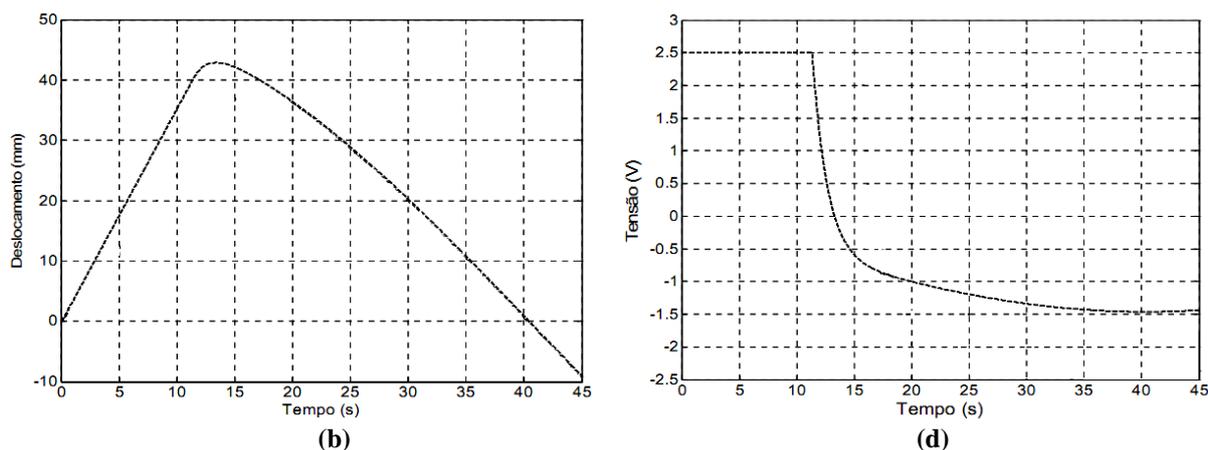


Figura 3. (c) Trecho da curva de acompanhamento de uma trajetória cossenoidal da base superior e (d) variável de controle da base superior

Novamente, pode-se notar que a curva da variável de controle manteve-se dentro dos limites de saturação $\pm 2,5V$. O intervalo em que a variável aparece no limite refere-se ao trecho correspondente à defasagem da função cosseno, não afetando a trajetória. Como as bases partem de um mesmo ponto (origem) a base que segue a função cosseno precisa deslocar-se rapidamente para vencer a defasagem. Isto implica no uso da maior velocidade disponível, correspondente a tensão máxima no motor, ou seja, 12V, o que explica a saturação da variável de controle neste trecho. Pode-se ver o efeito disso na Fig. 4, no posicionamento antes da execução da trajetória circular.

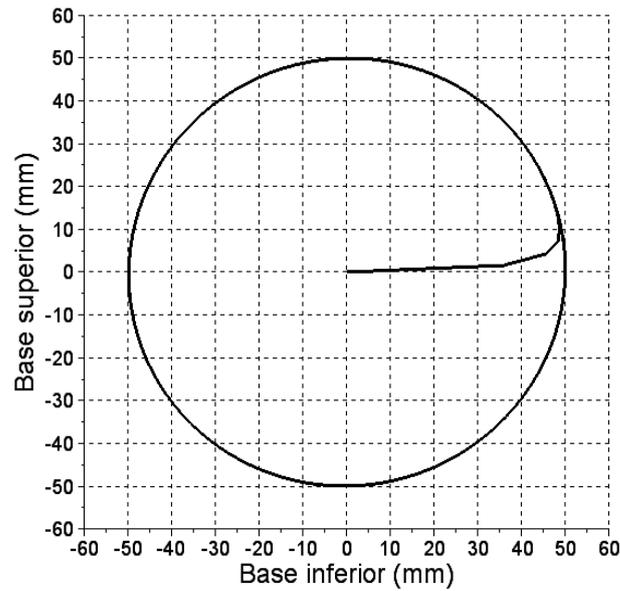


Figura 4. Circunferência simulada traçada pela composição dos movimentos das bases inferior e superior

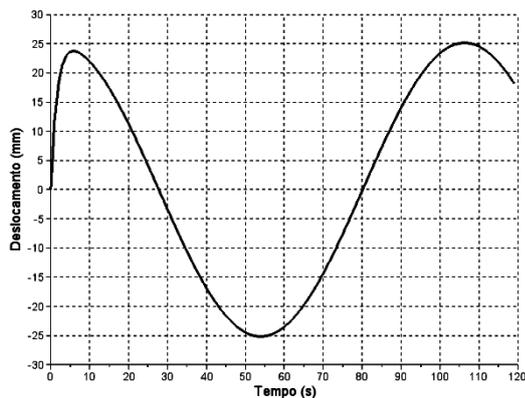
A qualidade da trajetória circular foi assegurada pela não saturação da variável de controle ao longo de toda a circunferência.

4.2. Controlador PI

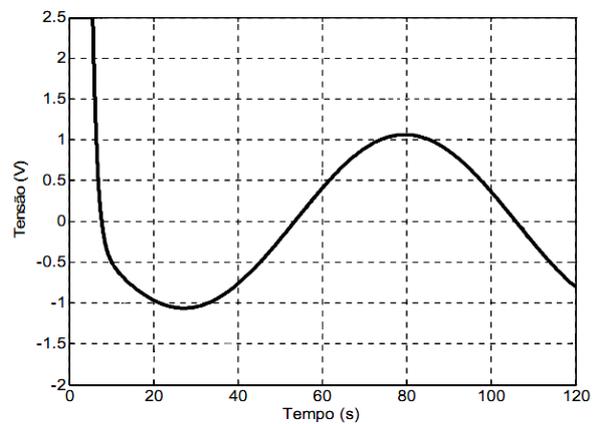
As simulações das respostas da base superior a um sinal senoidal e da base superior a um sinal cossenoidal são mostradas na Fig. 5 e na Fig. 6. A amplitude de cada sinal foi: amplitude 25mm e frequência 0,06rad/s. A composição destas trajetórias origina uma circunferência mostrada na Fig. 7.

$$x = 25 \cdot \text{sen}0,06t \quad (\text{sinal senoidal}) \quad (10)$$

$$y = 25 \cdot \text{cos}0,06t \quad (\text{sinal cossenoidal}) \quad (11)$$

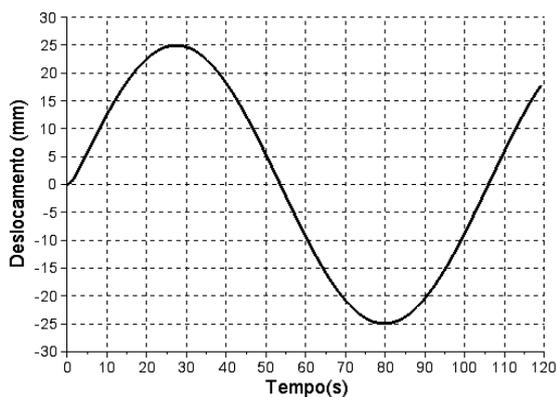


(a)

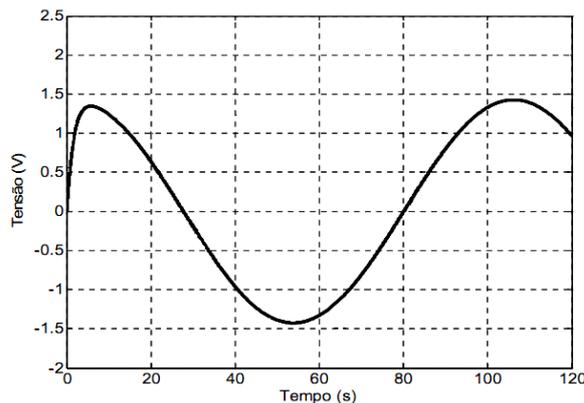


(b)

Figura 5. (a) Curva de acompanhamento de uma trajetória cossenoidal da base superior e (b) variável de controle da base inferior



(c)



(d)

Figura 6. (c) Curva de acompanhamento de uma trajetória senoidal da base inferior e (d) variável de controle da base inferior

Pode-se observar também, neste caso, que a variável de controle em ambas as trajetórias ficou restrita dentro de sua zona de saturação, o que implica em curvas de resposta fiéis ao sinal de referência.

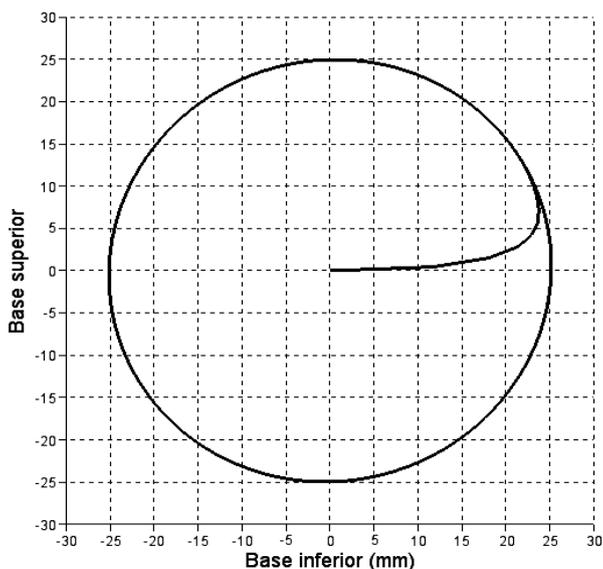


Figura 7. Circunferência simulada traçada pela composição dos movimentos das bases inferior e superior

4.3. Comparação dos resultados

Para fins de comparação dos resultados, foram realizadas as simulações da mesa de coordenadas para ambos os controladores e postas sobre um mesmo eixo de coordenadas. Os sinais senoidais e cossenoidais foram de amplitude 50mm e frequência de 0,06 rad/s. O resultado é mostrado na Fig. 8 e na fig. 9 a curva do erro de circularidade, em regime, da circunferência traçada.

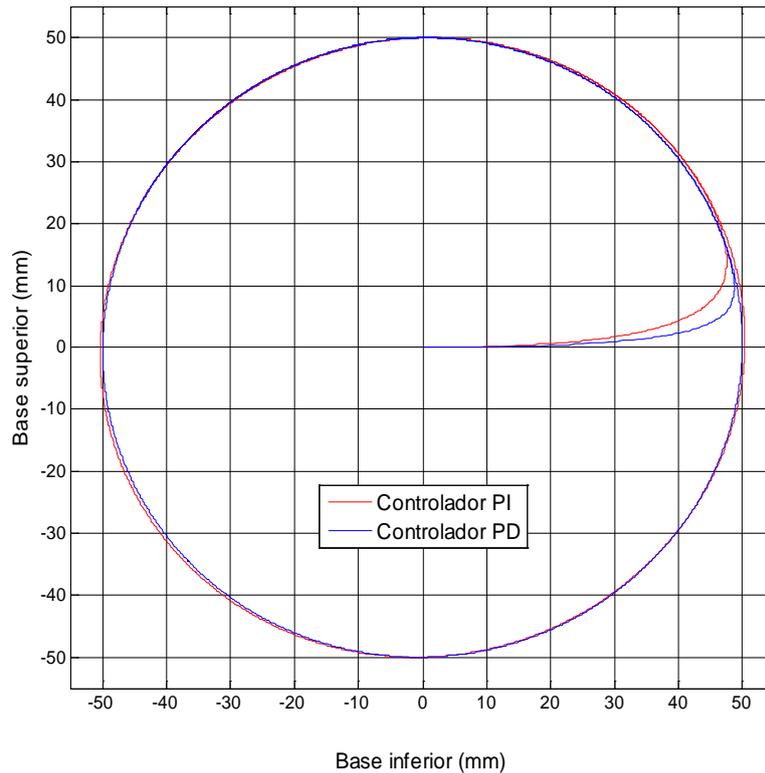


Figura 8. Circunferências descritas pela mesa de coordenadas para os controladores PD e PI

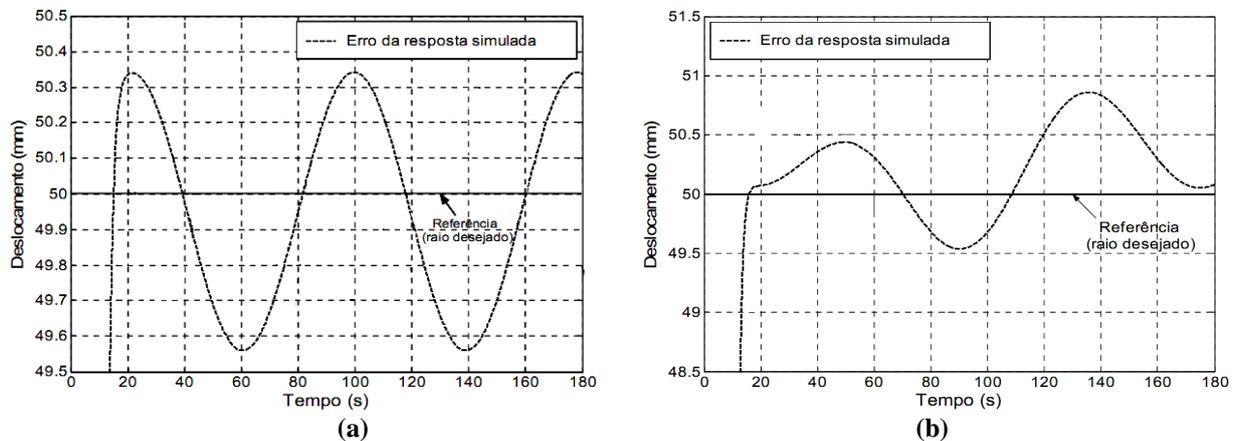


Figura 9. Erro de circularidade da circunferência traçada (a) pelo controlador PD e (b) pelo controlador PI

A Fig. 8 apresenta a comparação das respostas circulares obtidas pelos dois controladores atuando em suas respectivas bases da mesa de coordenadas. Pode-se verificar que ambos apresentam praticamente o mesmo resultado de exatidão quanto à fidelidade da resposta pretendida, a saber, uma trajetória circular. As curvas da Fig. 9 mostram a magnitude do erro de circularidade para os controladores PD e PI. No primeiro caso (a), o erro máximo é menor que 0,5mm ou 1%. No segundo caso (b) o erro máximo é menor que 1mm ou 2%.

É também possível observar que nas mudanças de quadrantes existe uma pequena faixa onde o sistema se desloca seguindo uma trajetória retilínea, que é mais acentuada no sistema sob a ação do controlador PI. Isto ocorre porque os erros de acompanhamento das trajetórias senoidal e cossenoidal são pequenos nestes pontos e o nível de tensão para acionar os motores de corrente contínua, responsáveis pelos deslocamentos das bases, é insuficiente para deslocá-las, uma vez que o sistema tem elevada inércia.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho objetivou principalmente a comparação de resultados da aplicação de técnicas de controle clássico para um sistema de mesa de coordenadas XY, a fim de que a mesma fosse capaz de traçar trajetórias circulares com o mínimo de erro e sem saturar a variável de controle. Baseou-se em dois trabalhos publicados anteriormente que usou um controlador PD e outro, PI.

Com relação ao acompanhamento de uma trajetória circular, o sistema sob as ações dos controladores PD e PI apresentou respostas satisfatórias. Ambos os controladores mostraram-se eficazes e robustos, traçando uma circunferência com baixo erro e sem saturação da variável de controle.

O controlador PI teve um bom desempenho, foi capaz de traçar uma trajetória circular proposta sem saturar a variável de controle e apresentou erro menor que 2% do raio.

O controlador PD com filtro também se saiu bem na resposta, com erro menor que 1% do raio. Também não violou o limite da saturação.

Desta forma, ambos atenderam as especificações de projeto propostas neste trabalho. O controlador com o melhor desempenho foi o PD com filtro devido ao menor erro de resposta entre os controladores comparados.

7. REFERÊNCIAS

- Aguirre, L. A., 2000. “Introdução a Identificação de Sistemas, Técnicas Lineares e Não – Lineares Aplicadas a Sistemas Reais”. UFMG, Belo Horizonte.
- Braga, C. S. “Project Controller Proportional-Integral for a Table XY Coordinate Method Through Guillemin-Truxal”. 22nd International Congress of Mechanical Engineering, COBEM 2013 – Ribeirão Preto – SP.
- Braga, C. S. “Projeto de um Controlador Proporcional Derivativo, com Filtro, Utilizando a Técnica de Alocação de Pólos”. In Proceedings of the National Congress of Mechanical Engineering- CONEM2006. Recife, Brazil.
- Caon Júnior, J. R., 1999, “Controladores PID Industriais com Sintonia Automática por Realimentação a Relé”. Dissertação de M., Sc., Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.
- Craig J. J., 1986, “Introduction to Robotics Mechanics & Control”, Standford University.
- D’azzo & J. J., Houpis, C. H., 1978. *Análise e Projeto de Sistemas de controle Lineares*. Ed. Guanabara Dois, S.A., Rio de Janeiro.
- Dorf, R. C. E Bishop, r. H., 1998. *Sistemas de Controle Modernos*. 8nd, LTC, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro.
- Jesus, G. A. R., 1999, “Uma Contribuição para o desenvolvimento e Controle de Sistemas de Posicionamento Submicrométricos”, D.Sc., Universidade de Santa Catarina.
- Júlio, E. F. X. (2010). “Controlador Fuzzy Aplicado a um Sistema de Controle Acionado por Motores de Indução Trifásicos”. Dissertação de Mestrado, UFPB, João Pessoa-PB.
- Lourenço, J., 1996, “Sintonia de Controladores PID”, Escola Superior de Tecnologia, Rio de Janeiro.
- Menezes Filho, J. B. “Controlador vetorial neural para mesa de coordenadas XY”. *Revista Controle & Automação*/Vol.21 no.4/Julho e Agosto 2010.
- Menezes Filho, J. B., 2007. “Controlador Neural Adaptativo para Mesa de Coordenadas”. Tese de Doutorado, UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.
- Riul, J. A., montenegro, P. H. M., et al., “Controle Adaptativo de Posição em uma Mesa de Coordenadas”. In *Proceedings of the SIMEC2006*, Araxá, Brazil.
- Noronha, J. L., barca, L. F. “Cálculo de Incerteza na Calibração de Máquinas de Medir Universa”. In *Proceedings of the II National Congress of Mechanical Engineering – CONEM2002* - João Pessoa, Brazil.
- Salsbury, J. G., 2000, “Máquinas de Medição de Coordenadas: testes, calibração e incerteza”. *Instrumentação Metrologia*, year II, N° 8, octuber, pp56-66.

COMPARATIVE ANALYSIS OF CONTROLLERS CLASSIC, PROPORTIONAL DERIVATIVE WITH FILTER AND PROPORTIONAL INTEGRAL, DESIGNED FOR A COORDINATED TABLE XY BY SIMULATED RESULTS

Cleonildo Soares Braga, cleonildosoares@ipojuca.ifpe.edu.br¹
Andrei Hudson Guedes Braga, andrei.cefet@yahoo.com.br¹
Daniel Filgueiras, daniel.filgueiras@gmail.com¹
Wilton Batista da Silva, wiltonbatista@ipojuca.ifpe.edu.br¹
Jesus Marlinaldo de Medeiros, jesus_medeiros@yahoo.com.br²

¹Instituto Federal de Pernambuco, Rodovia Pe 060, Bairro Jardim Califórnia, Ipojuca - PE

²Instituto Federal da Paraíba, Rodovia Br 230, Centro, Cabedelo – PB

Abstract: *Tables XY coordinates are present in modern industry. These machines are used in various situations, for example, in the manufacture of parts and measurement geometries. The xy tables have to move on with little error to be efficient. The objective of this study is to compare two classic controllers, PD with filter and PI. The table will travel a circular path and evaluated the error response and saturation of the control variable. The study was based on equations obtained from a real coordinates table. The results met the design specifications. The error and the robustness was satisfactory. The PD controller with filter had the best result.*

Keywords: *Classic Control, XY coordinates table , comparative analysis of performance.*