COINTER PDVGT 2021

V CONGRESSO INTERNACIONAL DE GESTÃO E TECNOLOGIAS

Edição 100% virtual | 01 a 03 de dezembro

ISSN:2596-0857 | PREFIXO DOI:10.31692/2596-0857

**ANÁLISE DO CONTROLE PID DE POSIÇÃO APLICADO A UM ROBÔ
CARTESIANO ELETROPNEUMÁTICO**

**ANÁLISIS DEL CONTROL PID DE POSICIÓN APLICADO A UN ROBOT
CARTESIANO ELECTROPNEUMÁTICO**

**ANALYSIS OF THE PID POSITION CONTROL APPLIED TO AN
ELETROPNEUMATIC CARTESIAN ROBOT**

Apresentação: Comunicação Oral

Lucas de Melo Araújo¹; Stanley Wilson Oliveira da Silva²; Alexander Patrick Chaves de Sena³; Asafe dos Santos Silva⁴

DOI: <https://doi.org/10.31692/2596-0857.VCOINTERPDVGT.0029>

RESUMO

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) para o posicionamento XY de um robô cartesiano eletropneumático, por meio de um método direto denominado Ziegler-Nichols, que permite o ajuste dos parâmetros do controlador sem a necessidade do conhecimento do modelo matemático do sistema. O conjunto é composto basicamente por três válvulas eletropneumáticas proporcionais e três cilindros pneumáticos, cada um com uma régua potenciométrica para realimentação do controlador em malha fechada. Para interface do computador com as válvulas e réguas potenciométricas foi utilizado o módulo de aquisição de dados NI USB-6289. O software LabVIEW[®] foi empregado para o desenvolvimento do controlador, e o Matlab[®] para analisar e apresentar os resultados experimentais. Sinais de referência do tipo degrau e imposição de distúrbios externos foram utilizados para a avaliação do desempenho do sistema para o controle de posição. Resultados experimentais apresentaram um erro máximo em regime permanente de 12,5% para um único deslocamento, enquanto que os demais resultados obtidos para os deslocamentos propostos neste trabalho não ultrapassaram o valor de 6%.

Palavras-Chave: controle de posição, robô Cartesiano, válvulas eletropneumáticas, cilindros pneumáticos.

RESUMEN

Este trabajo propone el desarrollo de un controlador PID (Proporcional-Integral-Derivado) para el posicionamiento XY de un robot cartesiano electroneumático, mediante un método directo llamado Ziegler-Nichols, que permite el ajuste de los parámetros del controlador sin necesidad de conocimientos matemáticos. modelo del sistema. El conjunto se compone básicamente de tres válvulas electroneumáticas proporcionales y tres cilindros neumáticos, cada uno con una regla potenciométrica para la retroalimentación del controlador de circuito cerrado. Para conectar la computadora con las válvulas y reglas potenciométricas, se utilizó el módulo de adquisición de datos NI USB-6289. Se

¹ Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco Campus Caruaru, luc.melo.araujo97@gmail.com

² Técnico em Mecatrônica, Instituto Federal de Pernambuco Campus Caruaru, stanley156w@gmail.com

³ Doutor, Instituto Federal de Pernambuco Campus Caruaru, alexander.sena@caruaru.ifpe.edu.br

⁴ Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco Campus Caruaru, asafesilva01@gmail.com

utilizó el software LabVIEW® para desarrollar el controlador y Matlab® para analizar y presentar los resultados experimentales. Se utilizaron señales de referencia de tipo escalonado y la imposición de perturbaciones externas para evaluar el rendimiento del sistema para el control de posición. Los resultados experimentales mostraron un error máximo en estado estacionario del 12,5% para un solo desplazamiento, mientras que los demás resultados obtenidos para los desplazamientos propuestos en este trabajo no superaron el valor del 6%.

Palabras Clave: control de posición, robot cartesiano, válvulas electroneumáticas, cilindros neumáticos.

ABSTRACT

This work proposes the development of a PID controller for the XY positioning of an electropneumatic Cartesian robot, by means of an empirical rule called Ziegler-Nichols, which allows the adjustment of the controller parameters without the need for knowledge of the mathematical model of the system. The set consists basically of three proportional electropneumatic valves and three pneumatic cylinders, each with a potentiometric ruler for feedback from the controller in closed loop. The NI USB-6289 data acquisition module was used to interface the computer with the potentiometric valves and rulers. LabVIEW® software was used to develop the controller, and Matlab® to analyze and present the experimental results. Reference signs of the step type and imposition of external disturbances were used to evaluate the performance of the system for position control. Experimental results showed a maximum error in permanent regime of 12.5% for a single proposed displacement, while the others did not exceed the value of 6%.

Keywords: position control, cartesian robot, electropneumatic valves, pneumatic cylinders.

INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, a abertura de mercados e o processo de globalização da economia têm levado o setor industrial a um novo padrão de concorrência (mercado cada vez mais competitivo e exigente em qualidade, custos e atendimento de prazos), onde as formas tradicionais de gestão e produção não são mais suficientes para garantir a lucratividade e a sobrevivência no meio (VALE, 2011). Visando o aumento de produtividade e padronização na qualidade de produtos, muitas indústrias têm buscado a automatização de sua produção baseada na utilização de robôs manipuladores para realização de tarefas pré-determinadas e repetitivas. Neste panorama, os robôs manipuladores estão sendo cada vez mais utilizados em atividades que envolvem precisão e alta velocidade (UNECE, 2004).

Nas indústrias de manufatura, a automação dos processos evolui de acordo com o progresso tecnológico da microeletrônica, das redes digitais e dos componentes mecânicos. No estágio atual de evolução tecnológica, pode-se citar a utilização de robôs industriais como uma das estratégias que mais se tem destacado, sendo objeto de um grande número de estudos e trabalhos científicos por se tratar de uma tecnologia com muitas perspectivas de mercado e de aprimoramentos (OLIVEIRA, 2007).

Por sua funcionalidade de posicionar objetos em posições estratégicas em um sistema de coordenadas espaciais, os robôs manipuladores cartesianos estão presentes em indústrias, onde o transporte e/ou posicionamento de alguns itens em pontos do processo fabril é exigido

com rapidez e precisão, em adição ao isolamento para não contaminação ou para diminuição de riscos ocupacionais de contato (VALE, 2011). Além disso, somada à crescente demanda de equipamentos de automação e controle de sistemas em ambientes industriais, há o aumento de políticas ambientais, sendo importante a realização de uma investigação sobre fontes de alimentação requeridas pelos robôs manipuladores, buscando uma utilidade não poluente (VALE, 2011). Assim, técnicas de controle para robôs cartesianos pneumáticos vêm sendo objeto frequente de estudos, pois são capazes de operar com rapidez, além de possuírem as vantagens de qualquer sistema pneumático, como a abundância de ar em ambientes sob condições normais, facilidade para transporte (por meio de tubulações), facilidade de armazenamento por serem compressíveis (através de reservatórios), e não possuem matéria-prima (ar, neste caso) poluente (VALE, 2011).

O controlador mais utilizado é sem dúvida do tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Este controlador é bastante popular em função de sua simplicidade e aplicabilidade em diversos sistemas. Disponível em praticamente todos os sistemas de controle e supervisão de plantas dinâmicas, este algoritmo apresenta teoria bastante explorada e difundida. Uma vantagem destes controladores, é que regras empíricas podem ser aplicadas, tais como Ziegler-Nichols, permitindo o ajuste dos parâmetros do controlador sem a necessidade do conhecimento do modelo matemático do sistema.

Apesar da maioria dos processos serem intrinsecamente não lineares, o uso deste tipo de controlador se baseia na consideração de que, em torno do ponto típico de operação, o sistema se comporta de maneira aproximadamente linear. Esta premissa funciona bem em grande parte dos processos, para uma determinada janela de tempo e operação, a partir da qual normalmente se faz necessária uma ressintonia do controlador (CARVALHO, 2010).

Vale (2011) apresentou projetos e a implementação de três controladores adaptativos preditivos auto ajustáveis, sendo um Controlador do tipo Preditivo Generalizado (GPC) convencional, um híbrido (GPC+PD) e um GPC com restrição da variável de controle, todos aplicados em um manipulador eletropneumático cartesiano de três GDL e três elos.

Em Ayadi et al. (2016) foi implementado um controlador robusto baseado na estratégia de modo deslizante adaptável (com ganho proporcional derivativo) para controlar a posição do sistema eletropneumático. Os parâmetros adaptativos foram obtidos com base na análise de estabilidade de Lyapunov para garantir a estabilidade do sistema.

Em Ferreira (2016) foi desenvolvido um controlador preditivo generalizado (GPC) adaptativo e um controlador proporcional integral derivativo (PID) convencional, em um robô manipulador planar de dois graus de liberdade (2 GDL) composto por um elo rotacional e

outro prismático. O autor apresentou um comparativo dos resultados entre os dois controladores implementados.

Silva et al. (2019) apresentou o desenvolvimento de um controlador Fuzzy tipo Mamdani para o posicionamento XY do mesmo robô cartesiano analisado neste trabalho, utilizando sinais de referência do tipo degrau para a avaliação do desempenho do sistema de controle.

Teixeira (2020) desenvolveu um sistema eletrônico para controle de servoposicionadores pneumáticos, baseado em sistemas de tempo real. Para validação da solução proposta, a arquitetura desenvolvida foi utilizada para o controle de um servoposicionador pneumático, na qual foram programados dois algoritmos: controle por modos deslizantes (Slide Mode Control) e o controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo).

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Válvula Proporcional

A válvula pneumática proporcional é destinada a comandos de precisão. Ela controla o sentido e a vazão do ar comprimido para dois diferentes sentidos, que na aplicação do servoposicionador são o avanço e recuo do cilindro de dupla ação sem haste (XAVIER e DO COUTO, 2013). A válvula proporcional é controlada por uma entrada de tensão com uma escala de zero até dez Volts. Quando a válvula proporcional recebe uma entrada de cinco volts, ela se posiciona no estado central, que é a sua posição de repouso, onde todas as vias estão bloqueadas, ou seja, a vazão de saída é igual à zero (XAVIER e DO COUTO, 2013).

As válvulas proporcionais possuem algumas características desfavoráveis para o controle de posição, como zona morta, histerese e erros de parada pra trás e pra frente. Neste tipo de válvula, dependendo da tecnologia de fabricação utilizada, existe uma região de zona morta que pode variar entre 0,5% e 10% a partir da região central, tanto para o sentido de avanço quanto para o de recuo (DE NEGRI, KINCELER e SILVEIRA, 1998). Na região de zona morta, representada na Fig.(01), a válvula está fechada, e o fluxo de ar não acontece em nenhuma direção. A histerese e os erros de parada pra trás e pra frente são relacionados entre si e acontecem devido ao solenoide proporcional, atrito e folgas da válvula. A histerese é a não linearidade característica da válvula proporcional que pode ser definida pela diferença entre saídas obtidas com a aplicação de um mesmo valor do sinal de entrada, quando o ciclo completo de sinal de entrada é concluído (DE NEGRI, KINCELER e SILVEIRA, 1998). Na Fig.(02) é apresentada a curva de histerese para uma válvula proporcional.

Figura 01: Curva característica da válvula proporcional.

Fonte: (XAVIER e DO COUTO, 2013).

Figura 02: Curva da histerese da válvula proporcional.

Fonte: (XAVIER e DO COUTO, 2013).

O erro de parada pra trás é o valor total do sinal de tensão de entrada que se faz necessário para gerar no sinal de saída uma mudança perceptível, quando a partir de um ponto de parada acontece uma mudança na direção da vazão gerada pela válvula (DE NEGRI, KINCELER e SILVEIRA, 1998). O erro de parada para frente é o valor que precisa ser incrementado no sinal de tensão de entrada para criar uma mudança perceptível do sinal de saída, quando acontece uma parada da válvula e depois a mesma continua o movimento na mesma direção (DE NEGRI, KINCELER e SILVEIRA, 1998).

Controlador PID

É interessante notar que mais da metade dos controladores industriais em uso atualmente emprega esquemas de controle PID ou PID modificado. Como a maioria dos controladores PID são ajustados em campo, diferentes tipos de regras de sintonia vêm sendo propostas na literatura. Com a utilização dessas regras de sintonia, ajustes finos no controlador PID podem ser feitos também em campo (OGATA, 2010). Além disso, métodos de sintonia automática vêm sendo desenvolvidos e alguns controladores PID têm a capacidade de fazer sintonia automática on-line. Estruturas PID modificadas, como o controle PID com vários graus de liberdade, atualmente estão em uso na indústria. Vários métodos práticos de comutação suave (de operação manual para operação automática) e ganho programado estão comercialmente disponíveis (OGATA, 2010).

Na área dos sistemas de controle de processos, sabe-se que os esquemas básicos de controle PID e os controles PID modificados provaram sua utilidade conferindo um controle satisfatório, embora em muitas situações eles possam não proporcionar um controle ótimo (OGATA, 2010). O esquema deste controlador é representado na Fig.(03).

Figura 03: Filosofia de controle clássico.

Fonte: (ABREU, 2020).

Segundo Ogata (2010) o controlador PID, como o próprio nome sugere, é uma técnica que combina as três ações de controle, proporcional, integral e derivativo. A combinação dessas ações fornece as vantagens individuais de cada uma das três técnicas, juntando todas em um único controlador. O funcionamento deste controlador discretizado é regido pela Eq.(01).

$$u(t) = K_p e(t) + u_i(kT) + K_i e(t)T + K_d(t) \frac{e(t) - e(kt)}{T} \quad (01)$$

Onde K_p é o ganho proporcional do sistema; K_i é o ganho integral do sistema; K_d é o ganho derivativo do sistema; T é o tempo de amostragem; $e(t)$ é o erro atual do sistema; $e(kT)$ é o erro no instante anterior ao atual; $u_i(kT)$ é o valor integral no instante anterior ao atual e $u(t)$ é a saída PID propriamente dita do sistema. T_d é o tempo de diferenciação definido por $(K_d T)/K_p$ e T_i é o tempo de integração definido por $(K_p T)/K_i$.

Se um modelo matemático da planta pode ser obtido, então é possível aplicar várias técnicas de projeto na determinação dos parâmetros do controlador que atenderão às especificações do regime transitório e do regime permanente do sistema de malha fechada. Contudo, se a planta for muito complexa, de modo que seu modelo matemático não possa ser obtido facilmente, então a abordagem analítica do projeto do controlador PID não será possível. Temos então de recorrer a abordagens experimentais de sintonia de controladores PID (OGATA, 2010). O processo de selecionar parâmetros do controlador que garantam dada especificação de desempenho é conhecido como sintonia do controlador. Ziegler e Nichols sugeriram regras para a sintonia de controladores PID (o que significa ajustar os valores de K_p , T_i e T_d) baseadas na resposta experimental ao degrau ou no valor de K_p que resulta em uma estabilidade marginal, quando somente uma ação proporcional é utilizada. Estas regras sugerem um conjunto de valores de K_p , T_i e T_d que vão proporcionar uma operação estável do sistema (OGATA, 2010). Contudo, o sistema resultante pode exibir um sobressinal máximo grande na resposta do degrau, o que é inaceitável. Nesse caso, precisamos fazer uma série de sintonias finas até que um resultado aceitável seja obtido. De fato, as regras de sintonia de Ziegler-Nichols fornecem estimativas dos valores dos parâmetros e proporcionam um ponto de partida na sintonia fina, e não os valores definitivos de K_p , T_i e T_d logo na primeira tentativa (OGATA, 2010).

Ziegler e Nichols propuseram regras para a determinação de valores do ganho proporcional K_p , do tempo integral T_i e do tempo derivativo T_d , baseadas nas características da resposta transitória de dada planta. Essa determinação dos parâmetros dos controladores PID ou de sintonia dos controladores PID pode ser feita por engenheiros de campo, por meio de experimentos com a planta. Existem dois métodos denominados regras de sintonia de Ziegler-Nichols: o primeiro e o segundo método (OGATA, 2010).

METODOLOGIA

Malha de Controle Implementada

Em um sistema de malha fechada, o sinal atuante de erro, que é a diferença entre o sinal de entrada (setpoint) e o sinal de retroação (sinal de saída), excita o controlador de modo a reduzir o erro e trazer o valor do sinal de saída para o valor desejado, sendo a realimentação uma característica necessária. A realimentação do sistema ocorre através dos transdutores para deslocamento linear, que retornam ao controlador o sinal analógico de tensão, que representa a associação tensão/deslocamento linear. Desta forma, a instrumentação é responsável por garantir que os dados referentes à realimentação do sistema possam chegar corretamente ao controlador.

Observando o fato de os modelos dos elos serem desacoplados, para realizar o controle de posição é possível desenvolver duas malhas de controle fechadas, distintas e independentes para cada eixo, conforme o diagrama apresentado na Fig.(04) (representação da malha em vermelho para o eixo X e em azul para o eixo Y). Uma malha de controle (apenas um sinal de controle) foi utilizada para a movimentação dos dois conjuntos válvula-cilindro-régua. Os dois conjuntos eletromecânicos do eixo Y foram ajustados para haver sincronização nos deslocamentos.

Figura 04: Diagrama de blocos do sistema de controle.

Fonte: autoria própria.

Montagem Experimental

A bancada de testes utilizada neste trabalho é apresentada na Fig.(05), composta por: um robô manipulador eletropneumático (1), uma fonte variável de corrente contínua (2), um módulo de aquisição de dados, NI USB-6289 (3) e um computador com o software Labview®

(4). O robô manipulador eletropneumático de dois graus de liberdade (2GDL) é composto por dois elos paralelos. Esse robô é, portanto, cartesiano e possui duas juntas prismáticas, resultando num movimento composto de duas translações, cujos eixos de movimento são coincidentes com um sistema de referência cartesiano XY. Desta forma os modelos dos elos são desacoplados.

Figura 05: Bancada de testes do robô eletropneumático.

Fonte: autoria própria.

O sistema funciona da seguinte forma: o compressor fornece ar comprimido para as válvulas eletropneumáticas proporcionais (FESTO® 5/2 vias da série MPYE) de tensão de 24 VCC e sinais de controle analógicos em tensão de 0 a 10 VCC, que acionam os cilindros pneumáticos de dupla ação e haste simples (FESTO® série DGPL geração B de 25/450mm), dando o movimento ao órgão efetuator. Ambos os eixos, X e Y, possuem 400 mm de curso.

No computador a implementação da lei de controle do robô foi realizada através de programas computacionais desenvolvidos nas plataformas Labview® e Matlab®. O compressor da SHULZ, modelo MSL 10 ML/175, fornece o ar comprimido que aciona as válvulas proporcionais eletropneumáticas através dos dutos de condução dos fluxos de ar.

Uma fonte variável de corrente contínua (32VCC/6A), Tektronix® PWS 2326, é o equipamento utilizado para alimentar a válvula proporcional a uma tensão de 24 VCC, além das tensões auxiliares de alimentação dos transdutores de posição potenciométricos em 10 VCC. Dois conjuntos válvula-cilindro-régua foram utilizados para movimentação do eixo Y e um conjunto para eixo X. Na instrumentação do sistema, um módulo multifuncional de dados

é utilizado para enviar sinais de controle para as válvulas eletropneumáticas proporcionais e adquirir os sinais medidos pelas réguas potenciométricas (FESTO® série MLO de 25/450 mm). O módulo de aquisição de dados (DAQ) utilizado, NI USB-6289, possui 48 I/O digitais, 4 saídas analógicas (2.86 MS/s) e 32 entradas analógicas (18 bits, 625 kS/s) com níveis programáveis de aquisição por canal, e tensões variando de $\pm 0,1V$ até $\pm 10V$.

Para converter a tensão (em volts) medida em cada régua potenciométrica para o valor do deslocamento em milímetros, procedeu-se da seguinte forma: posicionaram-se os cursores dos cilindros em diversas posições ao longo dos seus percursos (com intervalos de 10 mm), medindo-os com réguas milimetradas e obtendo seus valores em volts (em software e multímetro). Com os dados de tensão e deslocamento, realizaram-se ajustes de curvas em software Matlab e foram obtidas as Eq.(02) e Eq.(03).

$$x_{mm} = 0,0018x^5 - 0,0457x^4 + 0,4355x^3 - 1,9684x^2 + 50,3106x - 3,4695 \quad (02)$$

$$y_{mm} = -0,0013x^5 + 0,0333x^4 - 0,3322x^3 + 1,5581x^2 - 49,3730x + 427,1495 \quad (03)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados foram coletados com um programa em Labview® e os gráficos gerados a partir de um script no Matlab®. Nestes gráficos, a resposta (dada em milímetros) equivale ao deslocamento do robô no eixo citado. Para determinar os valores do ganho e período críticos das regras de sintonia de Ziegler-Nichols, foram realizados testes no robô levando em conta os deslocamentos de 100, 200 e 300 mm. O procedimento foi o mesmo para os eixos X e Y do robô cartesiano. Os valores de ganho e período críticos obtidos estão resumidos na Tab.(01). Com estes valores, foi possível estimar os ganhos para os controladores P, PI e PID utilizando o segundo método de Ziegler e Nichols. Todos os valores calculados se encontram na Tab.(02) para o eixo X e na Tab.(03) para o eixo Y.

Tabela 01: Valores críticos para o sistema cartesiano XY do robô.

Eixo X		Eixo Y	
$K_{cr,x}$	$P_{cr,x}$	$K_{cr,y}$	$P_{cr,y}$
1,8	0,35s	1,1	0,41s

Fonte: autoria própria.

Tabela 02: Ganhos dos controladores P, PI e PID para o eixo X.

	K_p	T_i	T_d
P	0,9	0	0
PI	0,81	0,292	0
PID	1,08	0,175	0,044

Fonte: autoria própria.

Tabela 03: Ganhos dos controladores P, PI e PID para o eixo Y.

	K_p	T_i	T_d
P	0,55	0	0
PI	0,495	0,342	0
PID	0,66	0,205	0,051

Fonte: autoria própria.

Na implementação dos controladores percebeu-se a influência negativa do ganho derivativo sobre o desempenho do sistema, que pode ser esclarecido pela sua não linearidade. Neste sentido, o sistema não atingiu o regime permanente com o PID, sendo apresentado na sequência apenas os resultados dos controladores P e PI.

Resultados com o Controlador Proporcional (P)

Considerando uma trajetória que passe pelos pontos definidos anteriormente, foram gerados os gráficos dos deslocamentos em X e Y do robô cartesiano com um controlador proporcional em ação, utilizando o ganho proporcional calculado anteriormente. Os gráficos são apresentados nas Fig.(06) e Fig.(07). A resposta temporal está resumida na Tab.(04), em que: T_r é o tempo de subida; T_a é o tempo de atraso; T_s é o tempo de acomodação; M_o é o sobressinal percentual (*overshoot*); e_{ss} é erro percentual em regime permanente.

Figura 06: Deslocamento no eixo X com controlador P.

Fonte: autoria própria.

Figura 07: Deslocamento no eixo Y com controlador P.

Fonte: autoria própria.

Tabela 04: Resposta temporal para o controlador P conforme Ziegler e Nichols.

	Eixo X			Eixo Y		
Deslocamento (mm)	10 - 100	10 - 200	10 - 300	10 - 100	10 - 200	10 - 300
T_r (s)	0,258	0,546	0,745	0,173	0,316	0,488
T_a (s)	0,289	0,518	0,689	0,174	0,318	0,432
T_s (s)	0,748	0,749	0,975	2,066	0,777	0,632
M_o (%)	10,28	4,21	3,95	17,13	14,11	9,33
e_{ss} (%)	1,90	1,81	1,15	9,01	5,15	0,60

Fonte: autoria própria.

Resultados com o Controlador Proporcional Integral (PI)

Ainda considerando o mesmo trajeto utilizado no controlador P, foram gerados os gráficos dos deslocamentos em X e Y do robô cartesiano com um controlador proporcional integral em ação, considerando os ganhos encontrados. Os gráficos são apresentados nas Fig.(08) e Fig.(09). A resposta temporal na Tab.(05).

Figura 08: Deslocamento no eixo X com controlador PI.

Fonte: autoria própria.

Figura 09: Deslocamento no eixo Y com controlador PI.

Fonte: autoria própria.

Tabela 05: Resposta temporal para o controlador PI conforme Ziegler e Nichols.

	Eixo X			Eixo Y		
Deslocamento (mm)	10 - 100	10 - 200	10 - 300	10 - 100	10 - 200	10 - 300
T_r (s)	0,857	4,561	1,966	1,428	0,345	0,522
T_a (s)	0,143	0,347	1,705	0,143	0,290	0,404
T_s (s)	1,231	0,404	1,734	0,171	0,347	0,462
M_o (%)	45,28	26,76	48,30	36,38	21,38	16,65
e_{ss} (%)	34,46	30,23	48,48	31,77	6,80	23,11

Fonte: autoria própria.

Ajustes Finos no Controlador Selecionado

Foi observado, conforme o segundo método de Ziegler e Nichols, e demonstrado nos tópicos anteriores, que o melhor resultado dentre os controladores foi o do tipo proporcional (P), pois no geral apresenta menores valores de sobressinal e erro em regime permanente. Isso pode ser explicado pela não linearidade do sistema, que não segue uma lógica temporal linear em relação à vazão de ar comprimido.

Porém, o controlador proporcional apresentado, mesmo estando dentro do sobressinal máximo proposto pela teoria de Ziegler e Nichols (25%), ainda possui um valor de 17,13% no eixo Y, para o deslocamento de 10 mm a 100 mm, o que pode ser considerado alto para diversas aplicações.

Isso significa dizer que se este robô, com este controlador e este deslocamento, fosse utilizado para uma solda em chapas grossas de aço, teria 17,13 mm de solda em uma região indesejada da chapa. Neste caso, é preferível um maior erro em regime permanente do que um sobressinal elevado, pois o erro pode ser compensado pelo operador. Tendo isto em mente, tornou-se necessária uma alteração manual do ganho proporcional, a partir dos valores obtidos anteriormente e do método de ajuste fino.

Após os ajustes terem sido efetuados, tomando como referência os valores obtidos segundo Ziegler e Nichols, foi observado que a ação da gravidade no eixo Y tornou inviável a ação de um único controlador para este eixo, então foram adotados dois ganhos proporcionais diferentes, sendo um para o movimento de descida ($K_{p,y\text{low}}$) e outro de subida ($K_{p,y\text{up}}$). Os novos ganhos são apresentados na Tab.(06).

Tabela 06: Ganhos do controlador proporcional (P) para os eixos X e Y após ajustes.

$K_{p,x}$	$K_{p,y,low}$	$K_{p,y,up}$
0,51	0,15	0,37

Fonte: autoria própria.

Os resultados após os ajustes para o eixo X é representado na Fig.(10), e sua resposta temporal na Tab.(07).

Figura 10: Deslocamento no eixo X com controlador P ajustado.

Fonte: autoria própria.

Tabela 07: Resposta temporal no eixo X com controlador P ajustado.

Deslocamento (mm)	Eixo X		
	10 - 100	10 - 200	10 - 300
T_r (s)	0,231	0,463	0,663
T_a (s)	0,231	0,459	0,606
T_s (s)	1,582	0,666	0,920
M_o (%)	2,77	0,696	0,680
e_{ss} (%)	0,66	0,942	0,477

Fonte: autoria própria.

O resultado para o controlador proporcional no movimento de descida no eixo Y é apresentado na Fig.(11). A Tab.(08) apresenta a resposta temporal para este controlador.

Figura 11: Deslocamento 10 a 300 mm no eixo Y com controlador P ajustado para descida.

Fonte: autoria própria.

Tabela 08: Resposta temporal no eixo Y com controlador P ajustado para descida.

Deslocamento (mm)	Eixo Y (descida)		
	10 - 100	10 - 200	10 - 300
T_r (s)	1,360	0,926	0,693
T_a (s)	0,408	0,315	0,402
T_s (s)	1,008	0,838	1,151
M_o (%)	3,15	4,19	2,95
e_{ss} (%)	3,49	1,52	1,31

Fonte: autoria própria.

O resultado para o controlador proporcional no movimento de subida no eixo Y é apresentado na Fig.(12). A Tab.(09) apresenta a resposta temporal para este controlador.

Figura 12: Deslocamento 300 a 10 mm no eixo Y com controlador P ajustado para subida.

Fonte: autoria própria.

Tabela 09: Resposta temporal no eixo Y com controlador P ajustado para subida.

Deslocamento (mm)	Eixo Y (subida)		
	100 - 10	200 - 10	300 - 10
T_r (s)	1,521	0,347	0,602
T_a (s)	0,229	0,345	0,544
T_s (s)	0,317	0,547	0,889
M_o (%)	10,96	5,39	3,39
e_{ss} (%)	12,50	5,82	3,62

Fonte: autoria própria.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada uma análise da aplicação de controladores PID para o posicionamento XY de um manipulador cartesiano composto por atuadores pneumáticos proporcionais. A avaliação foi realizada através de critérios de desempenhos, observando bandas operacionais onde o sistema se comportava de forma aproximadamente linear.

Os resultados demonstram que as ações derivativas e integrais, mesmo com ganhos pequenos, promovem grandes alterações no desempenho do sistema, e neste sentido, os erros em regime permanente foram maiores quando comparados à aplicação da ação proporcional pura.

A partir do ajuste fino aplicado apenas ao controlador proporcional, foi possível observar o desempenho em curtos (100 a 10 mm) e longos deslocamentos (300 a 10 mm),

bem como na movimentação do eixo Y nos sentidos de subida e descida. O ajuste dos ganhos buscou o menor valor de sobressinal e erro em regime permanente. O ajuste proporcionou uma melhora significativa nos sobressinais dos deslocamentos propostos, com exceção do deslocamento de 100 mm a 10 mm no eixo Y para o movimento de subida, onde o sobressinal atingiu o valor de aproximadamente 11%. Todos os outros valores não ultrapassaram 5,5%, considerando os dois eixos. Com relação ao erro em regime permanente, o valor máximo obtido após os ajustes foi de 12,5%, para o deslocamento de 100 mm a 10 mm no eixo Y para o movimento de subida, enquanto que os demais não passaram do valor de 6%.

Neste sentido é possível concluir que a aplicação dos controladores convencionais só apresentaram resultados satisfatórios, em relação ao erro em regime permanente, quando a máquina opera realizando longos deslocamentos, tanto no eixo X quanto em Y. Em relação ao eixo Y, apenas os movimentos de descida apresentaram resultados satisfatórios. Esta conclusão está baseada na comparação dos resultados com o trabalho de Ferreira (2016), que implementou um controlador PID convencional em um dispositivo semelhante, obtendo um erro máximo em regime de 2,534% e sobressinal máximo de 20,331%.

REFERÊNCIAS

ABREU, J.L.M.C. et al. Embedded System for the Position Control of a Low-Cost Linear Delta Linear Robot. In: Congresso Internacional de Gestão e Tecnologia do Programa Despertando Vocações, 2020, Virtual. **Anais do IV COINTER PDVGT**. Recife: Editora IIDV, 2020. v. 1.

AYADI, A. et al. Robust Control of Electropneumatic Actuator Position via Adaptive Sliding Mode Approach. 17th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), Sousse, pp. 520-525, 2016.

CARVALHO, J.S.F. Controle Adaptativo Aplicado em um Robô Manipulador de Dois Graus de Liberdade Planar. **Tese** (Doutorado em Engenharia Mecânica). UFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2010.

DE NEGRI, V.J.; KINCELER, R.; SILVEIRA, J. **Automação em Controle Experimental em Hidráulica e Pneumática**. 109 f. Pós Graduação (Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 1998.

FERREIRA, G.S. Controle PID Convencional e GPC Adaptativo Aplicados em um Robô Manipulador Planar. João Pessoa, 2016. **Dissertação** (Engenharia Mecânica). Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPB, 2016.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**, 5ª ed., São Paulo - SP, Ed. Pearson, 2010.

OLIVEIRA, M.F. Projeto de um Robô Cartesiano com Acionamento Pneumático. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Mecânica), UFRS, Porto Alegre – RS, Brasil, 2007.

SILVA, A.S. et al. Fuzzy Position Control Applied To Electropneumatic Cartesian Robot. In: III Congresso Internacional do PDVGT, 2019, Recife. **Anais** do III Congresso Internacional do PDVGT, 2019.

TEIXEIRA, C.L. Arquitetura Microcontrolada Programável Em Tempo Real Aplicada ao Controle de um Servoposicionador Pneumático. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Mecânica). UFRS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2020.

UNECE. Worldwide Growth in the Period 2004-2007, Technical report, United Nations Economic Commission for Europe – World Robotics, 2004.

VALE, V.A.C. Controle de Posição de um Robô Cartesiano por Meio de Técnicas Adaptativas. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Mecânica), UFPB, João Pessoa – PB, Brasil, 2011.

XAVIER, R.S.; DO COUTO, I.P. **Sistema de Controle de Posicionamento de Peças Utilizando a Pneumática Proporcional**. 73 f. Graduação (Engenharia Mecânica). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2013.