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

LÓGICA FUZZY APLICADA AO CONTROLE DE POSIÇÃO DE UM ROBÔ DELTA

LÓGICA FUZZY APLICADA AL CONTROL DE POSICIÓN DE UN ROBOT DELTA

FUZZY LOGIC APPLIED TO THE POSITION CONTROL OF A DELTA ROBOT

Apresentação: Comunicação Oral

Asafe dos Santos Silva¹; Acarcio Gomes de Almeida Junior²; Guilherme Lins Rigaud³; Alexander Patrick Chaves de Sena⁴

DOI: <https://doi.org/10.31692/2596-0857.VCOINTERPDVGT.0026>

RESUMO

O interesse no estudo e na utilização de robôs no meio industrial vem aumentando de forma significativa devido à capacidade destes em realizar inúmeras tarefas com maior velocidade, precisão e qualidade em relação ao trabalho manual. Diante disto, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um controlador Fuzzy tipo Mamdani para o posicionamento de um robô paralelo tipo delta linear no espaço de trabalho. O sistema é composto de três sistemas posicionadores acionados por motores de corrente contínua com encoders incrementais para leitura da posição. Uma placa de aquisição de dados realizou a interface entre o computador e a planta, captando os sinais provenientes dos encoders e fornecendo os sinais de controle às placas de potência que acionam os motores. O software LabVIEW[®] foi empregado para a implementação do controlador, utilizando o toolkit de lógica Fuzzy, e o Matlab[®] para analisar e apresentar os resultados experimentais. Para verificar o comportamento do sistema com os controladores de posição, foram realizados dois ensaios: o primeiro com o propósito de testar o sistema em várias distâncias, e o segundo com o objetivo de testar o controle baseado na transformação das coordenadas do efetuador final nas posições dos carros de movimentação através do modelo cinemático inverso. Os resultados demonstraram que a metodologia utilizada obteve bons índices de desempenho. Na análise da curva de resposta do sistema e dos dados obtidos a partir desta, foi verificado desempenho muito satisfatório do controlador, com erro de regime permanente abaixo de 0,5% e sobressinal abaixo de 0,1%, além de um tempo de assentamento máximo de 3,3 s para as maiores distâncias aplicadas em relação aos carros transportadores, com velocidades de até 150 mm/s.

Palavras-Chave: controle fuzzy, arquitetura paralela, modelamento matemático, robô delta, sistema de posicionamento.

RESUMEN

El interés por el estudio y uso de robots en el entorno industrial ha aumentado significativamente

¹ Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco Campus Caruaru, asafesilva01@gmail.com

² Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco Campus Caruaru, acarciojunior@gmail.com

³ Técnico em Mecatrônica, Instituto Federal de Pernambuco Campus Caruaru, glr@discente.ifpe.edu.br

⁴ Doutor, Instituto Federal de Pernambuco Campus Caruaru, alexander.sena@caruaru.ifpe.edu.br

devido a su capacidad para realizar numerosas tareas con mayor rapidez, precisión y calidad en comparación con el trabajo manual. Por tanto, el presente trabajo presenta el desarrollo de un controlador Fuzzy tipo Mamdani para el posicionamiento de un robot paralelo tipo delta lineal en el espacio de trabajo. El sistema está compuesto por tres sistemas posicionadores accionados por motores de corriente continua con encoders incrementales para lectura de posición. Una placa de adquisición de datos hizo la interfaz entre la computadora y la planta, capturando las señales provenientes de los codificadores y proporcionando las señales de control a las placas de potencia que accionan los motores. Se utilizó el software LabVIEW® para implementar el controlador, utilizando el kit de herramientas de lógica difusa, y Matlab® para analizar y presentar los resultados experimentales. Para verificar el comportamiento del sistema con los controladores de posición, se realizaron dos pruebas: la primera con el propósito de probar el sistema a varias distancias, y la segunda con el objetivo de probar el control en base a la transformación de las coordenadas del efector final en las posiciones de los carros de movimiento a través del modelo cinemático inverso. Los resultados mostraron que la metodología utilizada tuvo buenos índices de desempeño. En el análisis de la curva de respuesta del sistema y los datos obtenidos del mismo, se verificó un desempeño muy satisfactorio del controlador, con error de estado estacionario por debajo de 0,5% y sobreseñal por debajo de 0,1%, además de un tiempo de estabilización máximo de 3,3 s para las distancias más largas aplicadas en relación a los coches de transporte, con velocidades de hasta 150 mm/s.

Palabras Clave: control difuso, arquitectura paralela, modelado matemático, robot delta, sistema de posicionamiento.

ABSTRACT

The interest in the study and use of robots in the industrial environment has increased significantly due to their ability to perform numerous tasks with greater speed, precision and quality compared to manual work. Therefore, the present work presents the development of a Mamdani-type Fuzzy controller for the positioning of a linear delta-type parallel robot in the workspace. The system is composed of three linear positioner systems driven by direct current motors with incremental encoders for position reading. A data acquisition module made the interface between the computer and the machine, capturing the signals coming from the encoders and providing the control signals to the power boards that drive the motors. The LabVIEW® software was used to implement the controller, using the Fuzzy logic toolkit, and Matlab® to analyze and present the experimental results. To verify the behavior of the system with the position controllers, two tests were carried out: the first with the purpose of testing the system at various distances, and the second with the objective of testing the control based on the transformation of the coordinates of the final effector in the positions of the movement cars through the inverse kinematic model. The results showed that the methodology used had good performance indices. In the analysis of the response curve of the system and the data obtained from it, a very satisfactory performance of the controller was verified, with steady state error below 0,5% and oversignal below 0,1%, in addition to a settling time maximum 3,3 s for the longest distances applied in relation to transport cars, with speeds of up to 150 mm/s.

Keywords: fuzzy control, parallel architecture, mathematical modeling, delta robot, positioning system.

INTRODUÇÃO

O momento tecnológico industrial dos últimos anos está intimamente relacionado aos conceitos da Indústria 4.0. Todas essas mudanças são fruto da necessidade da automação da manufatura e a implementação de redes inteligentes que se associam para controlar de forma autônoma toda uma cadeia de produção. Esse fenômeno tem definido os fatores de competitividade do mercado, onde cada vez mais se têm buscado soluções para aperfeiçoar os processos e aumentar a capacidade produtiva. É justamente no contexto deste cenário que o desenvolvimento de manipuladores robóticos, como atuadores finais desta rede inteligente de

controle, tem se tornado um dos grandes investimentos das indústrias.

Tendo em vista essa necessidade, o estudo dos manipuladores robóticos tem atraído muita atenção na academia e na indústria. A literatura os classifica em diferentes categorias de acordo com alguns critérios, tais como: mobilidade da base, tipo de acionamento, graus de liberdade, estrutura cinemática, geometria do espaço de trabalho, entre outros. Olhando pelo ponto de vista da estrutura cinemática, pode-se classificar um manipulador robótico como de arquitetura serial, paralela ou híbrida. Como afirma Tomei (2014), em máquinas seriais, as partes móveis e os atuadores são dispostos em sequência, uma depois da outra, formando um único “membro” móvel. Já nas máquinas paralelas, mais de uma cadeia cinemática liga a base fixa à plataforma móvel formando um mecanismo de circuito fechado. Segundo Carvalho e Ceccarelli apud Almeida (2018a), as arquiteturas paralelas despertam grande interesse por apresentar uma boa rigidez associada à exatidão do posicionamento, possuindo capacidade de carga maior que as tradicionais arquiteturas seriais. Além disso, estes dispositivos podem operar com grandes velocidades sem apresentar os mesmos níveis de problemas inerciais que as arquiteturas seriais. Quando comparadas às estruturas seriais, as paralelas possuem espaço de trabalho menor em relação ao volume total da estrutura, entretanto, ela pode ser instalada sobre o posto de trabalho, não ocupando espaço no chão de fábrica. Merlet (2006), citado por Tomei (2014) comenta que desde então, robôs com essa arquitetura vêm conquistando espaço na indústria em diversas aplicações tais como carregamento de cargas, posicionamento de peças, simuladores de voo até aplicações na medicina.

Devido a sua funcionalidade de posicionar objetos em pontos estratégicos de um sistema de coordenadas espaciais, o desenvolvimento dos controladores de posição e trajetória é de extrema importância para garantir a qualidade, constância e consistência na produção. Associado ao controle de posição/trajetória está o modelo cinemático da estrutura, que é responsável por determinar as coordenadas das articulações correspondentes a uma configuração específica do efetuador e vice-versa, sendo considerada como uma análise direta quando o posicionamento da plataforma móvel é determinado a partir do deslocamento dos motores, e inversa, quando o deslocamento dos motores é determinado pela localização da plataforma móvel. Para uma arquitetura paralela, a cinemática inversa é uma tarefa matematicamente simples, e pode ser realizada pela observação geométrica. A obtenção das equações cinemáticas dos mecanismos paralelos requer a análise de cada cadeia, relacionando os ligamentos com a plataforma móvel e a base fixa (ALMEIDA, 2018a).

Depois de realizado o processo de transformação das coordenadas espaciais para as variáveis que atuarão diretamente nos atuadores, um controlador se faz necessário com a

função de minimizar ao máximo a defasagem entre a posição desejada e a posição medida que é causada pelo movimento em conjunto das juntas e elos da máquina, rejeitando as possíveis perturbações externas e realizando os ajustes solicitados.

Simões e Shaw (2007) comentam que o enfoque utilizado tradicionalmente na engenharia de controle, através dos controladores clássicos, é o de se obter um modelo idealizado do processo a ser controlado, geralmente na forma de equações diferenciais. Para a obtenção de tais modelos matemáticos, algumas simplificações precisam ser feitas, causando sérias dificuldades para o controle, pois as descrições matemáticas ficam às vezes longe da realidade do processo a ser controlado.

Como uma das alternativas aos controladores clássicos, utilizam-se estratégias de controle moderno. Dentre elas, estão os controladores baseados em lógica fuzzy, que pertencem ao grupo dos controladores baseados em inteligência artificial por representar um novo paradigma dentro da engenharia de controle. A lógica fuzzy fornece um método inovador para a manipulação de informações imprecisas através de um método que pode traduzir expressões verbais qualitativas, comuns na comunicação humana, em valores numéricos, possibilitando assim, a inclusão da experiência de operadores humanos nos controladores computadorizados e dispensando o conhecimento do modelo matemático da planta a ser controlada.

Este tipo de controlador dispensa o modelamento da planta e passa a tentar identificar a forma como o operador controla o sistema. Dessa forma, o controlador fuzzy, baseado no modelo do operador humano, torna-se um modelo lógico da forma com que ele raciocina ao manipular o sistema.

Segundo Campos e Saito (2004), uma das grandes vantagens do controle fuzzy é que ele pode reduzir consideravelmente o tempo de desenvolvimento de um controlador não-linear para um sistema complexo, além das vantagens decorrentes do fato de ser uma tecnologia fácil de ser implementada em tempo real, de ser comprovadamente robusta em aplicações práticas e de ser capaz de controlar processos complexos e multivariáveis.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Análise Cinemática

As técnicas de análise cinemática de manipuladores de robôs seguem diversas metodologias distintas como as apresentadas em Almeida (2018b) e Lin, Luo e Lin (2015). Neste trabalho a metodologia seguida será uma abordagem geométrica, calculando as coordenadas espaciais de alguns pontos estratégicos do robô, em relação a um referencial

fixo, para definir um conjunto de equações que relacionam o deslocamento dos atuadores (A, B e C) e a posição espacial do efetuador (F). Na Fig.(01) é apresentado um esquema do robô com os pontos de interesse de uma das cadeias cinemáticas.

Os pontos com subíndice 1 representam o ponto de contato entre a base fixa inferior e o carro de movimentação; os pontos com subíndice 2 representam o ponto de contato entre a base fixa superior e o carro de movimentação. Os pontos com subíndices 3 e 4 são referências imaginárias que representam o offset entre o fuso do carro de movimentação e a posição da haste. Já os pontos com subíndice 5 correspondem ao ponto de contato entre a base móvel e a haste.

Figura 01: Representação esquemática do robô paralelo.

Fonte: Autoria Própria.

A cadeia cinemática respectiva a cada atuador do robô será representada pelas letras A, B e C, onde cada atuador está defasado em $\pm 120^\circ$ em relação aos outros. Através da Fig.(01) é possível observar que as três cadeias cinemáticas compartilham o mesmo ponto F, que é o ponto do efetuador final do robô. A base fixa inferior e a base móvel tem, respectivamente, raios R1 e R2. A origem do sistema foi tomada no ponto central da base fixa inferior e a cadeia A está alinhada ao eixo X. Dessa forma, tem-se que:

$$F = [x, y, z]^T \quad (1)$$

$$A_1 = [R_1, 0, 0]^T \quad (2)$$

$$B_1 = M_z(120^\circ) \cdot A_1 \quad (3)$$

$$C_1 = M_z(240^\circ) \cdot A_1 \quad (4)$$

$$A_2 = A_1 + [D \cdot \cos(45^\circ), 0, D \cdot \sin(45^\circ)]^T \quad (5)$$

$$B_2 = M_z(120^\circ) \cdot A_2 \quad (6)$$

$$C_2 = M_z(240^\circ) \cdot A_2 \quad (7)$$

onde M_z é a matriz de rotação em torno do eixo Z; x , y e z são as coordenadas da posição final desejada; D é o comprimento útil do curso do carro de movimentação.

Para encontrar o ponto A_3 , que está à uma distância E de A_1 , foi calculado um vetor unitário (v) na direção A_1A_2 e este mesmo vetor, rotacionado em 90° no eixo Y pela matriz de rotação M_y . Assim, tem-se que:

$$v = M_y(90^\circ) \cdot [E \cdot (A_2 - A_1)/D] \quad (8)$$

$$A_3 = v + A_1 \quad (9)$$

$$B_3 = M_z(120^\circ) \cdot A_3 \quad (10)$$

$$C_3 = M_z(240^\circ) \cdot A_3 \quad (11)$$

$$A_4 = v + A_2 \quad (12)$$

$$B_4 = M_z(120^\circ) \cdot A_4 \quad (13)$$

$$C_4 = M_z(240^\circ) \cdot A_4 \quad (14)$$

$$A_5 = F + [R_2, 0, 0]^T \quad (15)$$

$$B_5 = F + M_z(120^\circ) \cdot [R_2, 0, 0]^T \quad (16)$$

$$C_5 = F + M_z(240^\circ) \cdot [R_2, 0, 0]^T \quad (17)$$

Para o desenvolvimento do controlador de posição é necessário recorrer à cinemática inversa, para que, através da posição desejada do efetuador sejam determinados os deslocamentos dos carros de movimentação. A estratégia adotada para relacionar a posição do efetuador com os deslocamentos foi encontrar a intersecção entre a reta formada pelos pontos A_3 e A_4 e uma casca esférica com centro em A_5 e raio sendo o comprimento H da haste A_5A .

A mesma ideia deve ser aplicada aos sistemas de movimentação B e C.

A equação da reta formada pelos pontos A_3 e A_4 parametrizada em t é:

$$[x, y, z]^T = A_3 + t \cdot (A_4 - A_3) \quad (18)$$

E a equação da casca esférica é:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = H^2 \quad (19)$$

onde, $[x_0, y_0, z_0]^T = A_5$.

Resolvendo a intersecção entre as equações (18) e (19) para t e voltando o resultado para a Eq.(18), encontram-se as coordenadas do ponto que o carro de movimentação deverá estar posicionado. Por fim, para calcular o deslocamento linear do carro, basta calcular a

distância entre os pontos A_3 e A .

Esta análise cinemática foi escolhida pela facilidade de compreensão e implementação em software, não apresentando problemas com performance, e por não necessitar de condições iniciais como alguns métodos iterativos para solução de sistemas de equações não-lineares.

Controlador Fuzzy

Os controladores Fuzzy foram implementados pelo método Mamdani através do “VI (Virtual Instrument) Controlador de Lógica Fuzzy” disponível no Fuzzy Logic Toolkit do software Labview[®]. De acordo com os princípios dos sistemas Fuzzy de serem baseados na experiência e nos padrões de raciocínio dos operadores humanos, o modelamento dos controladores foi realizado a partir de um estudo prévio e experimental do comportamento desejado para os regimes transitório e permanente dos carros transportadores.

Inicialmente, as funções de pertinência e regras fuzzy foram baseadas nas sugestões de Simões e Shaw (2007) e nos trabalhos de Júlio (2010) e Silva (2019), mas posteriormente foram modificadas a partir do conhecimento adquirido do comportamento da máquina nos testes realizados.

Simões e Shaw (2007) afirmam que um sistema Fuzzy do tipo Mamdani pode ser construído utilizando os blocos de fuzzificação, base de conhecimento e defuzzificação. A etapa de fuzzificação consiste em associar o valores numéricos de entrada do sistema à termos linguísticos; a base de conhecimento inclui a base de dados ou funções de pertinências linguísticas (funções ou tabelas que representam cada termo linguístico) e um conjunto de regras fuzzy que representam a estratégia de controle; e a defuzzificação é a etapa na qual obtém-se um valor discreto a partir de valores fuzzy de saída obtidos. Na Fig.(02), é apresentado um diagrama de blocos de um sistema de inferência fuzzy.

Assim como em Silva (2019), no bloco de fuzzificação foi criada uma variável linguística denominada “Erro”, que representa o desvio entre o valor desejado de posição e a posição atual do atuador, com um universo de discurso no intervalo $[-500, 500]$, em milímetros. A variável “Erro” foi composta por cinco funções de pertinência com os termos linguísticos denominados: Negativo Grande (NG), Negativo Pequeno (NP), Quase Zero (QZ), Positivo Pequeno (PP) e Positivo Grande (PG).

Na defuzzificação foi criada uma variável linguística denominada Saída, representando o sinal de controle que atuará nos motores; com o universo de discurso no intervalo $[-100, 100]$ (valor percentual do sinal que é enviado). Para tal, foram associadas

também cinco funções de pertinência, definidas pelos termos NG, NP, Zero (Z), PP e PG. Neste trabalho foi utilizado o método de defuzzificação de Centro de Área (CoA).

Figura 02: Diagrama de controle fuzzy tipo Mamdani.

Fonte: Silva (2019).

Na Tab.(01) são apresentados os parâmetros de cada função de pertinência.

Tabela 01: Parâmetros das funções de pertinência fuzzy.

Variável linguística	Termo linguístico	Formato	Pontos
<i>Erro</i>	NG	Trapézio	[-500; -500; -60; -20]
	NP	Triângulo	[-60; -20; 0]
	QZ	Triângulo	[-3; 0; 3]
	PP	Triângulo	[0; 20; 60]
	PG	Trapézio	[20; 60; 500; 500]
<i>Saída</i>	NG	Trapézio	[-100; -100; -20; -10]
	NP	Triângulo	[-20; -10; 0]
	Z	Triângulo	[-3; 0; 3]
	PP	Triângulo	[0; 10; 20]
	PG	Trapézio	[10; 20; 100; 100]

Fonte: Autoria própria.

As regras dos controladores Fuzzy, apresentadas na Tab.(02), são do tipo “SE <condição> ENTÃO <conclusão>”, e foram elaboradas de acordo com o conhecimento do funcionamento do sistema.

Tabela 02: Tabela de regras fuzzy dos controladores fuzzy.

SE erro = <NG> ENTÃO saída = <NG>
SE erro = <NP> ENTÃO saída = <NP>
SE erro = <QZ> ENTÃO saída = <Z>
SE erro = <PP> ENTÃO saída = <PP>
SE erro = <PG> ENTÃO saída = <PG>

Fonte: Autoria própria.

O uso da lógica fuzzy permitiu o modelamento da curva de controle seguindo a forma como um operador poderia controlar o sistema. Para erros absolutos acima de 60 mm, o sistema permanece na velocidade máxima, o que era atingido com aproximadamente 60% do sinal de atuação. Abaixo desse valor de erro, o sistema foi modelado para diminuir a velocidade de forma suave até atingir uma velocidade suficientemente baixa para minimizar os efeitos inerciais na frenagem.

METODOLOGIA

Os três sistemas posicionadores (carros A, B, e C) do robô Delta são uma associação de componentes mecânicos tais como fusos, guias, mancais e rolamentos. Os sistemas de posicionamento apresentam um curso útil de 500 mm em guias tipo BR 15, com estrutura confeccionada em alumínio. Os fusos são de esferas padrão SFU1605 com passo de 5 mm e diâmetro de 16 mm, apresentando uma precisão de 0,08mm. Como sensor de posição, foram utilizados os encoders incrementais 5326-2222-0100 da Hohner®, que permitem uma resolução de 100 Pulsos/volta. Com base no passo dos fusos (5 mm) é possível relacionar cada estado gerado nos encoders, ao deslocamento dos sistemas lineares.

Os conversores A/D e D/A (Analogico/Digital e Digital/Analogico) utilizados são do módulo de aquisição (DAQ) NI USB-6353 que se comunica com o software Labview®. O DAQ apresenta 4 saídas analógicas com 2,86 MS/s, 16-bit de resolução, com sinais variáveis e programáveis de $\pm 5VCC$. Apresenta também 48 entradas digitais para leitura dos sensores de fim de curso, e 4 contadores/temporizadores de 32 bits para leitura dos encoders. Para realizar o acionamento dos motores, utilizaram-se placas de potência EM-176 da Electromen, baseadas em Pontes-H.

Foram utilizados motores de corrente contínua da Ignis Motors® (MR20A-024150) de 24VCC e 8A (150W e 2000 RPM) para realizar o acionamento de fusos com esferas recirculantes. A Fig.(03) apresenta o robô paralelo construído.

Figura 03: Estrutura do robô delta construído.

Fonte: Autoria Própria.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para verificar o comportamento do sistema com os controladores de posição, foram realizados dois ensaios: o primeiro com o propósito de testar o sistema em várias distâncias, e o segundo com o objetivo de testar o controle baseado na transformação das coordenadas do efetuador final nas posições dos carros de movimentação através do modelo cinemático inverso.

Espaço de Coordenadas dos Carros Transportadores

Neste ensaio os carros foram submetidos simultaneamente a sinais do tipo degrau com diferentes amplitudes, com o intuito de avaliar o desempenho do controlador para várias distâncias. Inicialmente os carros estavam na referência de -10 mm (O “zero máquina” foi considerado no ponto superior do curso) e os sinais aplicados foram de -50, -100, -200, -300 e -450 mm como é apresentado na Fig.(04). O primeiro sinal degrau aplicado no sistema foi com uma amplitude de 40 mm no sentido descendente, partindo da referência de -10 mm, e

após 4s foi aplicada a mesma amplitude no sentido ascendente, retornando à posição inicial. Na Fig.(05) são apresentadas as curvas da resposta e do sinal de referência do carro A para esta situação.

Figura 04: Resposta do sistema para distâncias diferentes.

Fonte: Autoria Própria.

Figura 05: Curvas de resposta e de referência degrau de 40 mm.

Fonte: Autoria Própria.

Assim como em Silva (2019), através destas curvas, foi possível obter alguns parâmetros das respostas nos regimes transitórios e permanentes, que são importantes para a análise do desempenho do controlador. Na Tab.(03) são apresentados o tempo de subida T_r

(tempo necessário para a resposta passar de 10% a 90% do valor de referência), o tempo de atraso T_d (tempo necessário para a resposta atingir pela primeira vez a metade do valor de referência), o tempo de acomodação T_s (tempo necessário para o sistema alcançar e permanecer dentro de um limite aceitável), o sobressinal M_p (valor percentual máximo da resposta em relação ao sinal de referência) e erro de regime permanente e_{ss} (erro que o sistema apresenta após o tempo de acomodação) para as distâncias de 40 mm e 440 mm.

Tabela 03: Índices de desempenho dos controladores.

Parâmetro analisado	Distâncias percorridas		Distâncias percorridas	
	-40 mm	40 mm	-440 mm	440 mm
T_r (s)	0,417	0,475	2,487	2,441
T_d (s)	0,349	0,400	1,752	1,726
T_s (s)	0,841	1,009	3,267	3,201
M_p (%)	0,000	0,000	0,034	0,060
e_{ss} (%)	0,428	0,320	0,400	0,384

Fonte: Autoria própria.

Espaços de Coordenadas do Efetuador

Neste ensaio os carros também foram submetidos a sinais do tipo degrau, porém o sinal de cada carro foi calculado através da cinemática inversa, que recebe as coordenadas no espaço tridimensional (XYZ) e calcula as posições correspondentes a cada carro de movimentação (ABC), que por sua vez são aplicados aos controladores de posição.

Inicialmente o sistema foi posicionado nas coordenadas cartesianas (0, 0, -395) mm. As posições aplicadas foram (-200, -200, -600), (200, -200, -600), (200, 200, -600), (-200, 200, -600) e, novamente, (-200, -200, -600) mm para fechar o ciclo, formando um quadrado com aresta de 200 mm.

No espaço dos carros transportadores (ABC), o sistema iniciou com as coordenadas (-0.5750, -0.5750, -0.5750) mm. As posições calculadas foram, respectivamente aos pontos em XYZ, (-310.647, -252.651, -46.104), (-96.047, -340.406, -174.422), (-96.047, -174.422, -340.406), (-310.647, -46.104, -252.651), e por fim retornou à posição (-310.647, -252.651, -46.104). Todos esses pontos foram calculados pela cinemática inversa em tempo real pelo software. Na Fig.(06) é apresentado o comportamento no espaço de coordenadas do efetuador

durante o percurso.

Figura 06: Curvas de referência e da resposta do efetuator final.

Fonte: Autoria própria.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado o controle de posição utilizando lógica fuzzy para um robô delta linear. A utilização da lógica fuzzy no Labview[®] permitiu o modelamento do controlador sem a necessidade de cálculos matemáticos complexos. Na análise da curva de resposta do sistema e dos dados obtidos a partir desta, foi verificado desempenho muito satisfatório do controlador, com erro de regime permanente abaixo de 0,5% e sobressinal abaixo de 0,1%, além de um tempo de assentamento máximo de 3,3 s para as maiores distâncias aplicadas em relação aos carros transportadores, com velocidades de até 150 mm/s. Como sugestão de trabalho futuro, propõe-se o desenvolvimento de um controlador de seguimento de trajetória, para ampliar ainda mais as possibilidades de aplicações práticas do sistema.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA JÚNIOR, A.G. et al. Desenvolvimento e Controle de Robô Delta para Manipulação Industrial. In: II Congresso Internacional de Gestão e Tecnologias, João Pessoa. **Anais do II COINTER PDVGT**, 2018a.

ALMEIDA JÚNIOR, A.G. et al. Modelamento Matemático e Otimização do Espaço de Trabalho para Robô Paralelo Delta. In: II Congresso Internacional de Gestão e Tecnologias, João Pessoa. **Anais do II COINTER PDVGT**, 2018b.

CAMPOS, M.M. e SAITO, K. 2004. **Sistemas Inteligentes em Controle e Automação de**

Processos. Rio de Janeiro, Editora Ciência Moderna.

JÚLIO, É.F.X. Controlador Fuzzy Aplicado a um Sistema de Controle de Posição Acionado por Motores de Indução Trifásicos. **Dissertação** (Engenharia Mecânica), UFPB, João Pessoa - PB, Brasil. 2010.

LIN, J.; LUO, C-H. e LIN, K-H. Design and Implementation of a New Delta Parallel Robot in Robotics Competitions. In International Journal of Advanced Robotic Systems, Int J Adv Robot Syst, 2015, 12:153 | doi: 10.5772/61744.

MERLET, J.P. **Parallel Robots**. 2 ed. Netherlands, Springer, 2006.

SILVA, A.S. Controle de Posição Fuzzy Aplicado a Robô Cartesiano Eletropneumático. III Congresso Internacional de Gestão e Tecnologias, Recife. **Anais** do III COINTER PDVGT, 2019.

SIMÕES, M.G. e SHAW, I.S. **Controle e Modelagem Fuzzy**. Editora Blucher, 2ª ed. São Paulo, 2007.

TOMEI, G.P.S. Desenvolvimento de um protótipo de um robô de cinemática paralela do tipo delta para impressão tridimensional de peças. **Monografia** (Engenharia de Controle e Automação), Universidade do Vale do Taquari, Lajeado - RS, Brasil. 2014.