COINTER PDVGT 2020

IV CONGRESSO INTERNACIONAL DE GESTÃO E TECNOLOGIAS

Edição 100% virtual | 02 a 05 de dezembro

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

**SISTEMA EMBARCADO PARA O CONTROLE DE POSIÇÃO DE UM ROBÔ
PARALELO TIPO DELTA LINEAR DE BAIXO CUSTO**

**SISTEMA EMPOTRADO PARA EL CONTROL DE POSICIÓN DE UN ROBOT
LINEAL DELTA LINEAL DE BAJO COSTE**

**EMBEDDED SYSTEM FOR THE POSITION CONTROL OF A LOW-COST LINEAR
DELTA LINEAR ROBOT**

Apresentação: Comunicação Oral

José Lucas Moreira Cavalcanti de Abreu¹; Asafe dos Santos Silva²; João Manoel Freitas Souza³; Alexander Patrick Chaves de Sena⁴

DOI: <https://doi.org/10.31692/2596-0857.IVCOINTERPDVGT.0072>

RESUMO

O presente trabalho apresenta um sistema embarcado para o controle de posição de um robô paralelo com aplicação para acabamentos mecânicos. Anteriormente a máquina operava através do suporte computacional utilizando um dispositivo de alto custo. Dessa forma, com a substituição do aparato de processamento, sem a perda qualitativa, é possível estimar uma maior acessibilidade ao sistema concebido. Foi selecionada para a realização do trabalho a plataforma de software livre Arduino Due. O dispositivo controlado possui três bases manipuladas, com 300 mm de curso útil. Cada base é acionada por um motor de corrente contínua (CC) e um encoder, com resolução de 400 pulsos por volta. É utilizada a técnica de controle PID, com base no método Ziegler-Nichols de definição paramétrica. Para a melhor visualização, de forma gráfica, e definição dos dados empregados no sistema, desenvolveu-se um programa supervisor por meio da linguagem Java, que permite ao usuário definir os ganhos proporcionais, derivativos e integradores, bem como visualizar em tempo real a resposta sistemática perante aos parâmetros aplicados. Ao término do trabalho, pode-se verificar um erro atuante máximo nos carros de aproximadamente 2,86%, obtendo por fim um dispositivo mais barato, com eficiência compatível com a original.

Palavras-Chave: controlador PID; controle de posição; robô paralelo; sistema embarcado.

RESUMEN

El presente trabajo presenta un sistema embebido para el control de posición de un robot paralelo con aplicación para acabados mecánicos. Anteriormente, la máquina operaba mediante soporte computacional utilizando un dispositivo de alto costo. Así, con la sustitución del aparato de procesamiento, sin pérdida cualitativa, es posible estimar una mayor accesibilidad al sistema diseñado. La plataforma de software libre Arduino Due fue seleccionada para realizar el trabajo. El dispositivo controlado tiene tres bases manipuladas, con 300 mm de recorrido útil. Cada base es accionada por un motor de corriente continua (CC) y un codificador, con una resolución de 400 pulsos por revolución.

¹ Técnico em Mecatrônica, Instituto Federal de Pernambuco Campus Caruaru, josedabreu83@gmail.com

² Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco Campus Caruaru, asafesilva01@gmail.com

³ Técnico em Mecatrônica, Instituto Federal de Pernambuco Campus Caruaru, josouza749@gmail.com

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

Se utiliza la técnica de control PID, basada en el método de definición paramétrica de Ziegler-Nichols. Para la mejor visualización, gráfica y definición de los datos utilizados en el sistema, se desarrolló un programa supervisor en lenguaje Java, que permite al usuario definir las ganancias proporcionales, derivadas e integradores, así como visualizar la respuesta en tiempo real. sistemático ante los parámetros aplicados. Al final del trabajo se puede comprobar un error máximo activo en los coches de aproximadamente 2,86%, obteniendo finalmente un dispositivo más económico, con eficiencia compatible con el original.

Palabras Clave: Controlador PID, control de posición, robot paralelo, sistema empotrado.

ABSTRACT

The present work presents an embedded system for the position control of a parallel robot with application for mechanical finishes. Previously, the machine operated through computational support using a high-cost device. Thus, with the replacement of the processing apparatus, without qualitative loss, it is possible to estimate greater accessibility to the designed system. The free software platform Arduino Due was selected to carry out the work. The controlled device has three manipulated bases, with 300 mm of useful stroke. Each base is driven by a direct current motor (DC) and an encoder, with a resolution of 400 pulses per revolution. The PID control technique is used, based on the Ziegler-Nichols method of parametric definition. For the best visualization, in graphic format, and definition of the data used in the system, a supervisory program was developed through the Java language, which allows the user to define proportional, derivative and integrating gains, as well as to visualize in real time, the systematic response to the applied parameters. At the end of the work, a maximum active error in the cars of approximately 2,86% can be verified, finally obtaining a cheaper device, with efficiency compatible with the original.

Keywords: PID controller; position control; parallel robot; embedded system.

INTRODUÇÃO

Considerando o atual crescimento na demanda por produtos, as indústrias estão passando por um período de grandes investimentos nas linhas de produção, geralmente atuando na aplicação de robôs manipuladores (CORREIA, 2018). Estas máquinas podem realizar uma série de tarefas com maior velocidade, precisão e qualidade que o homem, além de aumentarem de uma maneira significativa a produção. Inicialmente os robôs foram desenvolvidos para a execução de tarefas humanas, e neste sentido, deviam ter uma boa manobrabilidade e bom espaço de trabalho, mas a relação da capacidade de carga com o seu peso era baixa (ALMEIDA JUNIOR, 2018a). Em termos mecânicos, os manipuladores seriais são constituídos por atuadores nas suas partes móveis, implicando em massas e momentos de inércia relativamente altos. Na sua maioria um atuador é fixo à base, sendo que os demais são embarcados, ocasionando no aumento de inércia das partes móveis. Além disso, cada junta suporta a massa das demais e dos segmentos subsequentes. Nessas condições a rigidez do sistema é comprometida, acarretando em uma menor precisão e capacidade de posicionamento (SILVA et. al., 2020). Por isso, para garantir um mínimo de rigidez ao sistema, os elementos devem ser volumosos e pesados, comprometendo o comportamento dinâmico da estrutura serial. Um conceito importante é a complacência de um robô. Em geral o efetuator de um robô serial quando submetido a forças e torques externos sofre pequenas

modificações em sua posição devido a uma folga dos atuadores, vibração de seus componentes ou deformação em seus links, entre outros. Essas grandezas não podem ser quantificadas por sensores internos do robô e por isso não podem ser corrigidas pela malha de controle, daí o nome complacência passiva (SILVA, et al., 2019).. Em diversas aplicações na indústria como, por exemplo, em máquinas ferramentas, essa complacência é uma característica indesejada. Erros nas juntas até o órgão terminal, somados à flexibilidade da estrutura, comprometem à precisão do conjunto robótico (SILVA, et al., 2019).

Robôs paralelos são mecanismos com cadeias fechadas que apresenta vantagens frente aos robôs seriais quanto à rigidez, precisão/velocidade de posicionamento e razão peso/carga (SENA, SILVA e SILVA, 2017). Nos manipuladores paralelos, todos os atuadores são montados próximos à base, possibilitando assim uma possível redução da massa nas suas partes móveis, implicando que os manipuladores paralelos apresentam características dinâmicas melhores em relação aos seriais (SILVA et. al., 2020). Suas principais desvantagens, no entanto, referem-se ao espaço de trabalho limitado e à maior complexidade de seus componentes mecânicos (SENA, SILVA e SILVA, 2017). O interesse pelos robôs paralelos ocorreu como uma alternativa para os problemas de pouca capacidade de carga e rigidez que tinham os robôs de configuração serial (SENA, SILVA e SILVA, 2017). Para controlar esse sistema de forma que o mesmo seja capaz de imitar movimentos específicos, é essencial conhecer quais são suas características cinemáticas e dinâmicas, suas limitações espaciais e finalmente de que forma podem ser controlados os diferentes atuadores para realizar as diferentes trajetórias planejadas. Cadeias cinemáticas fechadas possuem, em geral, rigidez mais elevada que as estruturas com cadeias abertas, e a deformação proveniente da complacência passiva é facilmente medida no efetuador (SILVA et. al., 2020). Dentre as diferentes aplicações de sistemas de posicionamento modernos utilizando dispositivos robóticos paralelos podemos destacar: simuladores de voo, máquinas ferramentas, manipuladores cirúrgicos, sistemas de locomoção bípedes, entre outros. O presente documento visa propor a concepção de um sistema embarcado para o controle de um robô paralelo tipo delta de baixo custo, que pode ser visualizado na Fig.(01).

Recentemente algumas pesquisas foram publicadas descrevendo o uso da arquitetura paralela para concepção de robôs específicos, tais como: Sena, Silva e Silva (2017), Almeida Júnior et al. (2018a), Almeida Júnior et al. (2018b) e Silva et. al. (2020).

A técnica de controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo) consiste em calcular um valor de atuação sobre o processo a partir das informações de um valor desejado de posição, por exemplo, e do valor real da variável obtido por um sistema de medição. A

possibilidade dos robôs paralelos operarem com altas acelerações e alta exatidão gerou a necessidade do desenvolvimento de sistemas de controle de alto desempenho (SILVA et. al., 2020). Os controladores de alto desempenho podem ser implementados em sistemas computadorizados ou embarcados. Os denominados “sistemas embarcados” ou “embutidos” são sistemas microprocessados de funcionalidades específicas (QUEIROZ, 2015), o que os distingue dos computadores convencionais, os quais são utilizados para propósito geral.

Figura 01: Robô paralelo delta linear de baixo custo.

Fonte: Própria (2020).

Em Almeida Júnior et al. (2018b), a mesma máquina foi controlada por meio de sistema computadorizado (alto custo) composto pelo módulo multifuncional de aquisição NI USB-6353 da National instruments®, desktop e supervisor em Labview®, entretanto, para caracterizar um baixo custo para o produto final, visa-se através do presente trabalho embarcar a solução por meio de microcontrolador, tornando assim o sistema mais acessível. O dispositivo tem sido utilizado para realização do acabamento de puído em jeans. O puído é um processo abrasivo de desgaste das fibras e do tecido, sendo muito usado para imitar o efeito de desgaste natural que a roupa passa a apresentar com o tempo de uso. Usualmente o efeito desfiado ou rasgado nos jeans é obtido utilizando uma retífica manual, ocasionando uma falta de padronização dos produtos. Neste sentido, o trabalho se enquadra no processo de obtenção de uma solução para a diminuição das não conformidades nos acabamentos mecânicos da indústria confeccionista. Os resultados obtidos com o sistema computadorizado permitiu um erro de posicionamento de 2,50%, considerado aceitável para a aplicação de acabamentos. Com a substituição do sistema de controle, objetiva-se um erro de posicionamento menor que 5%.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O objetivo básico de um sistema de controle consiste em aplicar sinais adequados na entrada do processo de modo a que o sinal de saída satisfaça certas especificações e/ou apresente um comportamento particular. O sistema a ser controlado geralmente chamado de processo ou planta é o dispositivo ou fenômeno que se deseja atuar com alguma finalidade, sendo este representado por uma variável de entrada, uma variável de saída e uma relação (função de transferência) entre as duas variáveis. A entrada do processo é chamada de variável de controle ou variável manipulada, e a saída do processo é chamada de variável controlada ou variável de processo. Um distúrbio ou perturbação é caracterizado por um sinal que tende a afetar de modo adverso o valor da variável de saída de um sistema.

Neste contexto, um Sistema de Controle em Malha Aberta (SCMA) consiste em aplicar um sinal de controle pré-determinado, esperando-se que ao final de um determinado tempo a variável controlada atinja um determinado valor ou apresente um determinado comportamento, sendo que neste tipo de sistema não são utilizadas informações sobre evolução do processo para determinar o sinal de controle a ser aplicado em um determinado instante. Por outro lado, no controle em malha fechada, informações sobre como a saída de controle está evoluindo a partir de uma realimentação, são utilizadas para determinar o sinal de controle que deve ser aplicado ao processo em um instante específico. O sinal de saída é comparado com um sinal de referência e o desvio (erro) entre estes dois sinais é utilizado para determinar o sinal de controle que deve efetivamente ser aplicado ao processo. Assim, o sinal de controle é determinado de forma a corrigir este desvio entre a saída e o sinal de referência. O dispositivo que utiliza o sinal de erro para determinar ou calcular o sinal de controle a ser aplicado à planta é chamado de controlador ou compensador (DORF, 2018).

Uma vantagem dos sistemas de controle a malha fechada é o fato de que o uso da retroação torna a resposta do sistema relativamente insensível a perturbações externas e a variações internas de parâmetros do sistema, sendo possível à utilização de componentes baratos e sem muita exatidão para obter o controle preciso de um determinado processo, o que não é possível com o controle à malha aberta. Entretanto, do ponto de vista da estabilidade, é mais fácil construir sistemas a malha aberta porque a estabilidade destes sistemas é menos problemática. Por outro lado, a estabilidade em sistemas de controle a malha fechada é sempre um grande problema pela tendência em corrigir erros além do necessário, o que pode ocasionar oscilações de amplitude constante ou crescente com o tempo. Deve-se enfatizar

que, para sistemas onde as entradas são conhecidas antecipadamente no tempo e não há distúrbios é aconselhável o uso de controle a malha aberta.

Inserido na malha de controle fechada, o controlador determina um sinal de erro comparando o valor de saída da planta com uma referencia de entrada. A partir desse erro, determina um sinal de controle para reduzir o erro à zero ou a um valor aceitável, do ponto de vista da utilização do sistema controlado.

As malhas convencionais de controle têm sido utilizadas na maioria dos processos automatizados no meio industrial nos últimos 50 anos. Entre os motivos pode-se mencionar: estrutura simples, robustez, reduzido número de parâmetros configurados, conhecimento intuitivo sobre o desempenho destas técnicas de controle, e requerimento mínimo de conhecimento matemático e técnico. Entretanto, na teoria de controle convencional, os objetivos de projeto dos controladores são fixos e definidos pelo projetista. Consequentemente, a abordagem convencional de controle é limitada para muitas situações complexas, devido ao fato que estas requerem algumas formas de autonomia e as estratégias convencionais de controle oferecem um número reduzido de graus de liberdade. Estas complexidades caracterizam processos com modelos matemáticos “pobres”, elevados níveis de ruído, rigorosos índices de desempenho, presença de não-linearidades, sensores distribuídos e a necessidade da tomada de decisões.

Para obtenção de modelo matemático da planta, com o objetivo de se projetar o controlador, inicialmente é realizado o processo de identificação da planta, podendo ser usados métodos como caixa preta, branca e cinza. Desse modo, o projeto do controlador é realizado a partir das especificações desejadas para um bom desempenho do sistema. Apesar da realimentação manter estabilidade para futuras variações e incertezas do sistema, algumas variações são tão amplas e com efeitos significativos sobre o comportamento dinâmico que um ganho de realimentação linear e com coeficientes constantes é incapaz de fornecer a flexibilidade necessária para atender às especificações de desempenho. Sendo assim, passa a ser necessário medir continuamente estas variações e então ajustar devidamente os parâmetros de controle (“ganhos não-lineares”). A Fig. (02) apresenta o diagrama de blocos típico de uma estrutura de controle clássico.

Figura 02: Filosofia de controle clássico.

Fonte: Própria (2020).

Segundo Ogata (2015) 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 período 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.

Este controlador é bastante popular em função de sua simplicidade e aplicabilidade em diversos sistemas. Outra 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. Uma das dificuldades na implementação do controle PID, é a sintonização experimental dos valores dos ganhos proporcional, integral e derivativo. 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 resintonia do controlador.

METODOLOGIA

A metodologia para este trabalho foi estruturada em algumas etapas, conforme apresentado na Fig.(03).

Figura 03: Metodologia para o projeto do controle do robô Delta.

Fonte: Própria (2020).

A fim de substituir o sistema computadorizado para uma alternativa barata e eficiente, decidiu-se embarcar o controle PID através de um microcontrolador, selecionado a partir de testes de aquisição dos dados dos sensores, averiguando-se a velocidade na qual os dados eram processados e os valores de posição, em comparação com o sistema computadorizado. A plataforma open source Arduino Due, foi utilizada como novo componente computacional operante para o controle dos parâmetros PID, dispositivo esse que possui: processador ATMEL SAM3X8E (32 bits), 54 entradas e saídas digitais, 12 entradas analógicas, 84 MHz de frequência de clock, 512 KB de memória Flash, 96 KB de memória SRAM, 54 portas com interrupção, 12 saídas PWM. Outras plataformas foram testadas, como Arduino Mega, não obtendo êxito nas leituras. O microcontrolador é o hardware responsável pelas entradas e saídas de sinais nos processos de medição e controle por meio de sistemas embarcados.

Os elementos funcionais de um sistema de aquisição embarcado são comumente os sensores e transdutores, os cabos de ligação, o condicionamento de sinal (quando necessário), o conversor A/D e o algoritmo de aquisição. A Fig.(04) apresenta o diagrama esquemático da aquisição de sinais de um fenômeno físico para controle por meio de um sistema embarcado.

Figura 04: Diagrama funcional de um sistema de aquisição por sistema embarcado.

Fonte: Própria (2020).

Nos encoders incrementais com código Gray, a frequência dos pulsos determina a velocidade do eixo, e a quantidade de pulsos, a partir de um referencial, determina o deslocamento angular, fornecendo a distância linear percorrida. O processo de conversão de um código Gray para binário é realizado repetindo o bit mais significativo, e o valor do bit menos significativo é o resultado da operação lógica “ou exclusivo”, entre os dois bits Gray. O processo de conversão de um número binário em decimal é realizado multiplicando-se cada bit binário pela base do sistema (base dois), elevado à posição que ocupa da direita para esquerda, iniciando-se do índice zero. A contagem decimal primária se limita a representação dos quatro estados possíveis nos encoders. Para varrer todo o conjunto de valores decimais inteiros, foi implementado um algoritmo de incremento ou decremento unitário. Os encoders incrementais adquiridos (A38S6-400-2-2-24) permitem uma resolução de 400 Pulsos/volta, gerando na combinação dos dois canais, um código Gray de 1600 estados/volta. Com base no passo dos fusos (5mm) é possível relacionar cada estado gerado nos encoders, ao deslocamento dos sistemas lineares (calculado em 0,003125 mm/pulso).

A Fig.(05) apresenta o hardware do sistema de aquisição montado para todo o conjunto robótico.

Figura 05: Detalhamento do hardware de aquisição montado.

Fonte: Própria (2020).

O sistema de acionamento permite o comando e ajuste da rotação dos motores de Corrente Contínua (motores de CC) por meio de circuitos drivers (circuitos de potência). Os

SISTEMA EMBARCADO PARA O CONTROLE DE POSIÇÃO DE UM ROBÔ PARALELO

circuitos drivers recebem sinais PWM dos controladores PID implementados em linguagem C. A Fig.(06) apresenta o diagrama de blocos do sistema de acionamento.

Figura 06: Diagrama funcional do sistema de acionamento de acionamento.

Fonte: Própria (2020).

O sinal de saída do microcontrolador (sinal de controle) tem valor que varia de 0 e 3,3Vcc, que são amplificados para 5Vcc (Tensão de entrada dos drivers). Portas digitais enviam sinais com a informação do sentido de giro para os drivers. Para realizar o controle do motor, utilizou-se uma placa de potência controlada (driver) por PWM, onde o circuito é composto a partir do sistema de Ponte-H tipo BTS7960 da NovalithIC™. Esta placa tem as seguintes características: alimentação máxima de 24VCC, corrente de saída máxima de 43A (contínuo), ajuste de potência por PWM de 0 a 100% com frequência até 25 kHz, inversão de polaridade digital, freio elétrico, supressão da corrente de pico do motor, entradas de sinal de direção e velocidade externas. A Fig.(07) apresenta o hardware de acionamento montado para todo o conjunto robótico.

Figura 07: Detalhamento do hardware de acionamento montado.

Fonte: Própria (2020).

A técnica de sintonização elaborada por Ziegler e Nichols propõe o ajuste para as constantes de compensação PID baseadas em experimentos de resposta ao degrau ou em alterações de ganho de um compensador puramente proporcional, que leve um sistema à instabilidade marginal. Essa técnica se mostra eficaz ao se trabalhar com uma operação que é permitida uma pequena faixa de erro. A princípio, os parâmetros de controle são definidos na interface gráfica, programada em linguagem Java, e repassada ao controlador por meio da comunicação serial. Na tela do dispositivo é possível orientar os componentes proporcional, derivativo e integrador, bem como visualizar as informações de atuação sistemática, realimentação e saída, através da exibição gráfica. A Interface Homem-Máquina pode ser visualizada na Fig.(08).

Figura 08: Interface Homem-Máquina.

Fonte: Própria (2020).

A Fig.(09) apresenta o diagrama de blocos previsto para a implementação de algoritmos controladores.

Figura 09: Diagrama de controle do mecanismo paralelo.

Fonte: Adaptado de Chiang e Lin (2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aquisição dos Dados de Retroalimentação

Buscando testar a capacidade do microcontrolador, o sistema foi acionado manualmente, através de botões de pressão, em um dos carros na sua velocidade máxima. A medição do deslocamento serviu de parâmetro comparador, onde as leituras foram realizadas de forma simultânea pelo sistema computadorizado, previamente responsável pelo controle da máquina, e pelo sistema embarcado. Os ensaios experimentais realizados até o momento testaram o desempenho do sistema de aquisição de dados dos encoders para o posicionamento dos transportadores A, B e C. As amostras foram obtidas sequencialmente a partir da leitura dos encoders. A Tab.(01) exibe cada medição, respectivamente numerada de acordo com sua ordem e os valores computados pelos sistemas. Para uma confirmação visual do posicionamento de cada carro, foi acoplada uma régua de resolução milimétrica, conforme Fig.(10).

Tabela 01: Comparativo da aquisição entre sistemas.

Amostras	Embarcado	Computadorizado
1º	0 mm	0 mm
2º	188,790 mm	188,803 mm
3º	79,650 mm	79,680 mm
4º	77,600 mm	77,610 mm
5º	55,350 mm	55,350 mm
6º	280,310 mm	280,309 mm

Fonte: Própria (2020).

Figura 10: Posição Final para os deslocamentos de: (a) 40 mm (b) 150 mm (c) 60 mm (d) 120 mm.

Fonte: Própria (2020).

Resposta ao Controle de Posição

Os melhores resultados do controle foram obtidos por meio do Método Ziegler-Nichols com os ganhos apresentados na Tab.(02).

Tabela 02: Ganhos PID.

Ganhos	Carro A	Carro B	Carro C
K_p	40,00	40,00	32,00
K_i	0,00	0,00	0,00
K_d	0,00	0,00	0,016

Fonte: Própria (2020).

A fim de testar a ação do controlador de posição, as bases A, B e C foram submetidas a distintos sinais de referência. De início, os carros foram acomodados em 0 mm de suas respectivas orientações e em seguida foi aplicado um valor de referência (setpoint) positivo de 100 mm. Os comportamentos dos carros quanto à movimentação com sentido a favor da gravidade podem ser observados na Fig.(11).

Figura 11: Resposta do controle dos carros A, B e C para entrada de 100 mm, e respectivos sinais atuantes.

Fonte: Própria (2020).

Como continuidade, os carros manipulados foram posicionados novamente nas suas respectivas posições 0 mm e foi aplicado um valor de referência negativo de 100 mm. Os comportamentos dos carros quanto à movimentação com sentido contrário a força

gravitacional podem ser observados na Fig.(12).

Figura 12: Resposta do controle dos carros A, B e C para entrada de - 100 mm, e respectivos sinais atuantes.

Fonte: Própria (2020).

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.

Nas Tab.(03), Tab.(04) e Tab.(05) são apresentados, para os carros A, B e C, respectivamente, 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).

Tabela 03: Índices de desempenho do controlador respectivo ao carro A.

Parâmetro analisado	Controlador Carro A	
	0 – 100 mm	100 – 0 mm
T_r (s)	0,52s	0,66s
T_d (s)	0,65s	0,61s
T_s (s)	1,78s	1,20s
M_p (%)	4,72%	0,02%
e_{ss} (mm)	0,032mm	0,02mm

Fonte: Própria (2020).

Tabela 04: Índices de desempenho do controlador respectivo ao carro B.

Parâmetro analisado	Controlador Carro B	
	0 – 100 mm	100 – 0 mm
T_r (s)	0,42s	2,74s
T_d (s)	0,60s	2,37s
T_s (s)	1,90s	4,57s
M_p (%)	5,60%	2,13%
e_{ss} (mm)	2,86mm	2,13mm

Fonte: Própria (2020).

Tabela 05: Índices de desempenho do controlador respectivo ao carro C.

Parâmetro analisado	Controlador Carro C	
	0 – 100 mm	100 – 0 mm
T_r (s)	0.42s	0.40s
T_d (s)	0.56s	0.56s
T_s (s)	2.27s	0.96s
M_p (%)	9.32%	5.68%
e_{ss} (mm)	1.16mm	0.48mm

Fonte: Própria (2020).

No intuito de observar o resultado do sistema frente à inserção de entradas de curta distância, foram aplicados valores de referência próximos à posição do elemento manipulado. Foram empregadas dez entradas, nos dois sentidos direcionais, com um distanciamento de 10 mm da posição vigente dos carros, gerando, de forma gráfica, um perfil semelhante ao de uma escada. Os resultados podem ser observados na Fig.(13).

Figura 13: Resposta do controle dos carros A, B e C para entradas do tipo degrau sequenciadas.

Fonte: Própria (2020).

CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou a implementação de um sistema embarcado na concepção do controle de um robô paralelo linear. A base do trabalho se estrutura na substituição de um dispositivo de alto custo financeiro (aproximadamente R\$ 15.400,00) por outro de maior viabilidade financeira. Foi escolhido para computar os dados atuantes no conjunto eletromecânico em questão, o microprocessador de código aberto Arduino Due (aproximadamente R\$ 220,00). Um controlador PID foi testado e validado para cada carro transportador com erro máximo de posicionamento de 2,86%. Este erro ficou um pouco acima do obtido através do módulo de aquisição, que foi de 2,50%, conforme apresentado em Almeida Júnior et al. (2018b). No entanto, para a aplicação de acabamentos, este erro continua aceitável, bem como a resposta temporal. O método de sintonização de Ziegler-Nichols foi utilizado para a obtenção dos parâmetros inseridos no controlador. Assim, realizando-se uma análise acerca da atuação da máquina, concluir-se que os objetivos deste trabalho foram atingidos de forma satisfatória, obtendo por fim um dispositivo mais barato, e tão preciso quanto o sistema computacional.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA JUNIOR, A.G. et al. Desenvolvimento e Controle de Robô Delta para Manipulação Industrial. [Anais]. II Congresso Internacional de Gestão e Tecnologias, João Pessoa. 2018a.
- ALMEIDA JÚNIOR, A.G. et al. Projeto Eletromecânico e Controle de Robô Paralelo Tipo Linapod. [Anais]. II Congresso Internacional de Gestão e Tecnologias, João Pessoa. Anais do II COINTER PDVGT. 2018b.
- CORREIA, V.C.A. **Um Estudo Sobre o Impacto da Robótica Colaborativa na Produtividade em Tarefas Manuais**. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, USP, 2018.
- DORF, R.C. **Sistemas de Controle Moderno**. 13ª ed., São Paulo, SP. Brasil. LTC, 2018.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª ed. São Paulo: Pearson, 2015.
- QUEIROZ, P.G.G. **Uma Abordagem de Desenvolvimento de Linha de Produtos Orientada a Modelos para a Construção de Famílias de Sistemas Embarcados Críticos**. Tese de doutorado, ICMC/USP, 2015.
- SENA, A.P.C.; SILVA, A.V.S. ; SILVA, A.S. Construction and Control Pid of Delta Parallel Robot. [Anais]. 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, Curitiba. 2017. v. 1.

SILVA, A.S. et al. Evaluation of Pid Controllers in Robotic Prototype With Parallel Cinematic Applied to Industrial Manipulation. **[Anais]**. III Congresso Internacional do PDVGT, Recife, 2019.

SILVA, A.S. et. al. **Construção e Controle de Posição para um Robô Paralelo com Aplicação na Indústria Confeccionista**. A Produção do Conhecimento na Engenharia Elétrica 2. 1^a ed. Ponta Grossa: Atena Editora, 2020, v. 2, p. 82-94.