




**DESENVOLVIMENTO DE UM BRAÇO ROBÓTICO DIDÁTICO COM  
CONTROLE PID BASEADO EM SENSOR ULTRASSÔNICO**

**DEVELOPMENT OF A DIDACTIC ROBOTIC ARM WITH PID CONTROL  
BASED ON AN ULTRASONIC SENSOR**

**DESARROLLO DE UN BRAZO ROBÓTICO DIDÁCTICO CON CONTROL PID  
BASADO EN UN SENSOR ULTRASÓNICO**

 <https://doi.org/10.56238/levv17n61-010>

**Data de submissão:** 02/05/2026

**Data de publicação:** 02/06/2026

**Maria Gabrieli Alves Rocha**

Graduanda em Engenharia Mecatrônica

E-mail: nriagabib653@gmail.com

**Thiago Ferreira Gomes**

Orientador

Mestre em Engenharia

Instituição: UDF

E-mail: Fgomes.thiago@gamil.com

---

**RESUMO**

O avanço da robótica tem impulsionado o desenvolvimento de sistemas automatizados capazes de executar tarefas com precisão, repetibilidade e eficiência. Nesse contexto, os manipuladores robóticos destacam-se por sua ampla aplicação em ambientes industriais, sendo utilizados em processos como montagem, transporte de peças e operações repetitivas, paralelamente, o uso de plataformas de baixo custo tem possibilitado a criação de sistemas robóticos didáticos, voltados ao ensino e à pesquisa. Esses sistemas permitem a integração de conceitos fundamentais de eletrônica, programação e controle, tornando-se ferramentas relevantes para a formação acadêmica em engenharia e áreas correlatas. Um dos desafios nesses sistemas consiste na implementação de estratégias de controle que sejam, ao mesmo tempo, eficientes e de fácil aplicação. Nesse contexto, o controlador proporcional-integral-derivativo (PID) destaca-se como uma das técnicas mais utilizadas, devido à sua simplicidade e à sua capacidade de melhorar o desempenho dinâmico de sistemas de controle (OGATA, 2010). Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e a análise de um braço robótico didático de pequena escala, capaz de ajustar sua posição com base na leitura de um sensor ultrassônico. Para isso, emprega-se um microcontrolador Arduino Uno na aquisição de dados e no controle dos atuadores, sendo o sistema composto por servomotores responsáveis pelos movimentos do manipulador. Como estratégia de controle, é implementado um controlador PID em tempo discreto, associado a um filtro de média móvel, com a finalidade de reduzir ruídos nas medições e melhorar a estabilidade do sistema. A distância medida pelo sensor é convertida em uma referência angular por meio de um mapeamento linear, permitindo o controle do posicionamento do braço robótico. A validação do sistema é realizada por meio de simulações no ambiente Tinkercad, complementadas por análises no MATLAB/Simulink, possibilitando a avaliação do comportamento dinâmico do controlador e do desempenho do sistema em diferentes condições de operação. Como contribuição, o trabalho apresenta uma solução didática de baixo custo para o ensino de sistemas de controle e

automação, integrando conceitos teóricos e práticos em uma aplicação experimental acessível e funcional.

**Palavras-chave:** Automação. Braço Robótico. PID.

## ABSTRACT

The advancement of robotics has driven the development of automated systems capable of performing tasks with precision, repeatability, and efficiency. In this context, robotic manipulators stand out for their wide application in industrial environments, being used in processes such as assembly, parts transportation, and repetitive operations. Simultaneously, the use of low-cost platforms has enabled the creation of didactic robotic systems, geared towards teaching and research. These systems allow the integration of fundamental concepts of electronics, programming, and control, becoming relevant tools for academic training in engineering and related areas. One of the challenges in these systems is the implementation of control strategies that are both efficient and easy to apply. In this context, the proportional-integral-derivative (PID) controller stands out as one of the most widely used techniques, due to its simplicity and its ability to improve the dynamic performance of control systems (OGATA, 2010). Given this scenario, this work aims to develop and analyze a small-scale educational robotic arm capable of adjusting its position based on readings from an ultrasonic sensor. To achieve this, an Arduino Uno microcontroller is used for data acquisition and actuator control, with the system composed of servomotors responsible for the manipulator's movements. As a control strategy, a discrete-time PID controller is implemented, associated with a moving average filter, in order to reduce noise in the measurements and improve system stability. The distance measured by the sensor is converted into an angular reference through linear mapping, allowing control of the robotic arm's positioning. System validation is performed through simulations in the Tinkercad environment, complemented by analyses in MATLAB/Simulink, enabling the evaluation of the controller's dynamic behavior and the system's performance under different operating conditions. As a contribution, this work presents a low-cost educational solution for teaching control and automation systems, integrating theoretical and practical concepts in an accessible and functional experimental application.

**Keywords:** Automation. Robotic Arm. PID.

## RESUMEN

El avance de la robótica ha impulsado el desarrollo de sistemas automatizados capaces de realizar tareas con precisión, repetibilidad y eficiencia. En este contexto, los manipuladores robóticos destacan por su amplia aplicación en entornos industriales, utilizándose en procesos como el ensamblaje, el transporte de piezas y operaciones repetitivas. Simultáneamente, el uso de plataformas de bajo coste ha posibilitado la creación de sistemas robóticos didácticos, orientados a la docencia y la investigación. Estos sistemas permiten la integración de conceptos fundamentales de electrónica, programación y control, convirtiéndose en herramientas relevantes para la formación académica en ingeniería y áreas afines. Uno de los retos en estos sistemas es la implementación de estrategias de control que sean eficientes y fáciles de aplicar. En este contexto, el controlador proporcional-integral-derivativo (PID) destaca como una de las técnicas más utilizadas, debido a su simplicidad y su capacidad para mejorar el rendimiento dinámico de los sistemas de control (OGATA, 2010). Ante este escenario, este trabajo tiene como objetivo desarrollar y analizar un brazo robótico educativo a pequeña escala capaz de ajustar su posición en función de las lecturas de un sensor ultrasónico. Para lograr esto, se utiliza un microcontrolador Arduino Uno para la adquisición de datos y el control de actuadores, con un sistema compuesto por servomotores responsables de los movimientos del manipulador. Como estrategia de control, se implementa un controlador PID de tiempo discreto, asociado a un filtro de media móvil, para reducir el ruido en las mediciones y mejorar la estabilidad del sistema. La distancia medida por el sensor se convierte en una referencia angular mediante un mapeo lineal, lo que permite controlar el posicionamiento del brazo robótico. La validación del sistema se realiza mediante simulaciones en el entorno Tinkercad, complementadas con análisis en MATLAB/Simulink, lo que permite evaluar el comportamiento dinámico del controlador y el rendimiento del sistema bajo diferentes condiciones de



operación. Como contribución, este trabajo presenta una solución educativa de bajo costo para la enseñanza de sistemas de control y automatización, integrando conceptos teóricos y prácticos en una aplicación experimental accesible y funcional.

**Palabras clave:** Automatización. Brazo Robótico. PID.

## 1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta os principais conceitos que fundamentam o desenvolvimento do sistema proposto, abrangendo manipuladores robóticos, componentes físicos, técnicas de controle, modelagem dinâmica e filtragem de sinais. A Figura 1 ilustra o protótipo do braço robótico utilizado neste trabalho. O manipulador possui estrutura mecânica impressa em 3D, sendo projetado para aplicações didáticas e experimentais de pequena escala. O sistema apresenta aproximadamente 350 mm de alcance horizontal e cerca de 300 mm de altura máxima operacional, permitindo a realização de movimentos de posicionamento e manipulação de objetos leves. A estrutura é composta por múltiplas articulações acionadas por servomotores, possibilitando movimentos coordenados da base, do braço principal e da garra do manipulador.

Figura 1: Protótipo do braço robótico



Fonte: theGHIZmo, Autodesk Instructables

### 1.1 BRAÇOS ROBÓTICOS

Braços robóticos são manipuladores mecânicos compostos por elos rígidos interligados por juntas, cuja principal função é posicionar e orientar um efetuador final no espaço. Esses sistemas são caracterizados pela presença de graus de liberdade (DOF – Degrees of Freedom), que determinam sua capacidade de movimentação e alcance operacional.

Do ponto de vista de modelagem, o comportamento do manipulador pode ser descrito por relações cinemáticas e dinâmicas. A análise cinemática permite estabelecer a relação entre as variáveis articulares e a posição do efetuador final, sendo fundamental para o controle de posicionamento. Já a dinâmica do sistema está associada às forças e torques envolvidos no movimento, influenciando diretamente o desempenho e a estabilidade do manipulador.

Em aplicações práticas, o controle do movimento é realizado a partir do ajuste das variáveis articulares, geralmente por meio de sinais elétricos aplicados aos atuadores. Dessa forma, o

desempenho do sistema depende tanto da estrutura mecânica quanto da estratégia de controle empregada.

Devido à sua versatilidade, braços robóticos são amplamente utilizados em aplicações industriais, educacionais e de pesquisa, especialmente em tarefas que exigem precisão, repetibilidade e controle de movimento.

O movimento do manipulador é determinado pela atuação conjunta de suas articulações, sendo os atuadores responsáveis pela conversão de sinais elétricos em movimento mecânico.

## 1.2 COMPONENTES DO SISTEMA

O sistema desenvolvido utiliza componentes amplamente empregados em aplicações de prototipagem e sistemas embarcados didáticos.

O Arduino Uno é uma plataforma de desenvolvimento baseada no microcontrolador ATmega328P, responsável pelo processamento dos sinais provenientes dos sensores e pela geração de comandos para os atuadores do sistema. Essa plataforma permite a integração de entradas e saídas digitais e analógicas, possibilitando a implementação de sistemas de controle de forma flexível.

Os servomotores são dispositivos eletromecânicos utilizados para o controle preciso de posição angular, operando por meio de sinais PWM. No presente trabalho, foram utilizados servomotores do tipo MG996R e MG90S, os quais possuem controle interno em malha fechada, permitindo o posicionamento angular com relativa precisão. Entretanto, esses dispositivos apresentam limitações práticas, como folgas mecânicas, atrasos na resposta e oscilações transitórias.

O sensor ultrassônico HC-SR04 é utilizado para medir a distância entre o manipulador e o objeto. Seu funcionamento baseia-se na emissão e recepção de ondas ultrassônicas, sendo a distância calculada a partir do tempo de propagação do sinal, conforme a equação:

$$d = \frac{v \times t}{2} \quad (1)$$

em que  $d$  representa a distância medida,  $v$  é a velocidade do som no meio e  $t$  corresponde ao tempo de ida e volta do pulso ultrassônico.

## 1.3 CONTROLADOR PID

No contexto de sistemas de controle aplicados a manipuladores robóticos, o controlador proporcional-integral-derivativo (PID) destaca-se como uma das estratégias mais utilizadas, devido à sua simplicidade de implementação e à sua capacidade de melhorar o desempenho dinâmico do sistema. Esse controlador atua sobre o erro entre a referência desejada e a variável de entrada, ajustando o sinal de controle de forma a reduzir esse erro ao longo do tempo.

A ação proporcional responde diretamente ao erro atual, promovendo uma correção imediata. A ação integral considera o acúmulo do erro ao longo do tempo, sendo responsável por reduzir o erro estacionário. A ação derivativa antecipa a tendência de variação do erro, contribuindo para a redução de oscilações e para a melhoria da estabilidade do sistema.

A forma contínua do controlador PID é dada por:

$$\begin{aligned} u(t) &= K_p e(t) \\ &+ K_i \int e(t) dt \\ &+ K_d \frac{de(t)}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

em que  $u(t)$  é o sinal de controle,  $e(t)$  é o erro do sistema,  $K_p$  é o ganho proporcional,  $K_i$  é o ganho integral e  $K_d$  é o ganho derivativo.

#### 1.4 MODELAGEM DE SISTEMAS DINÂMICOS

A análise do comportamento dinâmico de sistemas controlados pode ser realizada por meio de modelos matemáticos, frequentemente representados por funções de transferência. Servomotores podem ser aproximados por sistemas de segunda ordem, cuja forma geral é dada por:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

onde  $\omega_n$  representa a frequência natural do sistema, em rad/s, e  $\zeta$  é o coeficiente de amortecimento, adimensional.

Essa modelagem permite avaliar características importantes, como tempo de resposta, tempo de acomodação, overshoot e estabilidade.

#### 1.5 FILTRAGEM DO SINAL

Em sistemas embarcados, sinais provenientes de sensores estão sujeitos a ruídos e flutuações instantâneas, o que pode comprometer a estabilidade do controle. Para reduzir esse efeito, empregou-se um filtro de média móvel, técnica simples e amplamente utilizada em aplicações de aquisição de dados.

A média móvel de ordem  $N$  é definida por:

$$\bar{d}[k] = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} d[k-i] \quad (4)$$

em que  $\bar{d}[k]$  é a distância filtrada no instante discreto  $k$ , em centímetros (cm),  $d[k-i]$  representa as amostras recentes do sensor, também em centímetros (cm), e  $N$  corresponde ao tamanho da janela de filtragem, expresso em número de amostras.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

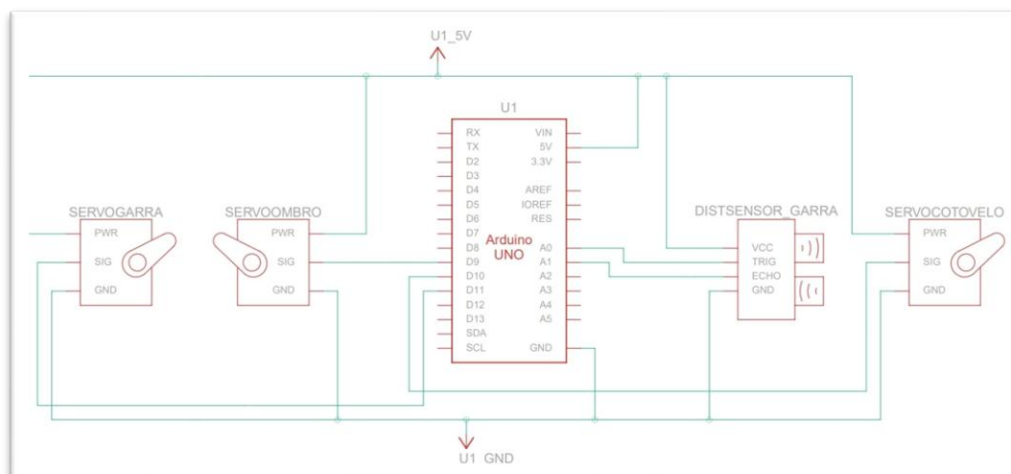
### 2.1 ARQUITETURA DO SISTEMA

Na etapa de aquisição, o sensor ultrassônico HC-SR04 mede a distância entre o braço ro-bótico e o objeto, fornecendo a variável de entrada do sistema. Na etapa de processamento, o sinal obtido é inicialmente submetido ao filtro de média móvel, sendo posteriormente convertido em uma referência angular para o servomotor do ombro. Em seguida, essa referência é utilizada pelo controlador PID, responsável por calcular a ação de controle aplicada ao sistema. Na etapa de atuação, o servomotor do ombro é ajustado direta-mente, enquanto o cotovelo acompanha esse movimento com uma defasagem angular fixa. A garra é acionada automaticamente ao atingir a condição de operação definida. Após isso, o sistema executa uma etapa final de deposição, liberando o objeto e retornando à posição inicial.

### 2.2 HARDWARE E CIRCUITO

O sistema foi implementado em ambiente de simulação Tinkercad, integrando um Arduino Uno, três servomotores e um sensor ultrassônico HC-SR04.

Figura 2: Diagrama do circuito do sistema desenvolvido



Fonte: Autoria própria, criado pelo ThinkerCad

O sensor ultrassônico foi conectado ao Arduino de forma a permitir a medição da distância do objeto. O pino TRIG foi ligado à porta analógica A0, enquanto o pino ECHO foi conectado à porta A1. Os terminais de alimentação do sensor foram ligados aos pinos de 5 V e GND do microcontrolador.

Os servomotores responsáveis pela movimentação do manipulador foram conectados às portas digitais do Arduino. O servomotor correspondente ao ombro foi ligado ao pino digital 9, o do cotovelo ao pino 10 e o da garra ao pino 11. Todos os servomotores compartilham a mesma alimentação, sendo seus terminais de potência conectados aos pinos de 5 V e GND.

### 2.3 AQUISIÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO SINAL

A distância do objeto foi obtida por meio da leitura do sensor ultrassônico. No código implementado, o pulso de disparo é enviado ao pino TRIG, e o tempo de retorno do sinal é medido no pino ECHO. A conversão utilizada na implementação foi:

$$d = \frac{0,0343 \cdot t}{2} \quad (5)$$

em que  $d$  é a distância em centímetros (cm) e  $t$  é o tempo medido em microssegundos ( $\mu$ s). Para leituras inválidas, isto é, valores menores ou iguais a zero ou superiores a 100 cm, o sistema reaproveita a última medição válida filtrada, reduzindo instabilidades na entrada do controlador.

### 2.4 MAPEAMENTO DA DISTÂNCIA PARA REFERÊNCIA ANGULAR

Após a filtragem, o valor da distância é convertido em uma referência angular para a junta do ombro por meio de uma relação linear entre a faixa de distância medida e a faixa angular admissível do servomotor. Essa relação pode ser expressa por:

$$\theta_{ref}[k] = a \cdot \bar{d}[k] + b \quad (6)$$

em que  $\theta_{ref}[k]$  é o ângulo de referência no instante  $k$ , em graus ( $^\circ$ ),  $\bar{d}[k]$  é a distância filtrada, em centímetros (cm), e  $a$  e  $b$  são constantes de ajuste.

Na implementação adotada, a faixa de distância de 10 cm a 50 cm foi mapeada para a faixa angular de  $60^\circ$  a  $120^\circ$ . Assim, o coeficiente angular do mapeamento é dado por:

$$a = \frac{120^\circ - 60^\circ}{50cm - 10cm} 1,5 \text{ }^\circ/cm \quad (7)$$

e o coeficiente linear por:

$$b = 60 \text{ }^\circ - (1,5 \text{ }^\circ/cm \cdot 10cm) = 45 \text{ }^\circ \quad (8)$$

resultando em:

$$\vartheta_{\text{ref}} = 1,5 d + 45 \quad (9)$$

Essa escolha respeita os limites mecânicos do manipulador e evita comandos fora da região segura de operação.

## 2.5 MODELAGEM DO ERRO DE CONTROLE

O controlador atua com base no erro entre a referência angular desejada e a variável utilizada como entrada do sistema de controle. Esse erro é dado por:

$$e[k] = \vartheta_{\text{ref}}[k] - \vartheta[k] \quad (10)$$

em que  $e[k]$  é o erro no instante  $k$ , em graus ( $^\circ$ ),  $\vartheta_{\text{ref}}[k]$  é o ângulo de referência e  $\vartheta[k]$  é a posição angular considerada pelo controlador, também em graus ( $^\circ$ ).

No sistema implementado, foi adotada uma zona morta para valores reduzidos de erro. Assim, erros com magnitude inferior a  $1^\circ$  são tratados como nulos, reduzindo oscilações em torno do ponto de equilíbrio.

## 2.6 IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR

O controlador PID foi implementado em tempo discreto, considerando um período de amostragem constante de  $T = 0,05$  s. A equação utilizada na implementação é dada por:

$$u[k] = K_p e[k] + K_i \sum e[k]T + K_d \frac{e[k] - e[k-1]}{T} \quad (11)$$

em que  $u[k]$  é a saída do controlador no instante  $k$ , em graus por ciclo de atualização ( $^\circ/\text{ciclo}$ ),  $K_p = 1,1$ ,  $K_i = 0,08$  e  $K_d = 0,02$ .

Os parâmetros foram definidos empiricamente em simulação, buscando resposta suave, estabilidade e limitação de esforço dos servomotores.

## 2.7 RESTRIÇÕES APLICADAS AO CONTROLADOR

Para tornar a implementação mais estável e compatível com as limitações físicas do sistema, foram consideradas restrições adicionais ao sinal de controle.

O termo integral foi limitado ao intervalo de  $-40$  a  $40$ , impedindo crescimento excessivo da ação integral em situações de saturação. A saída do controlador foi restringida ao intervalo de  $-2^\circ$  a  $2^\circ$  por ciclo, de forma a garantir movimento suave e evitar variações abruptas. Além disso, a posição

angular do ombro foi limitada ao intervalo de 40° a 140°, respeitando a faixa de operação definida para o sistema.

## 2.8 ATUALIZAÇÃO DA POSIÇÃO ANGULAR

A cada iteração do sistema de controle, a nova posição angular do ombro é obtida pela soma entre a posição anterior e a correção calculada pelo PID, respeitando os limites físicos do servomotor. Assim, a atualização angular pode ser representada por:

$$\vartheta[k + 1] = \vartheta[k] + u[k] \quad (12)$$

em que  $\theta[k + 1]$  é a nova posição angular, em graus (°),  $\theta[k]$  é a posição anterior, também em graus (°), e  $u[k]$  é a saída do controlador.

Essa abordagem caracteriza uma atualização incremental do comando angular, permitindo suavidade no movimento e reduzindo mudanças bruscas na posição do braço.

## 2.9 COORDENAÇÃO ENTRE OMBRO, COTOVELO E GARRA

O movimento do cotovelo é realizado de forma coordenada com o ombro, mantendo uma defasagem angular fixa de 12°. Assim, a posição angular do cotovelo é dada por:

$$\vartheta_c[k] = \vartheta[k] + 12^\circ \quad (13)$$

em que  $\theta_c[k]$  é o ângulo do cotovelo, em graus (°).

A garra opera em duas posições principais, adotadas na implementação como 35° para a condição fechada e 75° para a condição aberta. Após a aproximação do objeto, o sistema realiza o fechamento da garra, executa o movimento de deposição em posição angular pré-definida e, ao final, retorna à configuração inicial.

## 2.10 FLUXO DE EXECUÇÃO DO SISTEMA

O funcionamento do sistema segue um ciclo contínuo de execução, implementado no laço principal do microcontrolador, no qual todas as etapas de aquisição, processamento e atuação são repetidas periodicamente.

Inicialmente, o sensor ultrassônico realiza a medição da distância entre o manipulador e o objeto. O valor obtido é convertido em centímetros (cm) e armazenado para processamento.

Em seguida, a distância medida é submetida ao filtro de média móvel, reduzindo variações abruptas e ruídos provenientes do sensor. O valor filtrado é então utilizado como entrada para o sistema de controle.

A partir da distância filtrada, é calculada uma referência angular para o servomotor do ombro por meio de um mapeamento linear, respeitando os limites operacionais definidos para o sistema.

Com a referência definida, o erro de controle é calculado como a diferença entre a posição desejada e a posição atual do sistema. Esse erro é utilizado pelo controlador PID, que gera uma correção incremental aplicada à posição angular do ombro.

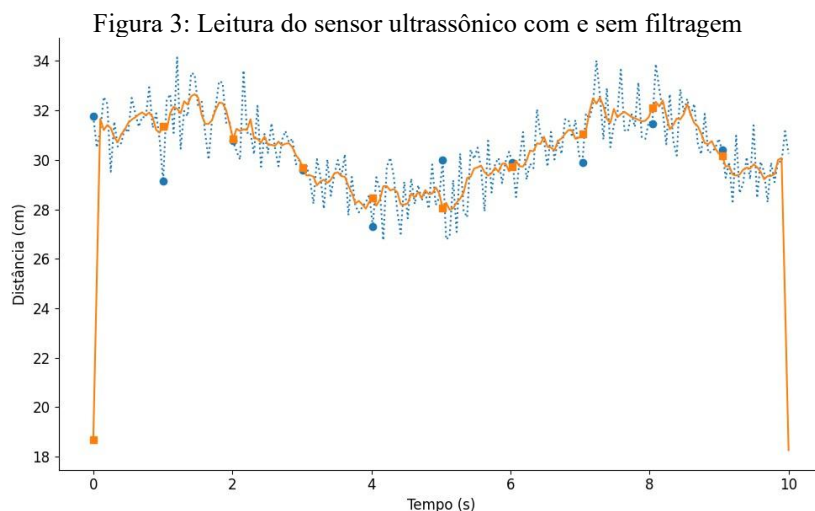
O movimento do cotovelo é atualizado de forma coordenada com o ombro, mantendo uma defasagem angular constante. A garra é acionada automaticamente quando a posição angular do ombro ultrapassa um limiar pré-estabelecido, caracterizando a etapa de apreensão do objeto.

Após essa etapa, o sistema executa o movimento de deposição, deslocando o manipulador até uma posição definida, liberando o objeto e retornando à posição inicial.

Esse ciclo é repetido continuamente, caracterizando o laço de controle do sistema e garantindo a atualização constante das variáveis de entrada e saída.

### 3 RESULTADOS

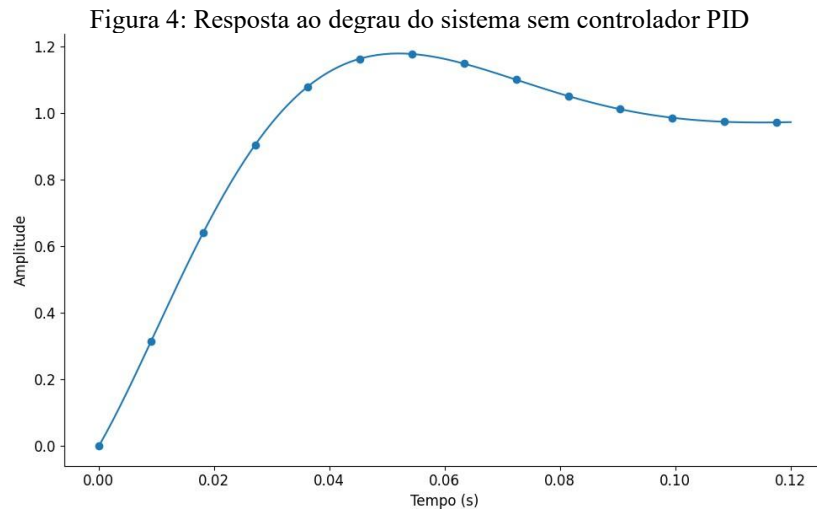
Inicialmente, foi analisado o sinal proveniente do sensor ultrassônico, responsável pela aquisição da variável de entrada do sistema.



Fonte: autoria própria MATLAB.

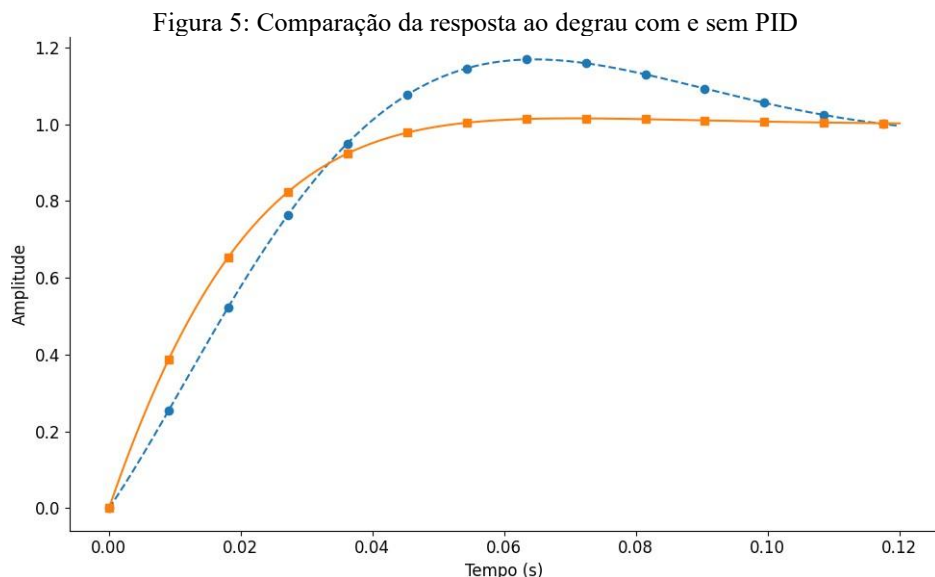
Observa-se na Figura 3 que o sinal obtido diretamente do sensor ultrassônico apresenta variações abruptas e ruídos de medição ao longo do tempo, característicos de sensores sujeitos a interferências instantâneas e oscilações ambientais. Após a aplicação do filtro de média móvel com janela de  $N = 5$  amostras, verifica-se uma redução significativa das oscilações presentes no sinal, tornando a resposta mais suave e próxima do comportamento esperado. Essa filtragem contribui

diretamente para a estabilidade do sistema de controle, reduzindo atuações excessivas do controlador PID causadas por ruídos de alta frequência.



Fonte: autoria própria MATLAB.

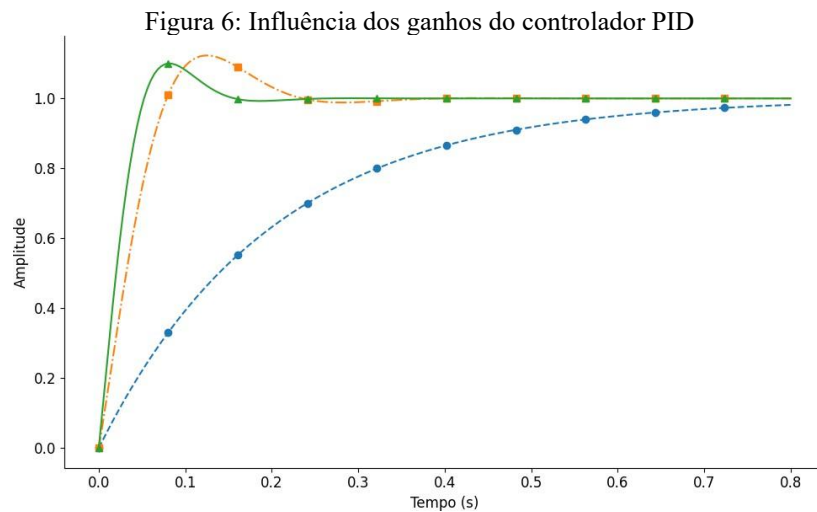
A Figura 4 apresenta a resposta temporal do sistema operando sem a utilização do controlador PID. Observa-se um tempo de subida relativamente elevado, além da presença de overshoot e oscilações antes da estabilização da resposta. Esse comportamento evidencia limitações naturais do sistema em malha aberta, principalmente relacionadas à ausência de mecanismos de correção automática do erro e de amortecimento dinâmico.



Fonte: autoria própria MATLAB.

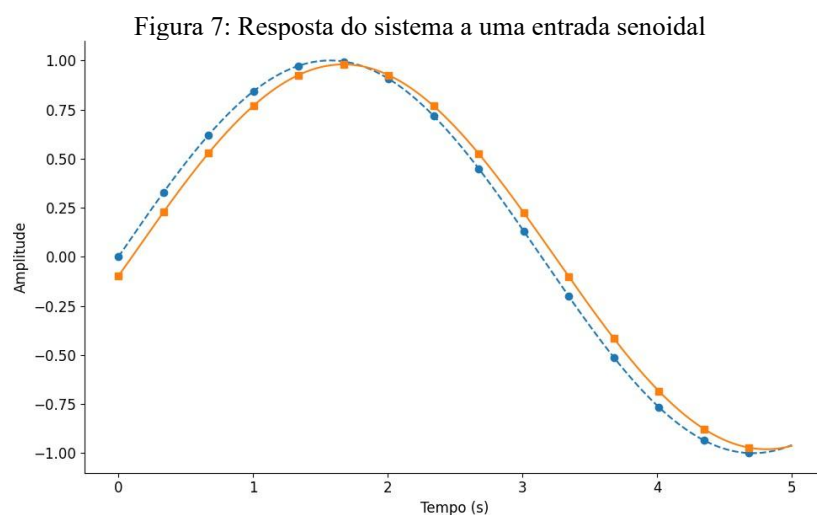
Na Figura 5 é apresentada a comparação entre o sistema operando sem controlador PID e com o controlador implementado. Observa-se que a utilização do PID proporciona redução significativa do tempo de resposta, melhora no amortecimento e diminuição do erro estacionário. A resposta controlada

converge de forma mais rápida para o valor de referência, demonstrando maior estabilidade e desempenho dinâmico em comparação ao sistema sem controle.



Fonte: autoria própria MATLAB.

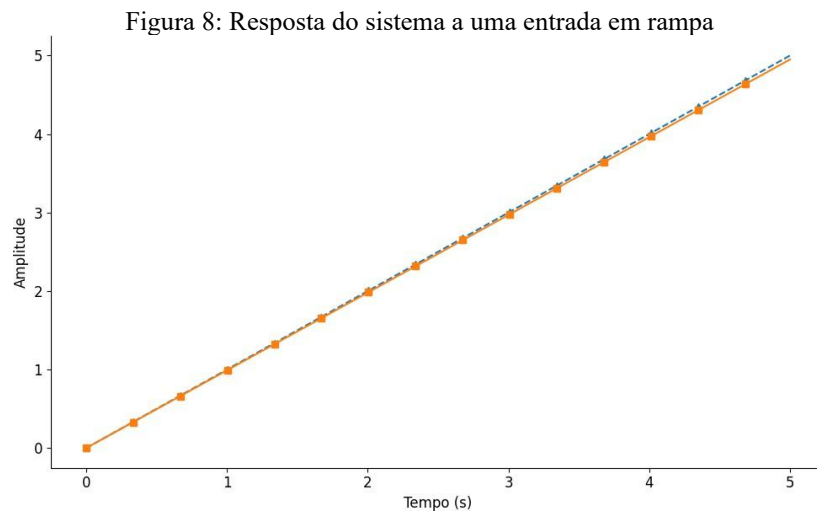
A Figura 6 demonstra a influência dos diferentes ajustes dos ganhos do controlador PID sobre a resposta dinâmica do sistema. Ganhos reduzidos resultam em respostas mais lentas, porém com menor tendência a oscilações. Em contrapartida, ganhos elevados aumentam a velocidade de resposta, mas introduzem oscilações mais pronunciadas e possibilidade de overshoot. A configuração intermediária apresentou o melhor compromisso entre estabilidade, rapidez de resposta e suavidade no movimento do manipulador.



Fonte: autoria própria MATLAB.

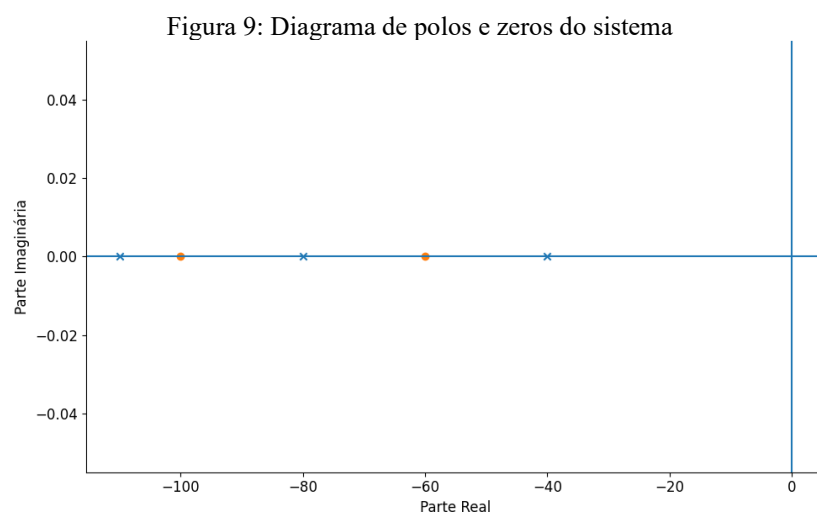
A Figura 7 apresenta o comportamento do sistema frente a uma entrada senoidal. Observa-se que o controlador é capaz de acompanhar adequadamente as variações periódicas do sinal de referência, apresentando apenas pequena defasagem temporal e leve atenuação de amplitude. Esse

comportamento demonstra boa capacidade de rastreamento e estabilidade durante o acompanhamento de sinais variáveis no tempo.



Fonte: autoria própria MATLAB.

Na Figura 8 observa-se a resposta do sistema para uma entrada do tipo rampa. Verifica-se que o controlador acompanha a variação linear da referência com erro reduzido ao longo do tempo. A presença do termo integral do controlador PID contribui para minimizar o erro acumulado, permitindo melhor seguimento da trajetória e maior precisão no posicionamento angular do manipulador.



Fonte: autoria própria MATLAB.

A Figura 9 apresenta o diagrama de polos e zeros associado ao modelo dinâmico do sistema. Observa-se que os polos estão localizados no semiplano esquerdo do plano complexo, característica típica de sistemas estáveis. Além disso, a distribuição dos polos indica comportamento amortecido e compatível com as respostas temporais obtidas anteriormente. Esses resultados confirmam a estabilidade global do sistema implementado.



## 4 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do braço robótico didático proposto permitiu a integração de conceitos de robótica, sistemas embarcados e controle automático em uma aplicação prática de baixo custo. A utilização do sensor ultrassônico associada ao controlador PID possibilitou o ajuste da posição angular do manipulador de forma estável e com resposta adequada às variações da entrada.

Os resultados obtidos demonstraram que a aplicação do filtro de média móvel reduziu significativamente as oscilações presentes no sinal do sensor, contribuindo para maior estabilidade do sistema. Além disso, o controlador PID apresentou desempenho satisfatório na redução do erro estacionário e na melhoria da resposta dinâmica do manipulador.

As análises realizadas mostraram que o sistema foi capaz de acompanhar diferentes tipos de sinais de referência, mantendo comportamento estável e compatível com a proposta didática do projeto. A modelagem adotada e as restrições aplicadas ao controlador também contribuíram para movimentos mais suaves e adequados às limitações mecânicas do manipulador.

Dessa forma, conclui-se que os objetivos propostos foram atingidos, validando a utilização do controlador PID em um braço robótico didático de pequena escala. Como continuidade do trabalho, podem ser considerados o desenvolvimento de um protótipo físico, a utilização de sensores de maior precisão e a implementação de técnicas de controle mais avançadas.



## REFERÊNCIAS

OGATA, Katsuhiko. Modern control engineering. 5. Ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010.

NISE, Norman S. Control systems engineering. 7. Ed. Hoboken: Wiley, 2015.

CRAIG, John J. Introduction to robotics: mechanics and control. 4. Ed. Boston: Pearson, 2018.

SPONG, Mark W.; HUTCHINSON, Seth; VIDYASAGAR, M. Robot modeling and control. New York: Wiley, 2006.

ÅSTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. PID controllers: theory, design, and tuning. 2. Ed. Research Triangle Park: ISA, 1995.

[Docs.arduino.cc](https://docs.arduino.cc)

[Mathworks.com](https://www.mathworks.com)

[Tinkercad.com](https://www.tinkercad.com)

[Instructables.com](https://www.instructables.com)