www.revistaft.com.br

Revista FT | ISSN 1678-0817 | v. 30, n. 164, 2026 | DOI: 10.69849/7jv1g061

Desenvolvimento e controle de um robô equilibrista baseado em pêndulo invertido utilizando ESP32 e controlador PID

Development and control of an inverted pendulum-based balancing robot using an ESP32 and a PID controller

Maria Daiane Bernardo Batista[1]
Fernanda Ketlyn de Farias Moura[1]
Josieudo Pereira Gaião[2]

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um robô pêndulo invertido sobre duas rodas, com controle automático para estabilização na posição vertical. O protótipo foi construído com um microcontrolador ESP32, um sensor MPU6050, motores de corrente contínua e uma ponte H L298N. O sistema utiliza um controlador proporcional-integral-derivativo (PID), que ajusta a atuação dos motores a partir da estimativa de inclinação obtida por um filtro complementar aplicado aos dados do acelerômetro e do giroscópio. O desenvolvimento envolveu a montagem mecânica e eletrônica, a programação do microcontrolador e o ajuste experimental dos parâmetros de controle. Durante o teste realizado sem apoio externo, o robô permaneceu equilibrado, sem quedas, apresentando deslocamentos para frente e para trás enquanto corrigia a inclinação e retornava à posição de equilíbrio. O resultado demonstrou a capacidade do sistema de manter o equilíbrio nas condições do ensaio, permitindo aplicar conceitos de sensores, atuadores e controle em malha fechada à estabilização de um sistema instável.

Palavras-chave: Pêndulo Invertido; Controle PID; ESP32.

ABSTRACT

This work presents the development of a two-wheeled inverted pendulum robot, featuring automatic control for stabilization in an upright position. The prototype was built using an ESP32 microcontroller, an MPU6050 sensor, DC motors, and an L298N H-bridge. The system employs a proportional-integral-derivative (PID) controller, which adjusts motor actuation based on an inclination estimate derived from a complementary filter applied to data from an accelerometer and a gyroscope. The development process encompassed mechanical and electronic assembly, microcontroller programming, and the experimental tuning of control parameters. During testing without external support, the robot remained balanced, without falling, moving forward and backward as it corrected its tilt and returned to an equilibrium position. The results demonstrate the system's ability to maintain balance under the tested conditions, providing a practical application of concepts regarding sensors, actuators, and closed-loop control for the stabilization of an inherently unstable system.

1 Discente do Curso Engenharia de Controle e Automação, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia – Campus Calama – RO.

2 Orientador: Docente do Curso Engenharia de Controle e Automação, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia – Campus Calama – RO.

Keywords: Inverted Pendulum; PID Control; ESP32.

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico, os sistemas de controle têm assumido um papel cada vez mais importante no desenvolvimento de soluções para problemas relacionados à automação e ao funcionamento de sistemas físicos. Sua aplicação está presente em diversos setores da indústria e da engenharia, contribuindo para o controle de variáveis como velocidade, temperatura, pressão e posição. Por meio do monitoramento dessas variáveis e da aplicação de ações corretivas, os sistemas de controle buscam alcançar o comportamento desejado, melhorar o desempenho dos processos e aumentar sua eficiência e segurança. (OGATA, 2020).

Nesse contexto, o pêndulo invertido sobre duas rodas constitui um exemplo relevante para o estudo e a aplicação de técnicas de controle automático, devido à sua característica naturalmente instável. Esse sistema consiste em uma estrutura que deve permanecer na posição vertical enquanto se desloca apoiada em duas rodas. Para manter o equilíbrio, é necessário realizar ajustes contínuos na movimentação das rodas, de modo a corrigir os desvios de inclinação provocados pela dinâmica do sistema e por possíveis perturbações externas. (GADELHA, 2018).

Para realizar essa estabilização, podem ser utilizados sensores inerciais, como o acelerômetro e o giroscópio, responsáveis por fornecer informações sobre a aceleração e a velocidade angular do sistema, respectivamente. A partir dessas informações, é possível estimar a inclinação do robô e acompanhar suas variações ao longo do tempo. Esses dados são utilizados pelo controlador para determinar as ações necessárias ao acionamento dos motores, que movimentam as rodas no sentido de corrigir os desvios e manter o corpo do robô próximo à posição vertical desejada.

Entre as estratégias utilizadas no controle automático, destaca-se o controlador proporcional-integral-derivativo (PID), cuja atuação se baseia no erro entre a referência desejada e a variável medida. Seu funcionamento envolve três ações de controle: proporcional, integral e derivativa, associadas aos ganhos Kp, Ki e Kd, respectivamente. A escolha adequada desses parâmetros, processo conhecido como sintonia do controlador, é importante para o desempenho do sistema, pois influencia a resposta dinâmica, as oscilações e a capacidade de correção dos desvios.

Dessa forma, o ajuste do controlador constitui uma etapa relevante para a estabilização do pêndulo invertido. Diante disso, este trabalho tem como objetivo desenvolver e avaliar um sistema de controle de um pêndulo invertido sobre duas rodas utilizando o microcontrolador ESP32 e um controlador PID. A proposta consiste em integrar a aquisição de dados dos sensores, o processamento das informações e o acionamento dos motores para buscar a manutenção do equilíbrio do robô. A avaliação do sistema pode considerar aspectos como a resposta às variações de inclinação, a ocorrência de oscilações e a capacidade de recuperação do equilíbrio, conforme os testes realizados no protótipo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Princípio de funcionamento do pêndulo invertido

O pêndulo invertido é um sistema mecânico caracterizado por sua instabilidade natural e comportamento não linear, cujo objetivo é manter um corpo na posição vertical por meio de ações corretivas aplicadas à sua base de sustentação. No caso de um robô equilibrista de duas rodas, esse princípio está relacionado à movimentação controlada das rodas, que permite corrigir as inclinações do corpo e evitar sua queda. Dessa maneira, quando ocorre um deslocamento do centro de massa em relação à posição de equilíbrio, o sistema precisa realizar ajustes contínuos para recuperar e manter a estabilidade. (OGATA, 2010).

Um exemplo prático que facilita a compreensão desse fenômeno consiste em equilibrar um objeto, como uma vassoura, sobre a palma da mão. Para impedir que o objeto caia, é necessário movimentar a mão constantemente na mesma direção em que ocorre o deslocamento do objeto, procurando acompanhar seu movimento e manter seu centro de massa próximo da posição vertical. Essa situação representa, de maneira simplificada, o comportamento de um pêndulo invertido e demonstra a importância dos ajustes contínuos para a manutenção do equilíbrio. (RIBEIRO, 2007).

Aplicado à robótica, o princípio de funcionamento do pêndulo invertido consiste em manter o centro de massa do corpo acima do eixo de apoio formado pelas rodas. Entretanto, essa configuração apresenta equilíbrio instável, pois qualquer pequena perturbação pode provocar uma inclinação progressiva devido à ação da gravidade. Para evitar a queda, o sistema utiliza sensores para identificar a inclinação do corpo e um controlador eletrônico para determinar a correção necessária. Em seguida, os motores acionam as rodas, deslocando a base de sustentação de maneira a acompanhar a inclinação e contribuir para a recuperação da posição vertical. (CZECH, 2024).

A importância do estudo do pêndulo invertido está relacionada à possibilidade de compreender e aplicar técnicas de controle automático em sistemas mecanicamente instáveis e aplicar os conhecimentos adquiridos nas disciplinas de Teoria de Controle e Controle de Processos ao longo do curso. Por meio desse modelo, torna-se possível analisar a interação entre forças, torques, movimentos e mecanismos de estabilização, demonstrando como a utilização de sensores, atuadores e controladores permite manter o equilíbrio de estruturas que, naturalmente, tenderiam a cair. Nesse contexto, destaca-se o controlador proporcional, integral e derivativo (PID), utilizado para calcular as ações corretivas a partir das informações obtidas pelos sensores. (GARCIA, 2017).

Além dos robôs equilibristas, os princípios associados ao pêndulo invertido possuem aplicações em diferentes áreas da engenharia, como na estabilização de veículos, na movimentação e no controle de cargas suspensas por guindastes e no estudo da dinâmica de sistemas aeroespaciais. No caso dos drones, por exemplo, existem princípios relacionados de controle de atitude e estabilização diante de perturbações externas, embora sua dinâmica seja diferente da de um pêndulo invertido convencional.

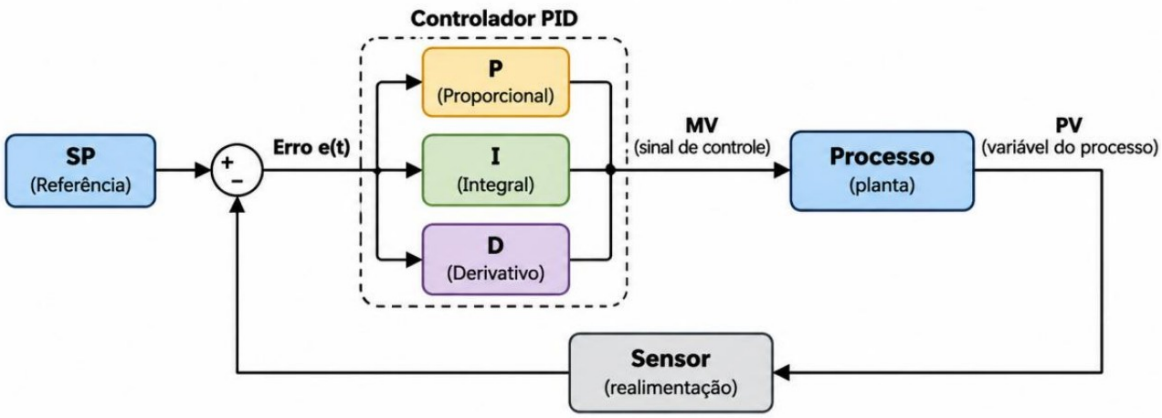
2.2 Controle PID

A principal função do controlador consiste em manter a variável de controle o mais próximo possível do valor de referência estabelecido, mesmo diante de possíveis oscilações na alimentação do sistema ou alterações na demanda. Para isso, ele atua continuamente sobre as variáveis do processo, realizando os ajustes necessários para minimizar os desvios e garantir a estabilidade do sistema em malha fechada, tanto em seu comportamento transitório quanto em regime permanente. (GARCIA, 2017).

O controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) é amplamente empregado em processos industriais devido à sua facilidade de implementação, versatilidade e capacidade de manter a estabilidade do sistema diante de oscilações e perturbações externas. Seu funcionamento baseia-se na combinação de três ações de controle que atuam sobre o sinal de erro e(t), buscando reduzir a diferença entre o valor desejado e o valor efetivamente medido. Dessa forma, a ação proporcional, integral e derivativa trabalha de maneira conjunta para melhorar o desempenho do sistema, proporcionando respostas mais estáveis e precisas, mesmo diante de variações nas condições de operação. (GARCIA, 2017).

A Figura 1 apresenta a representação em diagrama de blocos da estrutura de funcionamento de um sistema de controle em malha fechada.

Figura 1 – Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada do robô equilibrista sobre duas rodas



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Legenda:

SP: Valor de referência (setpoint).

e(t): Erro de controle.

P: Ação proporcional.

I: Ação integral.

D: Ação derivativa.

MV: Variável manipulada (sinal de controle).

PV: Variável do processo (saída).

Processo: Sistema a ser controlado.

Sensor: Responsável pela medição da variável do processo e pelo envio do sinal de realimentação ao controlador.

Segundo Ogata (2020), em um sistema de controle em malha fechada, o sinal de erro corresponde à diferença entre o valor de referência e o valor efetivamente medido na saída do sistema. Essa diferença é utilizada pelo controlador para determinar a ação corretiva necessária, permitindo reduzir o erro e aproximar a resposta do sistema ao valor desejado.

Nesse contexto, o robô equilibrista de duas rodas utiliza um sistema de controle com realimentação, no qual a inclinação do equipamento é monitorada continuamente pelo sensor MPU6050, composto por um acelerômetro e um giroscópio. Inicialmente, realiza-se a calibração do sensor para estabelecer a referência angular de equilíbrio, correspondente a 0°, que representa a posição vertical do robô. A partir dessa referência, o sensor fornece os dados necessários para identificar possíveis variações na inclinação do equipamento.

As informações coletadas são processadas pelo microcontrolador ESP32, responsável pela execução do algoritmo de controle PID. Com base no erro calculado entre o ângulo de referência e o ângulo medido, o controlador determina a ação de correção e gera sinais de controle enviados ao driver dos motores. Este, por sua vez, realiza o acionamento dos motores de corrente contínua, controlando sua velocidade e seu sentido de rotação para movimentar as rodas e corrigir os desvios de inclinação.

Durante o funcionamento do robô, o sistema de malha fechada identifica continuamente as alterações em sua posição angular e realiza os ajustes necessários para preservar o equilíbrio. Dessa maneira, a realimentação das informações fornecidas pelo MPU6050 permite que o controlador PID execute correções sucessivas, contribuindo para a estabilização automática do robô equilibrista de duas rodas.

O modelo matemático utilizado para o cálculo do controle PID é apresentado na equação 1:

$$u(t) = Kp\, e(t) + Ki \int_0^t e(\tau)\, d\tau + Kd \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Na expressão matemática do controlador PID, cada parâmetro e variável representa uma grandeza específica, sendo definida da seguinte maneira:

Kp: Ganho Proporcional

Ki: Ganho Integral

Kd: Ganho Derivativo

e: Erro

t: Tempo

(τ): Tempo de integração

O controlador PID é composto por três ações: proporcional, integral e derivativo. Sendo elas:

- **Ação Proporcional (P):** Atua diretamente sobre o erro instantâneo do sistema, gerando um sinal de controle cuja intensidade é proporcional à diferença entre o valor desejado e o valor medido.

- **Ação Integral (I):** Considera a acumulação do erro ao longo do tempo, contribuindo para corrigir desvios persistentes e reduzir ou eliminar o erro em regime permanente.

- **Ação Derivativa (D):** Baseia-se na taxa de variação do erro em relação ao tempo, permitindo antecipar tendências de comportamento do sistema e contribuir para reduzir oscilações e melhorar a estabilidade da resposta.

O controlador derivativo tem como principal função atuar de forma antecipada às variações do erro presente na malha de controle. Para isso, considera a taxa de variação do erro ao longo do tempo, representada matematicamente por (de(t)/dt). Dessa maneira, sua ação é proporcional à velocidade com que o erro aumenta ou diminui, permitindo que o sistema responda às mudanças antes que elas se tornem mais acentuadas. (DORF, 2024).

Entretanto, o controle derivativo não é normalmente utilizado de forma isolada, pois sua atuação depende da variação do erro, e não de seu valor absoluto. Assim, quando o erro permanece constante, mesmo que exista uma diferença entre o valor desejado setpoint e o valor medido, a ação derivativa tende a ser nula. Por esse motivo, esse controlador não é capaz de garantir sozinho que o sistema alcance o valor de referência. Sua principal contribuição ocorre quando combinado com as ações proporcional e integral, formando o controlador PID, no qual auxilia na redução das oscilações e melhora a resposta dinâmica do sistema. (DORF, 2024).

Os parâmetros Kp, Ki e Kd são ganhos que compõem um Controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo):

O parâmetro Kp, conhecido como ganho proporcional, determina a intensidade da ação de controle em função do erro identificado no sistema. Dessa forma, quanto maior for o desvio entre o valor de referência e o valor medido, maior será a resposta corretiva aplicada pelo controlador. O aumento do ganho proporcional tende a reduzir o tempo de subida da resposta do sistema, tornando sua atuação mais rápida. Entretanto, valores elevados de Kp podem provocar maior ultrapassagem do valor de referência (overshoot), além de favorecer oscilações e comprometer a estabilidade do sistema. Portanto, a definição adequada desse parâmetro é fundamental para alcançar um equilíbrio entre rapidez de resposta e estabilidade, considerando que a ação proporcional, isoladamente, pode não ser suficiente para eliminar o erro em regime permanente. (DORF, 2024).

O parâmetro Ki, denominado ganho integral, está relacionado à capacidade do controlador de corrigir erros que persistem ao longo do tempo. Sua atuação ocorre por meio da integração acumulativa do erro, fazendo com que o sinal de controle aumente ou diminua conforme a permanência do desvio. Dessa maneira, quando a ação proporcional não é suficiente para eliminar completamente o erro, a componente integral continua atuando até reduzir o desvio e, em condições adequadas de estabilidade, eliminar o erro em regime permanente. (DORF, 2024).

O parâmetro Kd, denominado ganho derivativo, está associado à taxa de variação do erro ao longo do tempo, permitindo ao controlador identificar a velocidade com que o desvio

aumenta ou diminui. Sua principal finalidade é antecipar o comportamento do sistema, contribuindo para amortecer a resposta e reduzir possíveis oscilações. Dessa maneira, quando o erro apresenta uma variação muito rápida, a ação derivativa atua de forma a moderar a intensidade da resposta de controle, favorecendo uma maior estabilidade do processo. O aumento adequado do ganho Kd pode melhorar o amortecimento e reduzir a ultrapassagem do valor de referência. Entretanto, quando utilizado em valores excessivamente elevados, esse parâmetro pode amplificar ruídos provenientes dos sensores de medição, prejudicando o desempenho e a estabilidade do sistema. (DORF, 2024).

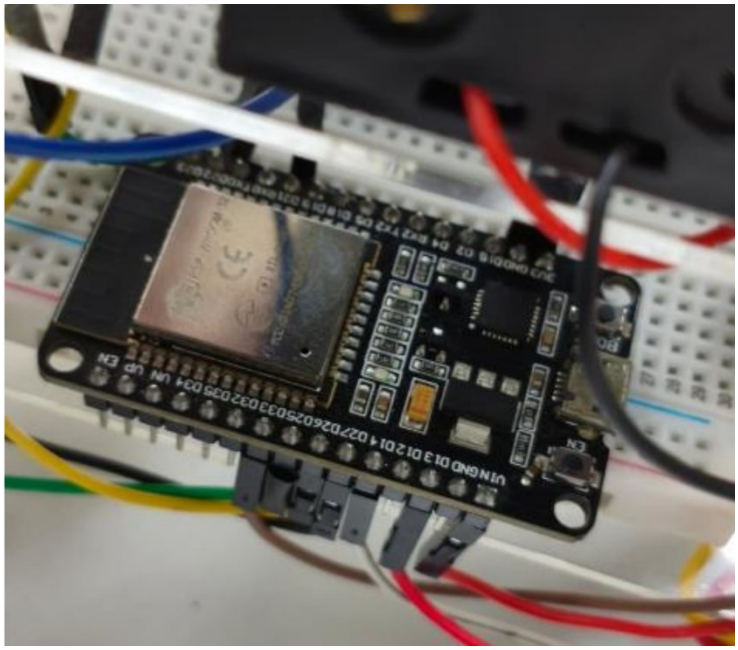
2.3 ESP32

O ESP32, desenvolvido pela Espressif Systems, é um sistema em chip (SoC) que reúne processamento, memória, periféricos e comunicação sem fio. Sua arquitetura utiliza processadores Xtensa LX6 de 32 bits, com um ou dois núcleos, dependendo do modelo, e frequência de operação de até 240 MHz. O dispositivo possui 520 KB de memória SRAM e 448 KB de memória ROM, destinadas ao armazenamento de dados e instruções utilizados em seu funcionamento. (ESPRESSIF SYSTEMS, s.d.).

Entre seus recursos estão Wi-Fi na faixa de 2,4 GHz, Bluetooth 4.2 e Bluetooth Low Energy. O ESP32 também dispõe de interfaces I²C, SPI e UART, conversores analógico-digitais de 12 bits, temporizadores e geração de sinais PWM. Esses periféricos permitem receber informações de sensores e enviar comandos a circuitos externos, favorecendo sua aplicação em automação e robótica. (ESPRESSIF SYSTEMS, s.d.).

No robô pêndulo invertido desenvolvido neste trabalho, o ESP32 realiza a leitura do MPU6050 pela interface I²C, processa os dados para estimar a inclinação e executa o controlador PID. Com base no erro em relação ao ângulo de referência, envia sinais de direção e PWM à ponte H L298N, ajustando a atuação dos motores para manter o equilíbrio do protótipo. A figura 2 mostra o ESP32 utilizado no protótipo.

Figura 2 – Microcontrolador ESP32

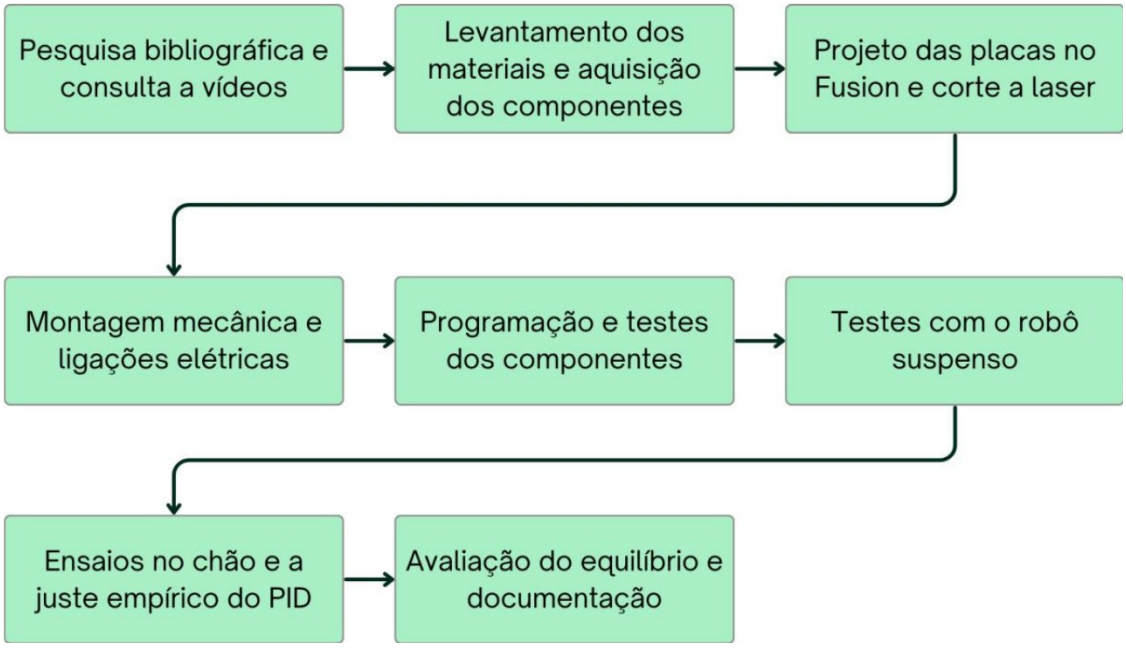


Fonte: Acervo do autor (2026)

3 METODOLOGIA

A figura 3 mostra as etapas do desenvolvimento do projeto.

Figura 3 – Fluxograma do projeto

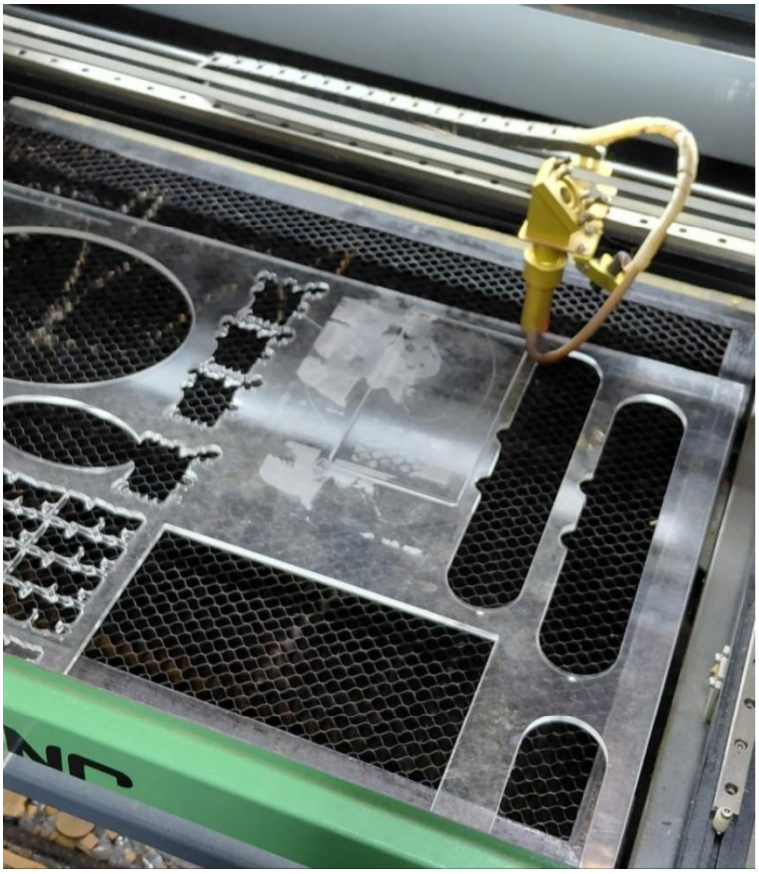


Fonte: Acervo do autor (2026).

3.1 Construção do robô pêndulo invertido

Na construção do protótipo foram utilizadas três placas de acrílico desenhadas no software Autodesk Fusion, seguidamente foi editado no programa RDWorks e cortadas em máquina CNC em um laboratório do IFRO Campus Calama. Depois de prontas, as placas foram fixadas em três níveis por meio de barra roscada, porcas e arruelas. Na base foram instaladas uma protoboard, o microcontrolador ESP32, a ponte H L298N e os motores de corrente contínua com caixa de redução acoplados às rodas. A figura 4 mostra as placas sendo cortadas na máquina.

Figura 4 – Corte da placa de acrílico na máquina CNC

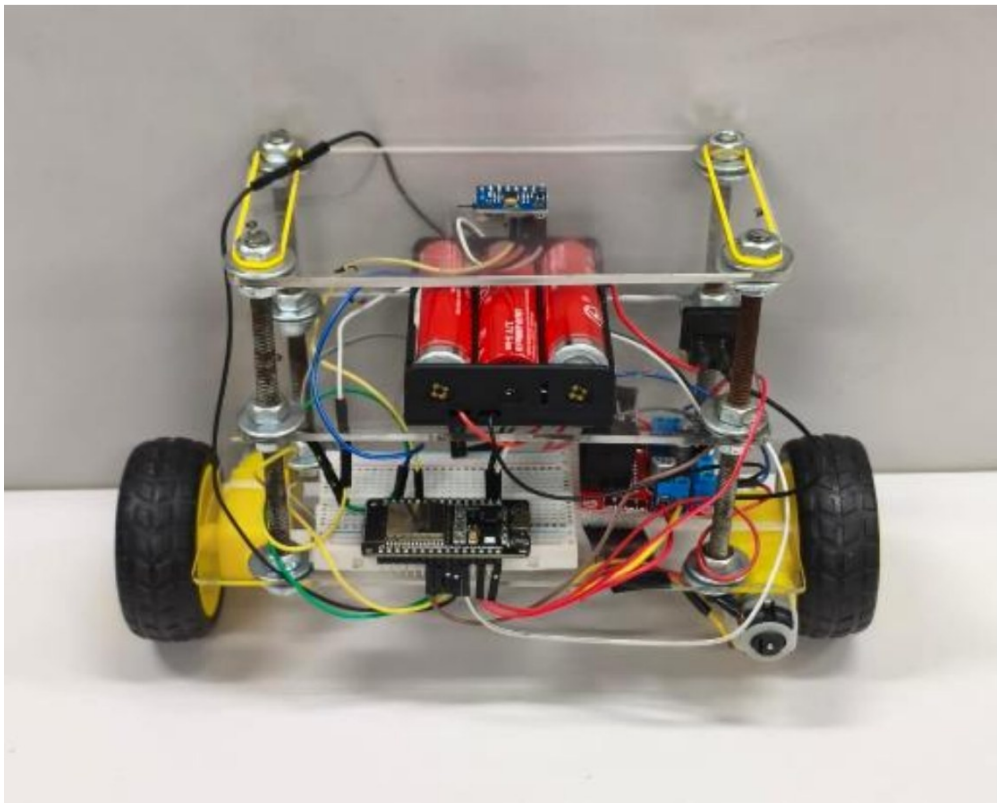


Fonte: Acervo do autor (2026).

Na placa intermediária foi fixada a fonte de alimentação, composta por três baterias 18650 e na parte superior foi instalado horizontalmente o sensor MPU6050 e utilizado cabos e jumpers para fazer as ligações elétricas dos componentes.

Estruturalmente, mostrado na Figura 5, o robô possui 30cm de comprimento, 18 cm de altura e rodas com 68mm de diâmetro.

Figura 5 – Protótipo do robô equilibrista



Fonte: Acervo do autor (2026).

3.2 Sensor MPU6050

O MPU6050 conforme Figura 6 reúne um acelerômetro e um giroscópio, ambos com três eixos, permitindo obter medidas de aceleração e velocidade angular. A comunicação com o microcontrolador ocorre pela interface I²C (Usinainfo, s. d.). O acelerômetro mede as componentes da aceleração, incluindo a influência da gravidade, permitindo estimar a inclinação da estrutura. O giroscópio mede a velocidade angular, possibilitando acompanhar as mudanças de orientação do robô. A combinação dessas informações auxilia na identificação dos movimentos que precisam ser corrigidos pelo sistema de controle.

O sensor se comunica com o microcontrolador por meio do protocolo I²C, utilizando duas linhas: uma para transmitir os dados (SDA) e outra para sincronizar a comunicação (SCL). Na inicialização, é realizada a calibração do giroscópio com o robô parado para compensar o desvio de leitura do eixo utilizado no controle.

A inclinação do robô é estimada por um filtro complementar que combina as acelerações dos eixos X e Z com a velocidade angular do eixo Y. O controlador PID compara

esse ângulo com o setpoint e ajusta o acionamento dos motores para corrigir o erro. Dessa forma, o MPU6050 fornece a realimentação necessária ao controle do equilíbrio.

Figura 6 – Sensor MPU6050



Fonte: Acervo do autor (2026).

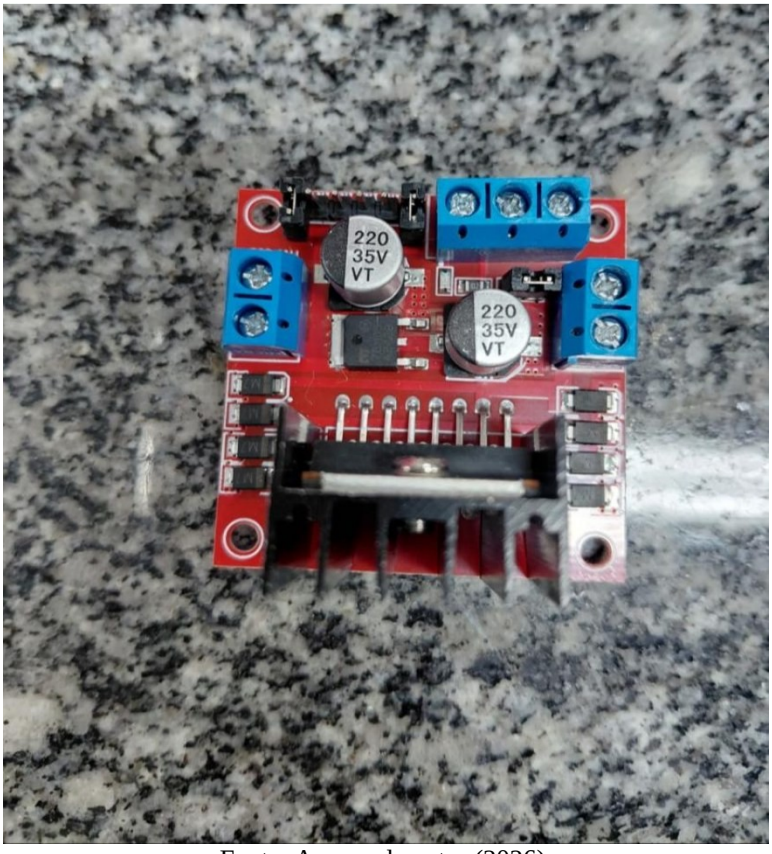
3.3 Ponte H L298N

O módulo ponte H L298N conforme Figura 7 é um dispositivo utilizado para acionar motores de corrente contínua, permitindo controlar o sentido de rotação e ajustar sua velocidade. Seu circuito possui duas pontes H, possibilitando o acionamento de dois motores de forma independente. A inversão do sentido de rotação ocorre pela alteração da polaridade da tensão aplicada aos terminais dos motores, enquanto o ajuste do acionamento é realizado por sinais de modulação por largura de pulso (PWM).

No robô desenvolvido, o módulo atua como interface de potência entre o microcontrolador e os dois motores responsáveis pelo movimento das rodas. O controlador

PID calcula a correção necessária com base nos dados recebidos pelo sensor e o ESP32 envia o comando à L298N, que controla o fornecimento de energia aos atuadores a partir do conjunto de baterias. Assim, as rodas se movimentam para frente ou para trás, para corrigir a inclinação do robô e manter o equilíbrio.

Figura 7 – Ponte H L298N

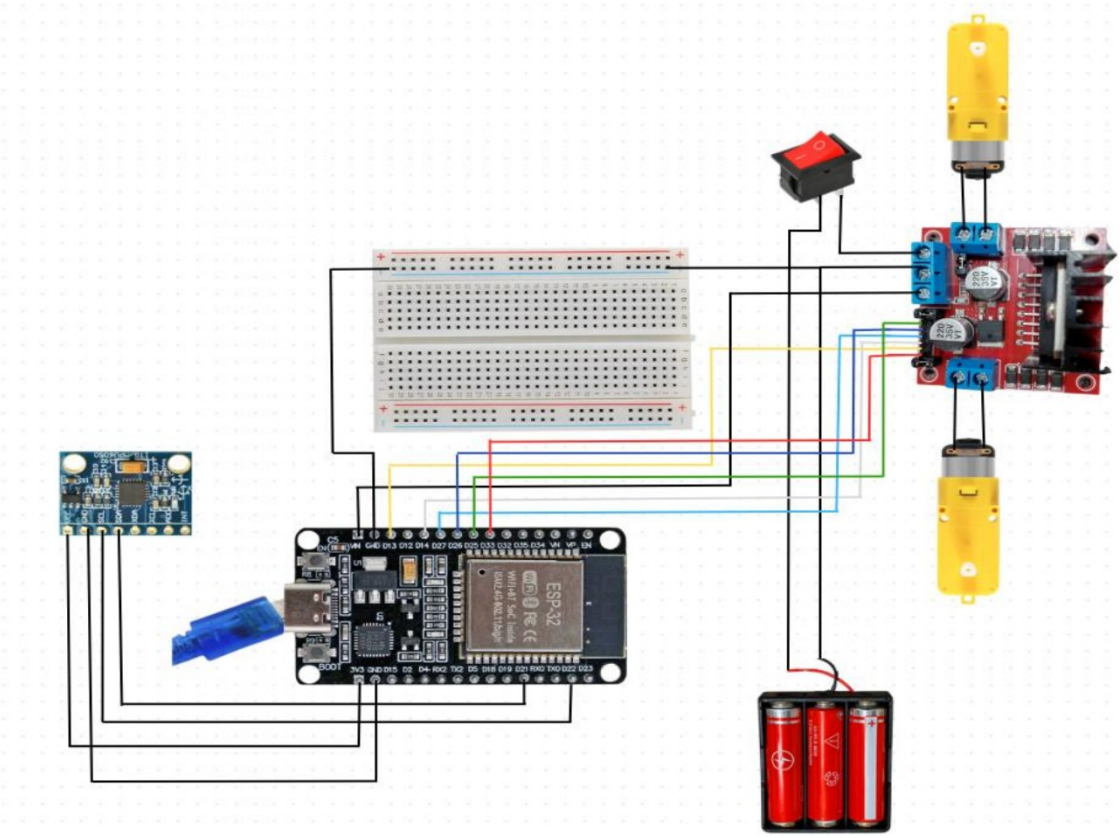


Fonte: Acervo do autor (2026).

3.4 Esquema elétrico

O esquema elétrico do robô equilibrista da figura 8 integra o ESP32, o sensor MPU6050, a ponte H L298N e dois motores de corrente contínua. A alimentação é fornecida por três células recarregáveis do tipo 18650 conectadas em série à entrada da L298N, que distribui energia aos motores e alimenta o ESP32 por sua saída de 5 V. O MPU6050 recebe alimentação do pino de 3,3 V do microcontrolador. Todos os componentes compartilham uma referência de terra comum, conectada ao negativo das baterias. Um interruptor instalado entre o positivo do conjunto de baterias e a entrada da L298N permite ligar e desligar o circuito, enquanto a conexão USB é utilizada exclusivamente para programação.

Figura 8 – Esquema elétrico



Fonte: Acervo do autor (2026).

As conexões realizadas entre os componentes e o microcontrolador por meio de cabos e jumpers estão indicadas na Figura 9.

Figura 9 – Conexões entre os componentes e microcontrolador

Componente	Aplicação	Terminal	GPIO do ESP32	Função
MPU6050	Sensor de inclinação	SDA	21	Dados da comunicação I²C
MPU6050	Sensor de inclinação	SCL	22	Clock da comunicação I²C
Ponte H L298N	Motor esquerdo	ENA	25	Habilitação e controle por PWM
Ponte H L298N	Motor esquerdo	IN1	26	Entrada de controle do sentido
Ponte H L298N	Motor esquerdo	IN2	27	Entrada de controle do sentido
Ponte H L298N	Motor direito	ENB	33	Habilitação e controle por PWM
Ponte H L298N	Motor direito	IN3	14	Entrada de controle do sentido
Ponte H L298N	Motor direito	IN4	13	Entrada de controle do sentido

Fonte: Acervo do autor (2026).

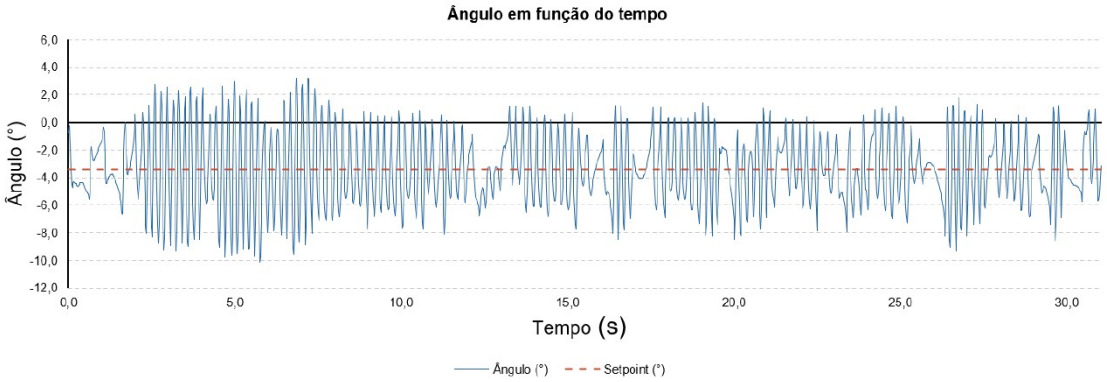
Os terminais ENA e ENB recebem os sinais de modulação por largura de pulso (PWM). Essas conexões permitem que o ESP32 utilize as informações de inclinação do sensor para comandar as correções necessárias à manutenção do equilíbrio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados vários ensaios testando empiricamente valores para as constantes do PID até encontrar os valores ideais e os resultados apresentados nos gráficos foram alcançados com os seguintes parâmetros: Kp = 48,0, Ki = 150,0 e Kd = 1,2, sendo o setpoint igual a -3,45°.

No ensaio sem perturbação que teve duração de aproximadamente 31 s, observa-se que o ângulo oscilou em torno do setpoint. No entanto, após as oscilações iniciais, houve uma diminuição parcial da amplitude e o robô conseguiu se manter em equilíbrio sem cair até o final do registro.

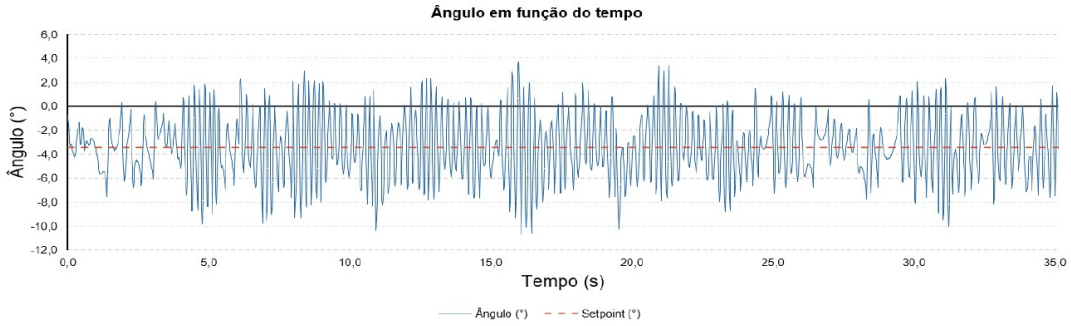
Figura 10 – Ensaio sem perturbação



Fonte: Acervo do autor (2026).

O ensaio com perturbação durou aproximadamente 35 s, a perturbação consistiu em toques manuais aplicados no robô, sem controle de intensidade nem de instante. A cada toque é possível observar no gráfico que o robô se distanciou mais do setpoint, no entanto, conseguiu rejeitar a perturbação e manter-se na posição vertical. O ângulo voltou à região da referência após cada intervenção, sem divergência ao longo do registro.

Figura 11 – Ensaio com perturbação



Fonte: Acervo do autor (2026).

A oscilação residual nos dois ensaios indica que a malha não amorteceu completamente o erro. Com Ti de cerca de 0,32 s, o termo integral é relativamente rápido para uma planta instável, e a zona morta dos motores, a saturação do PWM e o atraso do filtro podem manter um ciclo limite de pequena amplitude em torno do setpoint. A recuperação após os toques mostra que o controlador rejeitou perturbações de baixa a moderada intensidade nessa configuração. Como a perturbação foi manual e cada condição teve um único ensaio, os resultados são qualitativos e não permitem concluir sobre margem de estabilidade ou comparar a sintonia com outras.

Com Kp = 48, Ki = 150 e Kd = 1,2, o controlador foi capaz de estabilizar o robô se mostrando eficiente nos dois ensaios realizados. Sem perturbação, a amplitude das oscilações iniciais foi diminuindo ao longo do tempo de registro. Já com as perturbações manuais, o ângulo oscilou bastante a cada intervenção, porém, conseguiu corrigir logo em seguida. Isso é um resultado muito relevante considerando que se trata de uma planta naturalmente instável como o pêndulo invertido, porque mostra que o PID, com o ângulo estimado pelo MPU6050 e o filtro complementar, reagiu rápido o bastante para recuperar o equilíbrio depois de cada perturbação sem deixar o robô cair. Os ensaios também confirmam que o ESP32, o sensor e os motores trabalharam juntos na malha fechada, permitindo que haja uma realimentação e continuidade do sistema.

5 CONCLUSÃO

O trabalho teve como resultado a construção de um robô equilibrista sobre duas rodas baseado em pêndulo invertido que é capaz de se equilibrar automaticamente por meio de um controlador PID. A integração entre o ESP32, o sensor MPU6050 e a ponte H L298N permitiu estimar a inclinação e comandar os motores para corrigir os desvios em relação à referência.

Nos ensaios, o protótipo manteve o equilíbrio com oscilações em torno do setpoint. Quando submetido a toques manuais, apresentou movimentos de correção e retornou à região de referência, demonstrando capacidade de responder às perturbações nas condições testadas.

O projeto permitiu aplicar conhecimentos de mecânica, eletrônica e programação ao controle de um sistema fisicamente instável. As etapas de montagem, ajuste do PID e análise dos resultados contribuíram para relacionar os conceitos estudados no curso de Engenharia de Controle e Automação ao funcionamento do robô.

A partir dos conhecimentos adquiridos por meio das referências bibliográficas e dos conteúdos estudados nas disciplinas de Teoria de Controle e Controle de Processos, foi possível desenvolver o projeto de um robô equilibrista de duas rodas, utilizando o microcontrolador ESP32 associado a um controlador PID. A construção do protótipo permitiu demonstrar, na prática, a possibilidade de estabilizar um sistema naturalmente instável, fazendo com que o robô conseguisse manter sua posição vertical por meio de correções automáticas.

O desenvolvimento do projeto também possibilitou compreender a importância dos sistemas de controle e sua aplicação em processos que apresentam dificuldades de estabilização. Durante a montagem e os testes, foi possível identificar a contribuição de cada componente para o funcionamento do equipamento: o sensor MPU6050, responsável por fornecer os dados de aceleração e velocidade angular utilizados na estimativa da inclinação; o ESP32, encarregado do processamento das informações e da execução do algoritmo PID; e os motores de corrente contínua, responsáveis por movimentar as rodas conforme os comandos recebidos pelo sistema de acionamento.

Dessa maneira, a realização do projeto proporcionou a integração entre os conhecimentos teóricos e sua aplicação prática, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada do funcionamento de sistemas de controle em malha fechada. Além disso, a experiência evidenciou a importância da integração entre sensores, microcontroladores e atuadores para o desenvolvimento de soluções capazes de controlar sistemas dinamicamente instáveis.

REFERÊNCIAS

COMPREENDENDO o controle PID: parâmetros Kp, Ki, Kd explicados. **Industrial Monitor Direct**, 4 mar. 2026. Disponível em: https://industrialmonitordirect.com/pt/blogs/knowledgebase/understanding-pid-control-kp-ki-kd-parameters-explained. Acesso em: 11 nov. 2026.

CZECH, Arthur Schmietke. **Estudo do sistema pêndulo invertido e implementação de um controlador PID para um robô de duas rodas**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecatrônica) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2024.

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. **Sistemas de controle modernos**. 14. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2024. E-book. p. 354. ISBN 9788521638865. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521638865/. Acesso em: 11 nov. 2026.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 series: datasheet**. Versão 5.3. Espressif Systems, 2026. Disponível em: https://documentation.espressif.com/ESP32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 11 nov. 2026.

GADELHA, Nayana de Freitas. **Controle de um pêndulo invertido utilizando lógica fuzzy**. 2018. 75 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Rural do Semi-árido, Caraúbas, Rio Grande do Norte, 2018.

GARCIA, Claudio. **Controle de processos industriais: estratégias convencionais**. v. 1. São Paulo: Blucher, 2017. E-book. p. 1. ISBN 9788521211860. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521211860/. Acesso em: 11 nov. 2026.

NISE, Norman S. **Engenharia de sistemas de controle**. Tradução e revisão técnica de Jackson Paul Matsuura. 6. ed. [Reimpr.]. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. Tradução de Heloísa Coimbra de Souza; revisão técnica de Eduardo Aoun Tannuri. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

RIBEIRO, R. **Implementação de um sistema de controle de um pêndulo invertido**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, 2007.

USINAINFO. **Sensor IMU MPU-6050 GY-521 6 eixos (6 DOF) acelerômetro e giroscópio**. Santo Ângelo: Usinainfo, [s. d.]. Disponível em: https://www.usinainfo.com.br/acelerometro/sensor-imu-mpu-6050-gy-521-6-eixos-6-dof-com-acelerometro-e-giroscopio-3895.html. Acesso em: 11 nov. 2026.