

DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM ROBÔ EQUILIBRISTA BASEADO EM CONTROLE PID

Yasmin Barbosa Braido¹, Fernando Gonçalves Gardim², Laos Alexandre Hirano^{1,2}

¹Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas,
Brasil(yasmin.braido@sou.unifal-mg.edu.br)

Resumo: Este trabalho apresenta os resultados preliminares do desenvolvimento de um robô equilibrista baseado em Arduino Uno, sensor MPU6050 e controlador PID. O sistema foi calibrado por meio do Método do Qui-Quadrado e avaliado experimentalmente através da variação dos parâmetros de controle. Os resultados preliminares indicaram melhor desempenho aceitável para $K_p = 85$, $K_i = 0,2$ e $K_d = 2$, mantendo o equilíbrio por mais de 4s e demonstrando a viabilidade da solução proposta.

Palavras-chave: Robô equilibrista; Controle PID; Automação; Sistemas Embarcados; Pêndulo Invertido

INTRODUÇÃO

Atualmente, sistemas autônomos e dispositivos inteligentes estão amplamente inseridos no cotidiano, desempenhando funções que vão desde a automação residencial até aplicações industriais e de mobilidade; essa inserção é tão profunda que sua intuitividade deixou sua interação com os indivíduos apenas na condição de usuários finais. Tecnologias como robôs aspiradores, hoverboards e veículos autônomos dependem da integração entre sensores, atuadores e algoritmos de controle para realizar tarefas de forma segura e eficiente. Nesse contexto, o desenvolvimento de sistemas capazes de monitorar continuamente sua posição e corrigir desvios tornou-se um dos principais desafios da área de controle e automação.

Entre os problemas clássicos estudados na engenharia de controle destaca-se o pêndulo invertido, cuja principal característica é apresentar equilíbrio instável. Diferentemente de um pêndulo convencional, que tende naturalmente à posição de menor energia potencial, o pêndulo invertido necessita de correções contínuas para permanecer em equilíbrio. Sob o ponto de vista energético, sua posição vertical corresponde a uma condição de máxima energia potencial gravitacional, tornando-o altamente sensível a pequenas perturbações (Feynman et al., 2008). Dessa forma, torna-se necessária a utilização de sistemas de controle capazes de identificar rapidamente as variações de posição e gerar ações corretivas adequadas para a manutenção da estabilidade (Mostafa et al., 2023).

Uma das aplicações práticas desse princípio é o robô equilibrista de duas rodas, cujo comportamento dinâmico pode ser aproximado ao de um pêndulo invertido (Mostafa et al., 2023). Para determinar sua inclinação, é comum a utilização de sensores

inerciais, como o MPU6050, que integra acelerômetro e giroscópio em um único dispositivo. A combinação dessas medições permite estimar o ângulo de inclinação do sistema, fornecendo informações essenciais para a atuação do controlador, sendo esse sensor amplamente empregado em projetos de estabilização e monitoramento de orientação espacial (Lage, 2016).

Dentre as estratégias de controle mais utilizadas em sistemas embarcados, destaca-se o controlador Proporcional Integral Derivativo (PID), amplamente empregado devido à sua simplicidade de implementação e à sua eficiência na estabilização de sistemas dinâmicos. A sintonia adequada de seus parâmetros influencia diretamente características como estabilidade, tempo de resposta e amplitude das oscilações, sendo um dos fatores determinantes para o desempenho do robô equilibrista (Mostafa et al., 2023).

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo desenvolver e analisar experimentalmente um robô equilibrista baseado em sensor MPU6050 e controlador PID, avaliando a influência dos parâmetros de controle sobre a estabilidade do sistema e o comportamento dinâmico do protótipo. Para isso, são investigados os efeitos das constantes proporcional, integral e derivativa na resposta do sistema, considerando aspectos como amplitude das oscilações, tempo de estabilização e permanência em equilíbrio. Busca-se, ainda, verificar a viabilidade da utilização dessa arquitetura em aplicações de controle de sistemas instáveis baseados no conceito de pêndulo invertido.

MATERIAL E MÉTODOS

O robô equilibrista desenvolvido neste trabalho consiste em um sistema dinâmico cujo



comportamento pode ser aproximado ao de um pêndulo invertido. Diferentemente de um pêndulo convencional, cuja posição de equilíbrio ocorre naturalmente na posição inferior, o pêndulo invertido apresenta equilíbrio instável, exigindo correções contínuas para manter-se na posição vertical. Dessa forma, pequenas perturbações tendem a afastar o sistema de sua posição de equilíbrio, tornando necessária a utilização de um controlador capaz de realizar correções em tempo real (Mostafa et al., 2023).

A inclinação do robô varia em uma única dimensão, sendo analisado o movimento de pitch. Para monitorar essa inclinação foi utilizado o sensor MPU6050, composto por acelerômetro e giroscópio, responsáveis pela medição da orientação angular do sistema.

O sistema embarcado foi composto por um Arduino Uno, um sensor MPU6050, um driver L298N, motores de corrente contínua e um chassi confeccionado em MDF por corte a laser.

Assim, inicialmente, foi realizada a calibração do sensor MPU6050 visando reduzir erros de leitura e melhorar a precisão angular. Para isso, os dados do acelerômetro foram convertidos em ângulos de inclinação por meio da função arcotangente, implementada computacionalmente pela função atan, permitindo obter valores contínuos no intervalo de -90° a 90° . Essa abordagem foi adotada por apresentar comportamento mais linear e adequado ao processo de calibração via Método dos Mínimos Quadrados Ponderados conhecido como Qui-Quadrado (χ^2), evitando descontinuidades associadas à representação angular completa do círculo trigonométrico.

Buscando maior estabilidade nas medições, utilizou-se um Filtro Complementar para combinar os dados obtidos pelo acelerômetro e pelo giroscópio, reduzindo simultaneamente ruídos e deriva acumulada, já que foi empregado para combinar as vantagens do acelerômetro e do giroscópio. Enquanto o acelerômetro fornece uma estimativa estável da inclinação a longo prazo, o giroscópio apresenta melhor resposta a variações rápidas, porém acumula erro ao longo do tempo. A combinação de ambos permite estimativas angulares mais confiáveis (Lage, 2016). Posteriormente, aplicou-se o χ^2 aos dados coletados, visando melhorar a precisão das medições angulares utilizadas pelo controlador.

Após a etapa de calibração e depois da determinação dos parâmetros da curva de calibração, procedeu-se ao cálculo do χ^2 e do qui-quadrado reduzido (χ^2_{red}), métricas empregadas para avaliar a qualidade do ajuste considerando as incertezas experimentais. Esses indicadores permitiram verificar a consistência

do modelo adotado e assegurar a confiabilidade dos resultados obtidos (Vuolo, 1996).

Posteriormente, o sensor foi integrado ao sistema físico do robô, assim como na Figura 1, e verificou-se o correto funcionamento do conjunto montado.

Por conseguinte, o controle de estabilidade foi realizado por meio de um controlador Proporcional Integral Derivativo (PID), amplamente utilizado em sistemas de controle devido à sua simplicidade de implementação e eficiência. Trata-se de um sistema de controle em malha fechada, no qual a ação de controle é calculada continuamente a partir do erro entre o valor de referência e a saída medida, ou seja, o valor medido é o ângulo obtido após a correção via χ^2 . Sua ação de controle é descrita pela Equação (1):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

onde K_p : ganho proporcional; K_i : ganho integral; K_d : ganho derivativo; $e(t)$: erro do sistema, com cada constante influenciando diretamente o comportamento do robô, assim temos K_p : aumenta a rapidez de resposta; K_i : reduz erro estacionário; K_d : reduz oscilações e suaviza o sistema. (Mostafa et al., 2023)

Dessa forma, foram conduzidos testes variando-se os parâmetros do controlador PID para análise experimental do comportamento dinâmico do robô. O método de sintonia adotado foi tentativa e erro, avaliando-se a influência dos ganhos sobre a estabilidade do sistema.

Inicialmente, a saída PWM foi limitada ao intervalo de -100 a 100 , visando reduzir esforços excessivos nos motores durante os ensaios, evitando principalmente queimá-los, uma vez que foi utilizada uma fonte de alimentação de $12V$ para fornecer maior estabilidade de corrente ao sistema. Dessa forma, a limitação do PWM permitiu preservar os motores sem comprometer significativamente a análise do comportamento dinâmico do robô.

Sendo assim, os testes foram iniciados com K_i e K_d iguais a zero, variando-se apenas K_p entre 70 e 110 . Depois de K_p fixado, houve o aumento gradual de K_i , sempre comparando graficamente as mudanças, até encontrar um valor que estabilizasse mais o sistema. Por fim, foram realizados testes com a introdução do ganho derivativo, K_d , para buscar reduzir oscilações e melhorar a estabilidade do sistema. Durante todos os ensaios, foram coletados dados referentes ao ângulo de inclinação, tempo de estabilização e amplitude das oscilações, utilizados posteriormente para análise do desempenho do controlador através principalmente da análise gráfica.

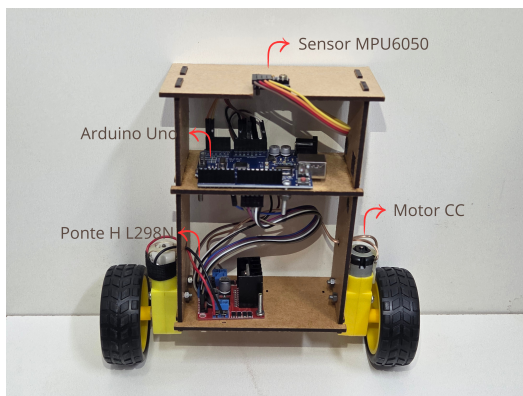


Figura 1. Robô equilibrista após integração de seus componentes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A calibração do sensor MPU6050 resultou na curva descrita pela Equação (2):

$$\theta = (1,0731 \pm 0,0022)\theta_{saída} + (-0,70 \pm 0,11) \quad (2)$$

O valor do χ^2_{red} que indica a qualidade do ajuste, ou seja, se os pontos estão seguindo a tendência da curva de calibração obtida foi de:

$$\chi^2_{red} \approx 1,83, \quad (3)$$

valor que indica uma qualidade boa de ajuste e uma confiabilidade a Equação 2.

Com a aplicação dessa calibração, então, verificou-se, após a implementação do robô, que o MPU6050 passou a fornecer valores angulares muito próximos de 0° quando o sistema encontrava-se em sua condição de equilíbrio. Nessa situação, o corpo do robô permanecia aproximadamente na posição vertical, caracterizando a condição de referência adotada pelo controlador PID. Consequentemente, o erro calculado pelo controlador, definido como a diferença entre o ângulo medido e o ângulo de referência, também assumia valores próximos de zero, conforme esperado para um sistema estabilizado.

Antes da calibração, entretanto, observava-se a presença de desvios sistemáticos nas leituras do sensor, fazendo com que o robô indicasse inclinações diferentes de zero mesmo quando se encontrava fisicamente próximo da posição de equilíbrio. Esse comportamento comprometia a atuação do controlador, que interpretava essas leituras como erros reais e gerava ações corretivas desnecessárias.

Dessa forma, a calibração permitiu reduzir tais desvios, tornando as medições mais compatíveis com a condição física do sistema. Como consequência, o controlador passou a atuar de maneira mais coerente com a dinâmica do robô, contribuindo para a redução

de oscilações indesejadas e para o aumento da estabilidade durante os testes experimentais.

A Figura 2 apresenta o comportamento do robô para $K_p = 70$, mantendo-se K_i e K_d iguais a zero, valor frequentemente empregado em trabalhos semelhantes (Mostafa et al., 2023). Observa-se elevada instabilidade, caracterizada por oscilações excessivas e dificuldade do sistema em permanecer próximo ao valor de referência. À medida que o ganho proporcional foi aumentado, verificou-se uma melhora gradual na resposta dinâmica do robô, permitindo a manutenção do equilíbrio por intervalos maiores de tempo.

Ângulos por tempo com $K_p = 70$, $K_i = 0$ e $K_d = 0$

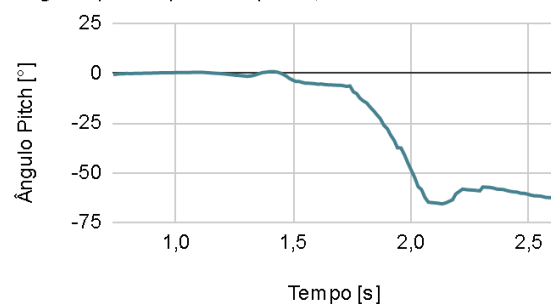


Figura 2. Gráfico de evolução temporal do ângulo pitch do sistema utilizando apenas ganho proporcional ($K_p = 70$).

Ângulos por tempo $K_p = 80$, $K_i = 0$ e $K_d = 0$

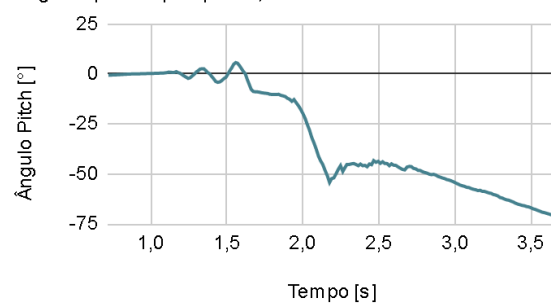


Figura 3. Gráfico de evolução temporal do ângulo pitch do sistema utilizando apenas ganho proporcional ($K_p = 80$).

Ângulos por tempo $K_p = 90$, $K_i = 0$ e $K_d = 0$

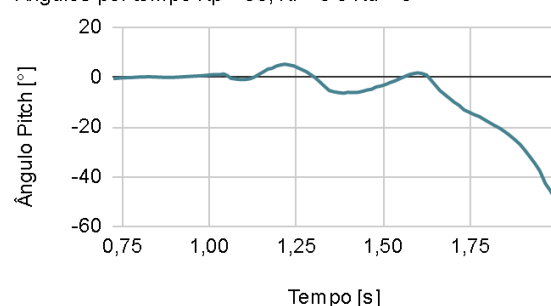


Figura 4. Gráfico de evolução temporal do ângulo

pitch do sistema utilizando apenas ganho proporcional ($K_p = 90$).

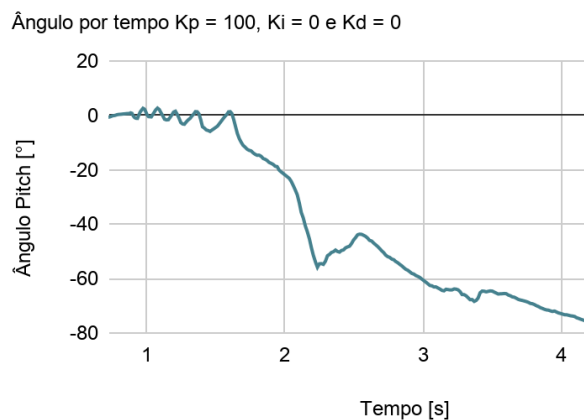


Figura 5. Gráfico de evolução temporal do ângulo pitch do sistema utilizando apenas ganho proporcional ($K_p = 100$).

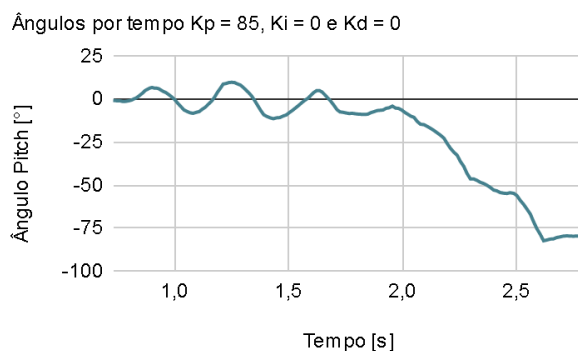


Figura 6. Gráfico de evolução temporal do ângulo Pitch do sistema utilizando apenas ganho proporcional ($K_p = 85$), que por apresentar maior estabilidade foi utilizado como valor base de K_p para os testes subsequentes.

Nesse contexto, a Figura 3 apresenta a resposta obtida para $K_p = 80$, enquanto a Figura 4 corresponde a $K_p = 90$. Em ambos os casos, observa-se melhoria em relação ao comportamento apresentado na Figura 2. Por outro lado, a Figura 5, referente a $K_p = 100$, evidencia novamente um comportamento instável. Diferentemente do observado para $K_p = 70$, o sistema permaneceu equilibrado por um intervalo maior de tempo, porém apresentou respostas excessivamente agressivas, indicando que valores muito elevados do ganho proporcional também podem comprometer a estabilidade do robô.

Considerando os resultados obtidos para $K_p = 80$ e $K_p = 90$, adotou-se o valor intermediário $K_p = 85$. A resposta correspondente é apresentada na Figura 6, na qual o sistema permaneceu oscilando em torno do valor de referência por aproximadamente 2s,

demonstrando desempenho superior aos demais valores testados para o ganho proporcional.

Mantendo-se $K_p = 85$, foram iniciados os ajustes do ganho integral. A Figura 7 apresenta o comportamento do sistema para $K_i = 0,1$ e $K_d = 0$, observando-se um tempo de estabilização superior a 3 s. Em seguida, a Figura 8 apresenta os resultados obtidos para $K_i = 0,2$ e $K_d = 0$. Nesse caso, verificaram-se oscilações de maior amplitude e comportamento mais suave em torno do valor de referência, porém com redução do tempo de equilíbrio para aproximadamente 1,750s, com o robô caindo depois desse intervalo. Dessa forma, o valor $K_i = 0,1$ mostrou-se inicialmente mais adequado para a manutenção da estabilidade do sistema.

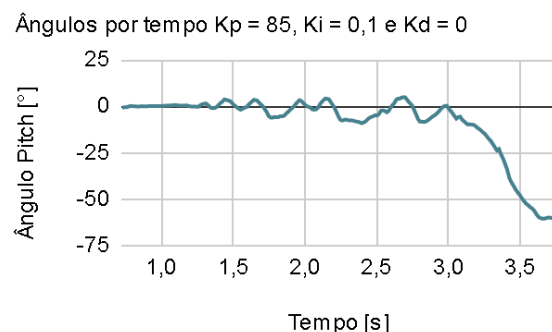


Figura 7. Resposta temporal do ângulo de inclinação do robô equilibrista utilizando as constantes $K_p = 85$, $K_i = 0,1$ e $K_d = 0$.

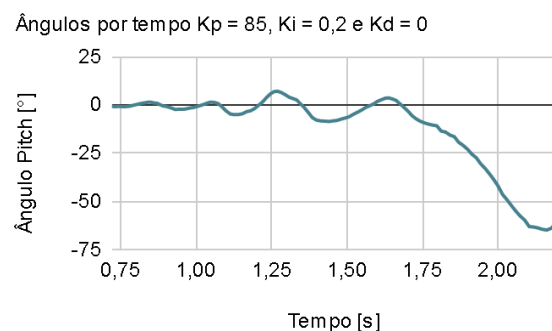


Figura 8. Resposta temporal do ângulo de inclinação do robô equilibrista utilizando as constantes $K_p = 85$, $K_i = 0,2$ e $K_d = 0$.

Por fim, procedeu-se ao ajuste do ganho derivativo. A Figura 9 apresenta a resposta do robô para $K_p = 85$, $K_i = 0,1$ e $K_d = 2$. Apesar da introdução da ação derivativa, observou-se redução do tempo de permanência em equilíbrio, não ultrapassando 3s. Diante desse comportamento, realizou-se um novo ajuste no ganho integral, retornando ao valor $K_i = 0,2$. Os resultados são apresentados na Figura 10, correspondente aos parâmetros $K_p = 85$, $K_i = 0,2$ e $K_d = 2$. Nessa configuração, o controlador apresentou o melhor desempenho dentre os testes

realizados, mantendo o robô equilibrado por mais de 4s.

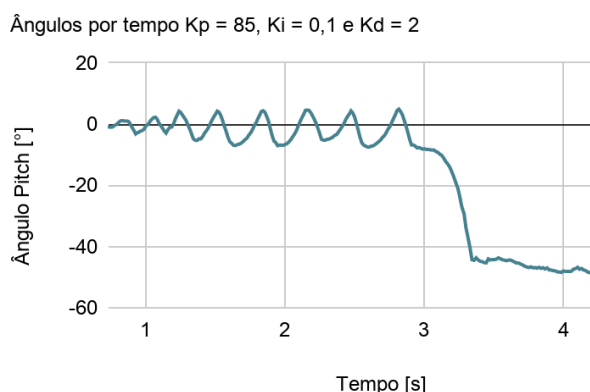


Figura 9. Resposta temporal do ângulo de inclinação do robô equilibrista utilizando as constantes $K_p = 85$, $K_i = 0,1$ e $K_d = 2$.

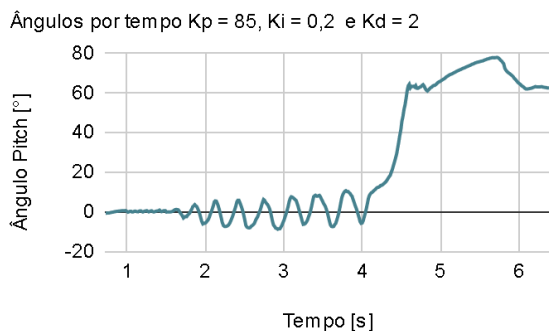


Figura 10. Resposta temporal do ângulo de inclinação do robô equilibrista utilizando as constantes $K_p = 85$, $K_i = 0,2$ e $K_d = 2$.

CONCLUSÃO

O desenvolvimento do robô equilibrista possibilitou a avaliação experimental dos resultados preliminares da implementação e da sintonia de um controlador PID aplicado a um sistema inerentemente instável, já que comporta-se como um pêndulo invertido. Por meio dos ensaios realizados, foi possível analisar a influência dos ganhos proporcional, integral e derivativo sobre a resposta dinâmica do sistema, especialmente quanto ao tempo de estabilização, à amplitude das oscilações e à capacidade de manutenção do equilíbrio.

Assim, após a verificação da eficiência da calibração do sensor MPU6050, os resultados obtidos evidenciaram que diferentes combinações dos parâmetros do controlador produzem comportamentos distintos, reforçando a importância desse processo de sintonia para a obtenção de desempenho aceitável. Dentre as configurações avaliadas, a combinação $K_p = 85$, $K_i = 0,2$ e $K_d = 2$ apresentou o melhor desempenho global, permitindo que o robô permanecesse em equilíbrio por mais de

4s e demonstrando maior estabilidade quando comparada às demais configurações testadas.

Entretanto, alguns fatores experimentais influenciaram o comportamento do sistema. Durante os testes, o posicionamento manual do robô antes da partida introduziu pequenas diferenças nas condições iniciais de cada ensaio, afetando parcialmente a repetibilidade dos resultados. Como trabalho futuro, sugere-se o desenvolvimento de um dispositivo simples de posicionamento, capaz de garantir a mesma inclinação inicial para todos os testes realizados, que inclusive pode tratar-se de um suporte de papelão ou uma espécie de pinça.

Outro aspecto observado foi a utilização de uma fonte externa de 12V conectada por cabos, condição que pode ter limitado a movimentação do robô e introduzido perturbações mecânicas durante sua operação. Nesse sentido, recomenda-se a substituição desse sistema por uma bateria embarcada, proporcionando maior autonomia e reduzindo interferências externas sobre a dinâmica do conjunto.

Ademais, verificou-se que o cabo USB utilizado para comunicação com o Arduino acompanhava parte dos movimentos do robô, assim como o cabo da fonte, possivelmente influenciando levemente sua estabilidade. Como possibilidade de aprimoramento, propõe-se a implementação de comunicação sem fio para aquisição e transmissão dos dados, eliminando restrições físicas impostas pelos cabos e permitindo maior liberdade de movimento ao sistema.

Além disso, embora a sintonia por tentativa e erro tenha produzido resultados satisfatórios, estudos futuros poderão comparar seu desempenho com metodologias sistemáticas de ajuste, como Ziegler-Nichols, visando analisar possíveis ganhos em estabilidade e rapidez de convergência.

Por fim, o trabalho demonstrou a viabilidade da utilização do controlador PID na estabilização de um robô equilibrista baseado em pêndulo invertido, além de evidenciar a relevância da calibração de sensores e da integração entre elementos mecânicos, eletrônicos e computacionais para o desempenho de sistemas embarcados de controle e automação sobretudo de baixo custo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao suporte financeiro da FAPEMIG, processo APQ-07015-24 que permitiu o desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS

José Henrique Vuolo. Fundamentos da Teoria de Erros. 2. ed. Blucher, São Paulo, 1996.



Osama Mamdouh Mostafa, et al. Mechatronics Project: Self-Balance Robot. Helwan University, Cairo, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/371031840_Mechatronics_Project_Two_Wheeled_Self-Balancing_Robot. Acesso em: 16 maio 2026.

Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands. Lições de Física de Feynman: Volume 1. Bookman, Porto Alegre, 2008.

Vinícius Nunes Lage. Desenvolvimento de um controlador PID para estabilização de uma plataforma com dois graus de liberdade (Monografia de Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.