

Victoria Leal Garcia de Souza

**Modelagem e construção de um monociclo
autoequilibrado**

Insper
Engenharia Mecatrônica

Orientador: Dr. Carlos Eduardo Brito de Novaes
Coorientador: Dr. Gabriel Pereira das Neves

São Paulo
2023

Sumário

1	PROPOSTA DE PROJETO	3
1.1	Introdução	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Metodologia	5
1.4	Resultados Esperados	5
1.5	Cronograma	6
	REFERÊNCIAS	7

1 Proposta de Projeto

1.1 Introdução

Um monociclo auto-equilibrado consiste em um veículo que mantém a posição de equilíbrio apenas mantendo uma roda em contato com o chão, utilizando outro sistema de atuação para controlar o ângulo de queda lateral. O controle de um monociclo por meio de uma roda de inércia é um conceito recente que tem sido progressivamente mais explorado na última década. Conforme a literatura até então publicada, há apenas um tal monociclo na América Latina, originalmente construído em 2017 (NEVES, 2017) por um dos professores orientadores. Ele possui dois graus de liberdades controlados: os ângulos de *pitch* e *roll*. O controle do primeiro ângulo é feito através da roda em contato com o chão, enquanto o controle do ângulo de *roll* é feito através de uma roda de reação (NEVES; ANGÉLICO; AGULHARI, 2020). Atualmente o sistema não possui controle no ângulo de *yaw*.

Os ângulos de *pitch*, *roll* e *yaw* são os ângulos em torno dos eixos y , x e z , respectivamente. O desenho esquemático do monociclo, juntamente com o sistema de coordenada de referência, são apresentados na Figura 1. Na Tabela 1, podem ser encontrados os componentes principais do monociclo que estão indicados ao lado.

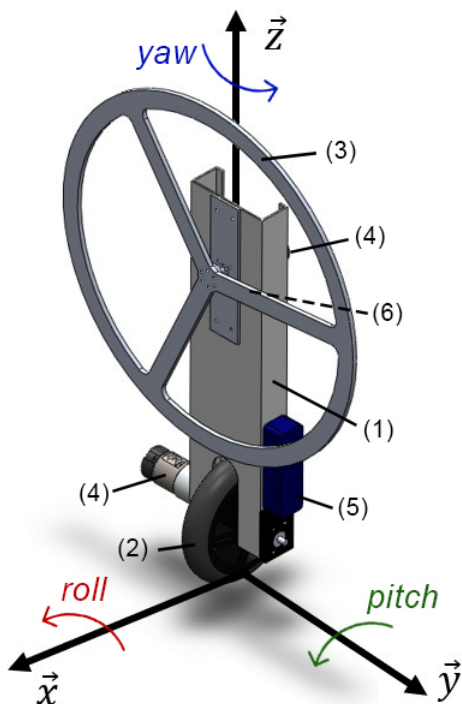


Figura 1 – Desenho esquemático do monociclo.

Peça	Nome	Quantidade
1	Corpo	1
2	Roda de contato	1
3	Roda de inércia	1
4	Motor	2
5	Bateria	1
6	Componentes eletrônicos	-

Tabela 1 – Componentes do monociclo.

O sensoriamento dos ângulos de *pitch* e *roll* é feito usando o acelerômetro e giroscópio presentes no IMU (*Inertial Measurement Unit*) localizado em (6) da Figura 1, cujos sinais são passados por um filtro de Kalman igual para ambos os ângulos. Estes sinais são interpretados pelo microcontrolador, que aciona um ou ambos os motores conectados às rodas ((2) e (3)) de forma que a posição do monociclo volte para a posição de equilíbrio vertical. A modelagem do monociclo foi feita usando a mecânica de Lagrange, o considerando como um pêndulo invertido para as equações de movimento. O modelo não-linear obtido pela equação de Euler-Lagrange foi linearizado para permitir a aplicação de duas técnicas de controle: LQR (*Linear Quadratic Regulator*) e um controlador projetado por norma \mathcal{H}_2 .

Conforme a literatura publicada, ambas as técnicas de controle testadas são capazes de estabilizar a planta rapidamente e usam algoritmos similares, visto que são técnicas de controle de estado por *feedback*. A diferença principal entre ambas as técnicas neste caso é que a norma \mathcal{H}_2 pode ser calculada por um sistema linear de inequações matriciais e pode comportar incertezas de parâmetros.

Há literatura significativa a respeito do controle da estabilidade estática sobre uma roda. Algumas das soluções já existentes para o controle dos graus de liberdade em monociclos autônomos incluem o uso de giroscópios (DEVELOPMENT...,), a adição de uma (HO; RIZAL; CHEN, 2014) ou mais rodas de inércia (GEIST et al., 2022), o uso de força magnética (RUAN et al., 2012), massas móveis afim de mudar o centro de massa (GUO; HE; SONG, 2016) ou o uso de uma *omniwheel* (SHEN; HONG, 2020).

Enquanto o sistema de acionamento de escolha para o controle de estabilidade estática não é um tema pouco explorado, é importante considerar como o monociclo autônomo poderia comportar outros acionadores afim de controlar o ângulo responsável por fazer curvas - o de *yaw*, em torno de z - para poder, posteriormente à construção de um tal monociclo, o fazer seguir trajetórias.

1.2 Objetivos

Este projeto tem como objetivo principal replicar o monociclo autônomo apresentado na introdução. Para tal, foram estabelecidos objetivos intermediários:

- Verificar possíveis melhorias que podem ser feitas ao modelo matemático existente;
- Estudar as técnicas de controle avançado já implementadas e avaliar a implementação de outras técnicas;
- Otimizar a construção da réplica com técnicas de manufatura subtrativa.

1.3 Metodologia

De maneira a atingir o objetivo primário de construir uma réplica do monociclo autônomo apresentado, a metodologia proposta é de inicialmente construir um modelo simulado onde seja possível verificar tanto a parte referente ao modelo matemático quanto à das técnicas de controle, ambas implementadas no monociclo a ser reproduzido. Para construir o modelo simulado, é proposto:

- Revisar a literatura publicada sobre o monociclo de referência;
- Conferir o modelo matemático existente e fazer quaisquer possíveis readequações necessárias;
- Analisar o controle aplicado ao monociclo e verificar a necessidade de implementar outras técnicas;

Uma vez estabelecidos os parâmetros da réplica, haverá necessidade de verificar a disponibilidade para compra dos componentes requeridos (dimensionar os componentes como os motores e bateria que serão utilizados, por exemplo) para que a manufatura e implementação do sistema de atuação seja possível.

Por fim, é de fundamental importância a validação prática para verificar o funcionamento da réplica. A validação será composta dos mesmos testes que foram feitos com o monociclo original - verificar se consegue manter a estabilidade estática e rejeição de perturbação - de forma que seja possível comparar ambos os monociclos.

1.4 Resultados Esperados

Como o objetivo principal é construir uma réplica de um monociclo autônomo com os ângulos *pitch* e *roll* controlados, o primeiro dos resultados esperados é que seja possível replicá-lo seguindo a literatura publicada a respeito da referência. É de se esperar que a etapa de maior risco para este objetivo seja a de manufatura, especialmente no que diz respeito ao redimensionamento do monociclo e as implicações para o nível de precisão que é necessário para algumas peças. A construção de uma réplica de mesma escala e funcionamento igual seria considerada satisfatória para este projeto.

Enquanto é posto como um objetivo intermediário a possibilidade de modificar o controle presente no monociclo, é esperado que as técnicas de controle implementadas na literatura publicada sobre o monociclo estudado sejam suficientemente ótimas para um primeiro protótipo. O mesmo vale para o modelo matemático.

1.5 Cronograma

O cronograma proposto, na Tabela 2, é composto das atividades delimitadas na seção de metodologia, dividido por mês e semestre visando ter uma melhor organização do tempo.

Atividade	1º semestre						2º semestre					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Revisão bibliográfica	x	x	x									
Conferir o modelo matemático	x											
Conferir o controle implementado		x	x									
Elaboração do modelo simulado		x	x									
Compra de materiais e componentes				x	x	x						
Relatório intermediário					x	x						
Manufatura e construção					x	x	x	x	x	x	x	
Testes práticos									x	x	x	x
Validação											x	x
Relatório final												x
Revisão do cronograma	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Tabela 2 – Cronograma proposto para o trabalho.

Referências

DEVELOPMENT of the unicycle-riding robot. <<https://corporate.murata.com/newsroom/news/company/csrtopic/2008/0923>>. Citado na página 4.

GEIST, A. R. et al. The wheelbot: A jumping reaction wheel unicycle. *IEEE Robotics and Automation Letters*, v. 7, n. 4, p. 9683–9690, 2022. Citado na página 4.

GUO, L.; HE, K.; SONG, Y. Design of the sliding mode controller for a kind of unicycle robot. *2016 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, p. 1432–1437, 2016. Citado na página 4.

HO, M.-T.; RIZAL, Y.; CHEN, Y.-L. Balance control of a unicycle robot. In: *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1186–1191. Citado na página 4.

NEVES, G. P. *Modeling, construction and control of a self-balancing unicycle*. 2017. Citado na página 3.

NEVES, G. P.; ANGÉLICO, B. A.; AGULHARI, C. M. Robust H_2 controller with parametric uncertainties applied to a reaction wheel unicycle. *International Journal of Control*, Taylor Francis, v. 93, n. 10, p. 2431–2441, 2020. Citado na página 3.

RUAN, X. et al. Lateral stabilization of a single wheel robot applying electromagnetic force. In: *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 3675–3680. Citado na página 4.

SHEN, J.; HONG, D. Omburo: A novel unicycle robot with active omnidirectional wheel. In: *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 8237–8243. Citado na página 4.