

Victoria Leal Garcia de Souza

**Modelagem, construção e controle de um monociclo
auto-equilibrado**

Inspere

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.

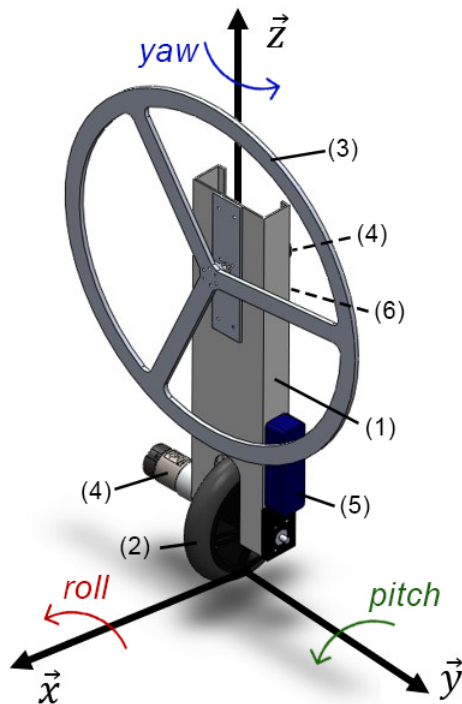


Figura 1 – Desenho esquemático do monociclo.

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. O filtro de Kalman é um estimador ótimo para ruído branco, e portanto muito aplicável para os sinais do IMU. 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..., 2013), 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 às 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 qualquer uma das técnicas de controle implementadas na literatura publicada sobre o monociclo estudado seja suficientemente ótima 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. 2013. <<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 \mathcal{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.