

Victoria Leal Garcia de Souza

**Modelagem e desenvolvimento de um sistema  
atuador para o controle de *yaw* de um monociclo  
auto-equilibrado**

Inspere  
Engenharia Mecatrônica

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

São Paulo  
2024

# Sumário

|            |                                       |          |
|------------|---------------------------------------|----------|
| <b>1</b>   | <b>PROPOSTA DE PROJETO . . . . .</b>  | <b>3</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Introdução . . . . .</b>           | <b>3</b> |
| <b>1.2</b> | <b>Objetivos . . . . .</b>            | <b>5</b> |
| <b>1.3</b> | <b>Metodologia . . . . .</b>          | <b>5</b> |
| <b>1.4</b> | <b>Resultados Esperados . . . . .</b> | <b>6</b> |
| <b>1.5</b> | <b>Cronograma . . . . .</b>           | <b>7</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>          | <b>8</b> |

# 1 Proposta de Projeto

## 1.1 Introdução

Um monociclo autoequilibrado consiste em um veículo que mantém a posição de equilíbrio apenas com uma roda em contato com o chão, utilizando outro sistema de atuação para controlar o ângulo de queda lateral. Conforme a literatura encontrada, há apenas dois tais monociclos na América Latina, sendo o primeiro originalmente construído em 2017 por um dos professores orientadores (NEVES, 2017) e o segundo uma réplica deste, ainda em desenvolvimento (em teoria aqui eu me citaria? mas não sei o melhor jeito).

Ambos possuem dois ângulos controlados: *pitch* e *roll*. O controle de *pitch* é feito através da roda em contato com o chão, enquanto o ângulo de *roll* é controlado através de uma roda de inércia. Considerando a posição de equilíbrio do monociclo (na posição vertical), o *yaw* não é controlado pelas outras duas entradas, logo, é necessário introduzir um novo atuador para garantir a controlabilidade de todos os ângulos.

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 coordenadas de referência, é apresentado na Figura 1. Na Tabela 1, podem ser encontrados os componentes principais do monociclo que estão indicados ao lado.

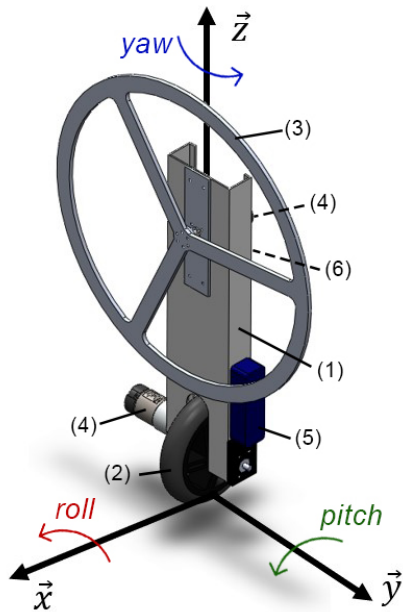


Figura 1 – Desenho esquemático do monociclo, adaptado de (NEVES, 2017).

| 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.

Enquanto há literatura significativa a respeito do controle da estabilidade estática sobre uma roda, não há muita que retrate o controle de trajetórias. Algumas das soluções já existentes em monociclos autônomos para o controle dos graus de liberdade incluem o uso de giroscópios (MURATA, 2013), a adição de uma ou mais rodas de inércia (HO; RIZAL; CHEN, 2014; 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). No entanto, não foram implementadas estas soluções de maneira a controlar apenas o ângulo de *yaw* e tampouco são - com exceção da roda de inércia e *omniwheel* - soluções que tornam o controle dos ângulos independentes um dos outros. É de maior interesse verificar a possibilidade de utilizar um acionador que não tenha interferência na implementação do sistema já existente de controle dos ângulos, visto que o monociclo-referência e sua réplica têm os ângulos de *pitch* e *roll* perfeitamente desacoplados.

Neste projeto, são inicialmente propostas três maneiras de controlar o ângulo de *yaw* a ser implementadas no monociclo-réplica que está sendo desenvolvido. O primeiro método a ser testado, apresentado originalmente em (NEVES, 2017), é por meio de precessão giroscópica. Para controlar o *yaw* assim, é necessário usar a velocidade angular de ambas as rodas como referência para calcular se o raio de giração do monociclo é suficientemente pequeno para que seja possível o controlar pela precessão giroscópica. Um fator complicante é a relação inversa entre a controlabilidade usando precessão giroscópica e o torque necessário para mantê-lo equilibrado em *pitch* e *roll*, visto que exigiria uma velocidade angular alta para gerar precessão suficiente para o giro e, em condição de equilíbrio estático, a velocidade angular de ambas as rodas tende a zero.

O segundo acionador a ser testado seria a adição de duas pequenas hélices, usando propulsão diferencial. Tendo em mente que este seria um método de menor dificuldade de modelagem do que a precessão giroscópica, a dificuldade que este método apresenta é em saber se o par de hélices teria força o suficiente para vencer o atrito estático da roda em contato com o chão e girar o robô. Uma maneira de verificar isto seria empiricamente determinar a força mínima necessária para mover o monociclo neste ângulo por meio de experimentos com a réplica uma vez que sua construção esteja concluída. Se for possível controlar *yaw* desta forma, uma vantagem notável em relação às outras propostas é que as hélices permitem manter os ângulos desacoplados.

A terceira maneira proposta para controlar o ângulo de *yaw* seria a substituição da roda de inércia existente no monociclo por um par de rodas de inércia inclinadas a  $45^\circ$  em relação ao eixo  $x$  do robô. Esta não é vista como uma solução ideal por exigir mudanças muito maiores ao monociclo-réplica do que as propostas supracitadas.

Esta proposta tem o objetivo de pedir a extensão de um ano do projeto "Construção e projeto de controle de um monociclo autoequilibrado", cuja finalização está prevista

para setembro de 2024, considerando a finalização da construção do robô (caso seja necessário) além do desenvolvimento do que é aqui proposto. A partir da conclusão do projeto mencionado, há interesse em apresentar o trabalho em congressos que aceitem projetos de Iniciação (exemplos: SIICUSP (USP), Congresso de Iniciação Científica (UNICAMP) e Cobenge). Com o tempo adicional do projeto seria possível também utilizar o monociclo construído para auxiliar no ensino da disciplina de Controle Moderno.

#### TO DO:

- write a light lit revision like last time? i have 1.5pgs
- consider adding robust control? talk about why it would be interesting to add

## 1.2 Objetivos

Este projeto tem como objetivo principal modificar o monociclo-réplica apresentado na introdução com a finalidade de controlar o terceiro ângulo de Euler (*yaw*), o que consiste em modelar e desenvolver um sistema atuador.

Os objetivos secundários deste projeto são relacionados às técnicas de controle que poderão ser implementadas no monociclo. É de interesse que sejam utilizadas técnicas de controle diferentes do LQR (*Linear Quadratic Regulator*) e controlador PID (*Proportional-Integral-Derivative*) por realimentação de velocidades atualmente sendo implementados no monociclo que está em desenvolvimento. Uma possibilidade seria a implementação de controle robusto no monociclo-réplica como é implementado no monociclo-referência, visto que se sabe que o sistema não funciona muito bem com controladores não-lineares (NEVES, 2017).

## 1.3 Metodologia

De maneira a controlar o ângulo de *yaw* do monociclo, a metodologia proposta é de inicialmente modificar o modelo simulado existente onde seja possível verificar tanto a parte referente ao modelo matemático quanto ao controle implementado no monociclo (ambos os quais deverão ser modificados para comportar o novo acionador). Para construir o modelo simulado, é proposto:

- Revisar a literatura publicada sobre o monociclo de referência e sua réplica;
- Readequar o modelo simulado disponível observando versões mais atuais do MATLAB® e Simulink®;

- Analisar as técnicas de controle aplicadas ao monociclo e verificar a viabilidade de implementar outras técnicas.

De forma a modificar a construção do monociclo o mínimo possível durante o projeto, serão verificadas as três propostas de controlador na ordem que foram apresentadas (precessão giroscópica, hélices com propulsão diferencial e rodas de inércia inclinadas) porque se acredita que haverá menos dificuldade na implementação dos acionadores seguindo esta ordem. O estudo para implementação de cada um dos acionadores irá requerir sua própria revisão bibliográfica de material relevante, modificação do modelo matemático original e simulação para verificação antes da implementação.

Uma vez estabelecido o acionador a ser implementado e os componentes a serem usados, haverá necessidade de verificar a disponibilidade para compra dos componentes requeridos para que a manufatura e implementação do sistema de atuação seja possível. Os componentes comprados serão financiados sem o auxílio da instituição. Usando manufatura subtrativa, serão feitos os outros componentes no *TechLab* ou *FabLab*.

Por fim, é de fundamental importância a validação prática para verificar o funcionamento do novo acionador. A validação será composta de três testes: verificar se o monociclo consegue manter a estabilidade estática de forma autônoma, verificar se o monociclo consegue girar em torno do seu eixo  $z$  e voltar para sua posição original, e um teste de rejeição de perturbação.

## 1.4 Resultados Esperados

Como o objetivo principal é adicionar um acionador para controlar o terceiro ângulo de Euler de um monociclo autônomo com os outros dois ângulos controlados, o primeiro dos resultados esperados é que seja possível encontrar um acionador que seja capaz de controlá-lo. É de se esperar que a etapa de maior risco para este objetivo seja a de modificação do modelo matemático, visto que esta irá determinar a viabilidade ou não da implementação dos três acionadores propostos. A implementação de um acionador que seja capaz de permitir ao monociclo girar, sem a inclusão de um novo controlador, seria considerada satisfatória para este projeto.

Enquanto é posto como um objetivo secundário a possibilidade de modificar o controle presente no monociclo, é reconhecido que a implementação de um novo acionador é uma tarefa não-trivial e portanto não é certo que será possível dedicar tempo adicional para o projeto de novos controladores para o robô.

## 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 | x |   |   |             |   |   |    |    |    |
| Verificação da possibilidade de implementação da precessão giroscópica    | x           | x |   |   |   |   |             |   |   |    |    |    |
| Verificação da possibilidade de implementação das hélices (se necessário) |             |   | x |   |   |   |             |   |   |    |    |    |
| Verificação da possibilidade de implementação das rodas (se necessário)   |             |   |   | x |   |   |             |   |   |    |    |    |
| Alterar o modelo matemático   |             |   |   |   | x |   |             |   |   |    |    |    |
| Alterar o controle implementado   |             |   |   |   | x | x |             |   |   |    |    |    |
| Compra de materiais e componentes (se necessário)                         |             |   |   |   |   | x | x           |   |   |    |    |    |
| Relatório intermediário   |             |   |   |   | x | x |             |   |   |    |    |    |
| Projeto do controlador robusto (se possível)                              |             |   |   |   |   |   | x           | x | x |    |    |    |
| Manufatura e construção (se necessário)                                   |             |   |   |   |   |   | x           | x | x |    |    |    |
| Experimentos para validar dados   |             |   |   |   |   |   | x           | x | x | x  |    |    |
| Testes práticos   |             |   |   |   |   |   |             | x | x | x  | x  |    |
| Validação   |             |   |   |   |   |   |             |   |   | x  | x  |    |
| Relatório final   |             |   |   |   |   |   |             |   |   |    | x  | x  |
| Revisão do cronograma   | x           | x | x | x | x | x | x           | x | x | x  | x  | x  |

Tabela 2 – Cronograma proposto para o trabalho.

# Referências

- 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.
- MURATA, T. *Development of the unicycle-riding robot*. 2013. <<https://corporate.murata.com/newsroom/news/company/csrtopic/2008/0923>>. Citado na página 4.
- NEVES, G. P. das. *Modeling, construction and control of a self-balancing unicycle*. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), 2017. Disponível em: <<https://bv.fapesp.br/pt/dissertacoes-teses/140601/modelagem-desenvolvimento-e-controle-de-um-monociclo-auto-e>>. Citado 3 vezes nas páginas 3, 4 e 5.
- 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.