

Victoria Leal Garcia de Souza

# **Construção e projeto de controle de um monociclo autoequilibrado**

Inspere

Engenharia Mecatrônica

Orientador: Dr. Carlos Eduardo Brito de Novaes

Coorientador: Dr. Gabriel Pereira das Neves

São Paulo

2023

# 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>Revisão Bibliográfica . . . . .</b>	<b>4</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos . . . . .</b>	<b>5</b>
<b>1.4</b>	<b>Metodologia . . . . .</b>	<b>5</b>
<b>1.5</b>	<b>Resultados Esperados . . . . .</b>	<b>7</b>
<b>1.6</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 um tal monociclo na América Latina, originalmente construído em 2017 por um dos professores orientadores (NEVES, 2017). Ele possui 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 reação, também chamada de roda de inércia. 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 coordenadas de referência, é apresentado na Figura 1. Na Tabela 1, podem ser encontrados os componentes principais do monociclo que estão indicados ao lado.

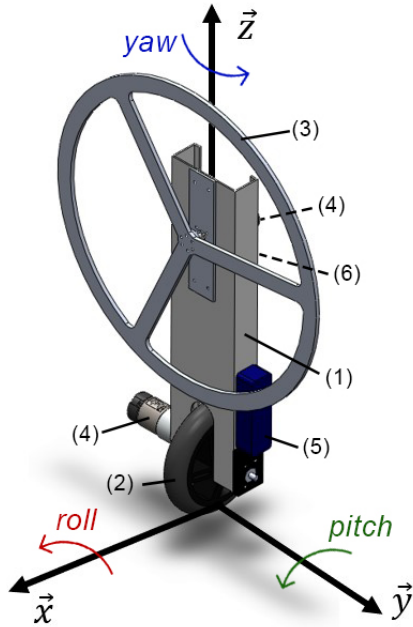


Figura 1 – Desenho esquemático do monociclo.

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.

Há literatura significativa a respeito do controle da estabilidade estática sobre uma roda. Algumas das soluções já existentes em monociclos autônomos 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).

Enquanto o sistema de acionamento de escolha é um tema muito explorado, há uma série de fatores que podem ser relevantes nessa decisão. O primeiro destes é o grau de complexidade atrelado à implementação do acionador e do controle dele, que favorece muito a escolha da roda de inércia ao invés de outros acionadores citados. O controle de um monociclo por meio de uma roda de reação é um conceito recente que tem sido estudado na última década. Ademais, replicar um monociclo onde já é conhecido o sistema de atuação traz vantagens no âmbito de melhorias na construção dele. 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 Revisão Bibliográfica

O sensoriamento dos ângulos de *pitch* e *roll* é feito usando o acelerômetro e giroscópio presentes no IMU (*Inertial Measurement Unit*) localizado na Figura 1. Estes sinais são interpretados pelo microcontrolador, que aciona um ou ambos os motores conectados às rodas de forma que o monociclo volte para a posição de equilíbrio vertical. O IMU é sensível a erros de medição, tanto por ser posto na localização aproximada do centro de massa do monociclo quanto por incertezas dos sensores, então para garantir maior precisão com as leituras, é aplicado um filtro de Kalman nos sinais. O filtro de Kalman (KALMAN, 1960) é um estimador ótimo para ruído branco que trata os parâmetros do processo controlado - o sistema, distúrbios e as incertezas dos sensores - como variáveis aleatórias dentro de uma distribuição normal. Os parâmetros do filtro dependem principalmente do ganho  $K_m$ , que é atualizado conforme as medições para poder responder com maior velocidade às mudanças no sistema minimizando a covariância calculada, no caso onde há mais de uma variável. Como o filtro é dinâmico, o peso da medição feita e do valor estimado são reguladas pelo ganho, que varia com a operação do sistema.

A modelagem do monociclo foi feita usando a mecânica de Lagrange (MORIN, 2007), inicialmente o considerando como um pêndulo invertido para obter as equações de movimento. Para a entrada, foram calculados momentos gerados em relação às quatro coordenadas generalizadas, e foram considerados o atrito viscoso da roda de inércia com o ar e o atrito que a roda de contato tem com o chão, além dos torques de ambos os motores, como a saída. O modelo não-linear obtido pela equação de Euler-Lagrange foi linearizado para permitir a aplicação de controle para que o sistema seja capaz de se manter equilibrado.

Ao longo da construção do monociclo, foram testadas duas técnicas de controle

regulador: primeiro, um LQR (*Linear Quadratic Regulator*), e depois um controlador robusto projetado por norma  $\mathcal{H}_2$  da resposta de impulso do sistema (NEVES; ANGÉLICO; AGULHARI, 2020). São técnicas de controle de espaço de estado por *feedback*, e conforme a literatura publicada, ambas são capazes de estabilizar a planta rapidamente e usam algoritmos similares. O controle por meio do LQR é feito de forma a minimizar o índice de performance que é ponderado principalmente pelas matrizes Q e R para ser possível determinar a matriz K do vetor do controle ótimo. As matrizes Q e R são, respectivamente, as responsáveis pela importância que o modelo dá ao erro dos sinais do IMU, já filtrados, e pelo esforço de controle que é aceitável para controlar o sistema. (OGATA, 2010)

O controle robusto implementado visa minimizar a norma  $\mathcal{H}_2$  da função de transferência da malha fechada, de forma que considera a energia total das entradas e busca otimizar uma saída de escolha para uma condição de desempenho garantido aceitável. Assim como em outros controladores, conforme o ganho  $\gamma$  da função  $\Delta(s)$  no *loop* de *feedback* aumenta, menor é a incerteza a respeito dos parâmetros medidos pelo IMU. (GEROMEL; KOROGUI, 2019)

A diferença principal entre as técnicas é que o controlador por norma  $\mathcal{H}_2$  comporta incertezas de parâmetros ou perturbações na planta e por isso é mais robusto que preciso em relação à referência, enquanto o LQR necessita de um grau de confiança maior em ambos o modelo e o sistema. No entanto, o LQR pode ser considerado um caso particular de um controlador robusto por norma  $\mathcal{H}_2$ , e assim, é esperado que haja semelhanças entre eles. (NEVES, 2017)

### 1.3 Objetivos

Este projeto tem como objetivo principal replicar o monociclo autônomo apresentado na introdução com a finalidade de testar diferentes controladores, incluindo ambas as técnicas implementadas no monociclo de referência - LQR e controlador robusto por norma  $\mathcal{H}_2$  - assim como um controlador PID em cascata a ser projetado. Os objetivos secundários deste projeto são relacionados a melhorias e problemas apontados que foram mencionadas na dissertação (NEVES, 2017). Por exemplo, foram observados problemas com o monociclo decorrentes da manufatura que podem ser evitados por meio do uso de processos mais robustos de manufatura subtrativa.

### 1.4 Metodologia

De maneira a construir uma réplica do monociclo, a metodologia proposta é de inicialmente construir um modelo simulado onde seja possível verificar tanto a parte referente ao modelo matemático quanto ao controle implementado no monociclo. Para construir o

modelo simulado, é proposto:

- Revisar a literatura publicada sobre o monociclo de referência;
- 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.

Para que seja possível minimizar as incertezas paramétricas do primeiro monociclo, seriam necessárias duas informações que permitiriam obter os dados apontados como incorretos. As incertezas sobre distâncias do centro de massa e momento de inércia da roda de reação podem ser minimizadas por meio da inspeção do CAD (*Computer-aided Design*) das peças, e depois verificadas experimentalmente após a manufatura. Referente ao problema do atrito viscoso da roda de inércia com o ar, é proposto refazer o experimento usando o túnel de vento do Laboratório de Ciências Térmicas para validar ou corrigir o parâmetro estimado.

Devido ao alto torque aplicado pelo motor na roda de inércia, ela gera folga no pino após um certo tempo de uso (NEVES, 2017). Assim, é proposto investigar melhores maneiras de acoplá-las ao corpo principal e também a possibilidade de ampliação da área controlável do monociclo, que pode resultar na solução do problema apontado com os motores também. O problema da saturação dos motores poderia ser resolvido buscando motores de maior potência que sejam capazes de estabilizar a planta com um intervalo maior que  $\pm 15^\circ$  em relação à posição de equilíbrio do monociclo, ou alguma mudança no circuito elétrico que o monociclo comporta.

Uma vez estabelecidos os parâmetros da réplica 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, diferente dos componentes consumíveis, como a viga U do corpo. Usando manufatura subtrativa, serão feitos os outros componentes do monociclo no TechLab. O corpo será cortado de uma viga U usando serramento, a roda de inércia será cortada na máquina de corte a plasma e a peça que une a roda de inércia ao corpo será usinada usando uma máquina CNC (*Computerized Numerical Control*) para garantir sua precisão.

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 o monociclo consegue manter a estabilidade estática de forma autônoma e um teste de rejeição de perturbação - de forma que seja possível comparar ambos os monociclos.

## 1.5 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 o controle robusto por norma  $\mathcal{H}_2$  seja uma melhor escolha para o sistema, visto que o LQR pode apresentar os mesmos problemas do monociclo original devido às incertezas. É reconhecido que possivelmente não haja como obter dados mais acurados do que os já testados, porém qualquer melhoria ou confirmação quanto às incertezas poderia resultar em uma performance muito melhor da planta. Também é esperada uma boa performance do controlador PID em ambiente de simulação.

## 1.6 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			x	x				
Conferir o modelo matemático	x	x										
Revisar o controle implementado		x	x									
Elaboração do modelo simulado		x	x	x								
Alteração ou adaptação do modelo			x	x			x	x				
Compra de materiais e componentes				x	x	x						
Relatório intermediário					x	x						
Manufatura e construção					x	x	x	x	x			
Experimentos para validar dados							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 3.
- GEROMEL, J. C.; KOROGUI, R. H. Robustez. In: \_\_\_\_\_. *Controle Linear de Sistemas Dinâmicos*. 2. ed. [S.l.]: Blucher, 2019. p. 279–300. Citado na página 5.
- 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 3.
- KALMAN, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering*, v. 82, n. Series D, p. 35–45, 1960. Citado na página 4.
- MORIN, D. *Chapter 6: The Lagrangian Method*. [S.l.]: Harvard Edu, 2007. <<https://scholar.harvard.edu/files/david-morin/files/cmchap6.pdf>>. 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 3.
- 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, 5 e 6.
- NEVES, G. P. das; 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 5.
- OGATA, K. 10-8 quadratic optimal regulator system. In: \_\_\_\_\_. *Modern Control Engineering*. 5. ed. [S.l.]: Pearson, 2010. p. 793–806. Citado na página 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 3.
- 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.