

Wilson Siou Kan Chow

Projeto de Automação de um Mini-Segway
Trabalho de Conclusão de Curso

Brasil

2021, v-1.0.0

Wilson Siou Kan Chow

Projeto de Automação de um Mini-Segway

Trabalho de Conclusão de Curso

Projeto e prototipagem de um mecanismo que se equilibra duas rodas (“mini-segway”) .

Universidade de São Paulo - USP

Escola Politécnica

Programa de Graduação

Orientador: Flávio Celso Trigo

Brasil

2021, v-1.0.0

Wilson Siou Kan Chow

Projeto de Automação de um Mini-Segway

Trabalho de Conclusão de Curso/ Wilson Siou Kan Chow. – Brasil, 2021, v-1.0.0-
30 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Flávio Celso Trigo

TCC – Universidade de São Paulo - USP

Escola Politécnica

Programa de Graduação, 2021, v-1.0.0.

1. robô. 2. equilíbrio. 3. Arduino. 4. Segway. 5. controle.

I. Flávio Celso Trigo. II. Universidade de São Paulo. III. Escola Politécnica. IV. Projeto de um Mini-Segway.

Wilson Siou Kan Chow

Projeto de Automação de um Mini-Segway Trabalho de Conclusão de Curso

Projeto e prototipagem de um mecanismo que se equilibra duas rodas (“mini-segway”) .

Trabalho aprovado. Brasil, 24 de novembro de 2022:

Flávio Celso Trigo
Orientador

Brasil
2021, v-1.0.0

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,
quando pequenas, sonharam em fazer algo grandioso.*

Agradecimentos

Os agradecimentos principais são direcionados aos professores Flávio Celso Trigo, e Alberto Hernandes Neto que auxiliaram diretamente na criação deste trabalho, orientando o autor sobre os cálculos a serem feitos e os modelos a serem seguidos.

Os agradecimentos finais são direcionados à minha família (pais e irmã), que me ensinaram sobre humildade.

*“Dedicação é um talento em si”
(Alphonse Eldric)*

Resumo

O objetivo deste trabalho é relatar o procedimento da criação de um Mini-Segway, desde a sua prototipação, montagem, programação até os seus testes. Desta forma, primeiro foram identificadas as leituras que o robô terá de fazer para que consiga se manter de pé em duas rodas, utilizando um sistema computacional Arduino. Depois, foram feitos diversos cálculos para a modelagem matemática do sistema, seja ela linearizada ou não, para que enfim, utilizando um programa em MATLAB®, o sistema pudesse ser simulado. Desta forma, tanto a simulação quanto o controle usado para o equilíbrio foram criados e testados antes mesmo do robô existir.

Depois que os métodos de controle foram analisados, foi feita uma extensa pesquisa bibliográfica para se determinar os componentes necessários para o projeto.

Palavras-chave: robô. equilíbrio. Arduino. Segway. controle.

Abstract

The objective of this work is to explain the process of the creation of a Mini-Segway, from its prototyping, assembly, coding to testing. Thus, firstly were identified the readings that the robot will have to make so that it stands on two wheels, using an Arduino computational system. After, diverse calculations were made for the mathematical modeling of the system, linearized or not, and with that, utilizing a program in MATLAB®, the system could be simulated. In that way, both simulation and control created for the equilibrium were created and tested before the robot even existed.

After the control methods were analysed, an extensive bibliographic research was made to determine the necessary components for the project

Keywords: robot. equilibrium. Arduino. Segway. control.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Segway I2 SE (SEGWAY, 2016)	14
Figura 2 – Zippy, o Mini-Segway (MCGOVERN, 2015)	15
Figura 3 – Modelo do pêndulo invertido de base livre (TILBURY et al., 1995) . . .	18
Figura 4 – Novo ângulo de referência (Autoria própria)	20

Lista de tabelas

Lista de abreviaturas e siglas

POLI-USP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
SIMO	Single Input, Multi-Output

Lista de símbolos

M	Massa do carro
m	Massa do pêndulo
CM	Centro de massa do pêndulo
l	Distância do centro de massa do pêndulo ao seu eixo de rotação
N	Força Normal
F	Força que o chão empurra as rodas do robô
u	Força que o chão empurra as rodas do robô (nova convenção)
θ	Ângulo do pêndulo com a vertical
ϕ	Ângulo do pêndulo com a vertical (nova orientação)
x	Deslocamento horizontal da base móvel
\dot{x}	Velocidade horizontal da base móvel
\ddot{x}	Aceleração horizontal da base móvel
A	Matriz de estados
x	Vetor de estados
B	Matriz de entradas
u	Vetor de entradas

Sumário

	INTRODUÇÃO	14
I	MODELAGEM	16
1	MODELAGEM	17
1.1	Objetivo	17
1.2	O que será analisado	17
1.3	Representação do Modelo	17
1.4	Modelo matemático linearizado	18
1.4.1	Equação do movimento - Método TMCM e TMQM	18
1.4.1.1	Linearização	20
1.4.2	Espaço de Estados	21
II	CONTROLE	22
2	CONTROLE	23
III	TECNOLOGIA ARDUINO	24
3	CONHECIMENTOS DE ARDUINO	25
3.1	Software Arduino	25
3.2	Placa Arduino Uno	25
3.3	Módulo Bluetooth HC06	25
3.4	Driver L298N	25
4	PESQUISA ON-LINE	26
4.1	Componentes Iniciais	26
IV	CRIAÇÃO E MONTAGEM DO PROTÓTIPO	28
5	CONCLUSÃO	29
	REFERÊNCIAS	30

Introdução

A história do controle moderno tem raízes na rivalidade entre a tecnologia soviética e a americana, as duas potências mundias naquela época.

Depois da primeira guerra, os países entenderam que o conceito de "automação" era algo a ser entendido e explorado. Na década de 1920, haviam vastos esforços para se automatizar a direção dos navios de guerra e o voo dos aviões, em busca de aperfeiçoar as ferramentas que já eram consideradas perfeitas (BOLTON, 2002).

Em 1957, o lançamento do satélite espacial Sputnik e seu sucesso fez com que Moscou se tornasse uma potência na ciência do controle, tanto que se tornou a localização do Primeiro Congresso da Federação Internacional do Controle Automático, em 1960 (FRIEDLAND, 2005).

O controle, deveras importante, hoje é aplicado sorrateiramente em muitos equipamentos do cotidiano sem serem notados. Desde carros a máquinas de ar-condicionados, a sua presença quase não é notada, embora realize uma grande parte do trabalho. Desta forma, deveria ser muito mais conhecido e entendido porque a sua aplicação em projetos tem um papel essencial.

Neste trabalho, busca-se mostrar que o Controle (especialmente o PID) é implementável em sistemas aparentemente complexos, neste caso, o mini-Segway, que se trata de um robô que se sustenta em duas rodas, sem a necessidade de nenhum suporte.



Figura 1 – Segway I2 SE (SEGWAY, 2016)

Segway é na verdade a marca registrada de um veículo pessoal de duas rodas. Este é

um tema que está crescendo no mercado de tecnologia pois pode reduzir bastante o tempo gasto em deslocamento de produtos, e além disso um exemplo muito simples que consegue implementar o Controle de forma que os passos estejam bem claros e compreensíveis, até para os olhos destreinados de alunos.

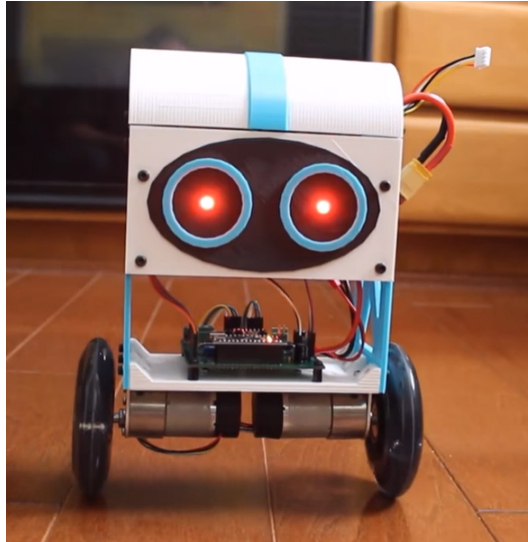


Figura 2 – Zippy, o Mini-Segway ([MCGOVERN, 2015](#))

Pouca bibliografia explicita detalhadamente os passos da criação deste projeto em específico, dessa forma, fica difícil o aluno conseguir associar o que foi visto em sala de aula com um projeto de verdade como este. Espera-se que ao fim deste relatório, o leitor possa entender mais facilmente os estágios deste projeto e conseguir absorver os métodos do Controle, sem precisar passar horas excruciantes para aprender vagamente sobre esta disciplina.

Parte I

Modelagem

1 Modelagem

1.1 Objetivo

Segundo [Kulakowski, Gardner e Shearer \(2007a\)](#), o objetivo de se fazer a modelagem do sistema é conseguir prever a sua resposta para várias situações diferentes, que têm parâmetros diferentes. É possível terminar o projeto sem esta etapa, ou seja, montando o robô diretamente evitando cálculos, porém o engenheiro estaria se submetendo a erros, aproximações que resultariam em tempo gasto, resultados insatisfatórios e gastos desnecessários. Dessa forma, a modelagem será feita para que o projeto possa ser concluído com maior êxito e eficiência.

Devido à flexibilidade do modelo matemático, muitas possibilidades de funcionamento podem ser exploradas, que não seriam possíveis usando um protótipo físico. Porém, deve-se lembrar que o modelo é uma tentativa de se simular a realidade, que muitas vezes possui imperfeições, como falha de fabricação e impurezas. Além disso, representar matematicamente movimentos muito complexos podem deixar as equações demasiadamente complexas, dificultando a sua simulação devido a necessidade de um poder computacional maior. Dessa forma, existem alguns meios simplificação do sistema, como a linearização de termos.

1.2 O que será analisado

O primeiro passo para se aplicar o controle a um sistema é criar a modelagem matemática do mesmo.

Neste projeto, o robô terá de entender o que significa estar "caindo" e o que significa estar "equilibrado". Em outras palavras, ele deverá ter sensores que irão servir de entrada para dois tipos de dados: o ângulo que o corpo faz com a horizontal e a rotação dos motores, que empurra a parte inferior de seu corpo para frente ou para trás. Desta forma, o modelo deve se basear especificamente nessas leituras, que embora sejam apenas duas, são o suficiente para que se atinja o seu objetivo.

1.3 Representação do Modelo

O Segway pode ser visto mais simplificada como um pêndulo invertido em uma base livre, que se mexe na horizontal. Esse, em um plano 2-D, representa bem o robô, que se equilibra em duas rodas e que se movimenta para trás e para frente. Embora o

motor esteja fixo na estrutura, é necessário considerar uma base livre devido ao peso do motor e sua trajetória, que translada em relação ao chão. A força F que atua na figura 3 é a força feita pelo chão, que empurra o carro para frente devido à rotação dos motores e à força de atrito entre o chão e as rodas.

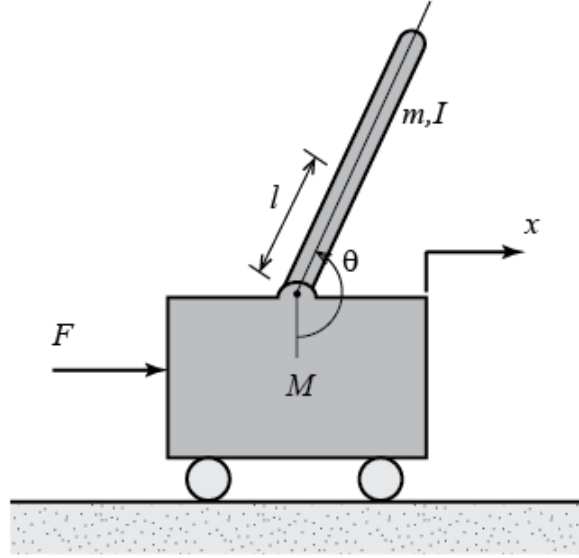


Figura 3 – Modelo do pêndulo invertido de base livre (TILBURY et al., 1995)

Este modelo consegue aproveitar as leituras do giroscópio e do motor (gerada pelo *encoder*). O funcionamento dos componentes irá ser mais explicado em capítulos posteriores.

1.4 Modelo matemático linearizado

1.4.1 Equação do movimento - Método TMCM e TMQM

Aplicando o DCL, temos que no carro, pelo Teorema do movimento do centro de massa (TMCM) e considerando um deslocamento positivo em x :

$$\sum_{\text{carro}} F_x = M \cdot \ddot{x} \quad (1.1)$$

$$\sum_{\text{carro}} F_x = F - N - b\dot{x} \quad (1.2)$$

$$F = M\ddot{x} + b\dot{x} + N \quad (1.3)$$

Para se fazer a soma das forças horizontais e das forças verticais no pêndulo, deve se lembrar que, usando o centro de massa do pêndulo, é possível utilizar o TMQM da seguinte forma:

$$\sum F_y = ma_y = m \frac{d}{dt} \left(\frac{d}{dt} (l \cdot \cos\theta) \right) \quad (1.4)$$

É importante lembrar que nesse sistema, está ocorrendo um deslocamento em X, e portanto, na horizontal temos a seguinte equação:

$$\sum F_x = ma_x = m \frac{d}{dt} \left(\frac{d}{dt} (x + l \cdot \sin\theta) \right) \quad (1.5)$$

O que resulta nas duas respectivas equações abaixo:

$$P = mg - ml\ddot{\theta}\sin\theta - ml\dot{\theta}^2\sin\theta \quad (1.6)$$

$$N = m\ddot{x} + ml\ddot{\theta}\cos\theta - ml\dot{\theta}^2\sin\theta \quad (1.7)$$

Percebe-se que a equação 1.6 não será útil para o trabalho, pois não relaciona a angulação do pêndulo com a do movimento horizontal das futuras rodas.

Lembrando-se da relação 1.3, é possível se livrar do termo **N** da equação 1.7, obtendo uma das equações que governam o sistema:

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\theta}\cos\theta - ml\dot{\theta}^2\sin\theta = F \quad (1.8)$$

A seguir, deve se usar o Teorema do Momento da Quantidade de Movimento (TMQM ou TQMA), usando como referência o centro de massa do pêndulo, temos:

$$I\ddot{\theta} = -Pl\sin\theta - Nl\cos\theta \quad (1.9)$$

Somando-se as forças perpendiculares ao pêndulo, temos que:

$$P\sin\theta + N\cos\theta - mg\sin\theta = ml\ddot{\theta} + m\ddot{x}\cos\theta \quad (1.10)$$

Combinando 1.9 e 1.10, temos a segunda e última equação do movimento:

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} + mgl\sin\theta = -ml\ddot{x}\cos\theta \quad (1.11)$$

1.4.1.1 Linearização

Para esse modelo, é necessário linearizar os cossenos e senos. Desta forma, para ser mais conveniente, o ângulo a ser analisado será ϕ , onde:

$$\theta = \pi + \phi \quad (1.12)$$

Assim, o controle do movimento fica mais simplificado deixando a vertical como referência para o modelo.

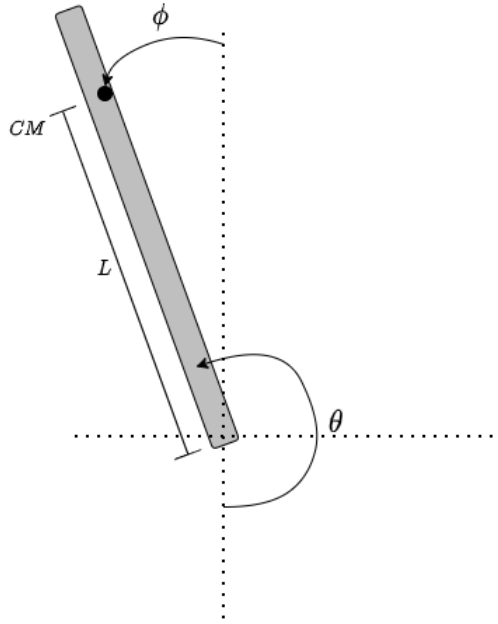


Figura 4 – Novo ângulo de referência (Autoria própria)

Considerando então que o valor de ϕ tem um módulo menor que 15 graus, podemos considerar as seguintes igualdades:

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \cos(\pi + \phi) \approx -1 \\ \sin\theta &= \sin(\pi + \phi) \approx -\phi \\ \dot{\theta}^2 &= \dot{\phi}^2 \approx 0 \end{aligned} \quad (1.13)$$

Finalmente, aplicando a linearização em 1.8 e 1.11, teremos as equações do movimento linearizadas:

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} - m\ddot{\phi} = F \quad (1.14)$$

$$(I + ml^2)\ddot{\phi} - mgl = ml\ddot{x} \quad (1.15)$$

1.4.2 Espaço de Estados

Qualquer vetor $x(t)$ é representado por um ponto no Espaço de Estados. No caso deste projeto, a ideia é poder utilizar as leituras de x e ϕ para se obter os valores para poder controlar o equilíbrio do Segway.

O espaço de estados possui a seguinte forma:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{1.16}$$

Nota-se que o termo forçante é representado por u , e por isso, das equações obtidas acima (1.14 e 1.15), o termo F será substituído por u por conveniência.

As matrizes A e B são, respectivamente, a matriz de estados e a matriz de entradas, e os vetores x e u são respectivamente o vetor de estados e o vetor de entradas.

Ele pode ser feito isolando-se as variáveis de interesse da seguinte forma:

Temos as equivalências triviais:

$$\dot{x} = \dot{x} + 0u\tag{1.17}$$

$$\dot{\phi} = \dot{\phi} + 0u\tag{1.18}$$

E as equações obtidas fazendo substituições em 1.14 e 1.15:

Feito isso, o espaço de estados obtido foi:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-(I+ml^2)b}{I(M+m)+Mml^2} & \frac{m^2gl^2}{I(M+m)+Mml^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{-mlb}{I(M+m)+Mml^2} & \frac{mgl(M+m)}{I(M+m)+Mml^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{I+ml^2}{I(M+m)+Mml^2} \\ 0 \\ \frac{ml^2}{I(M+m)+Mml^2} \end{bmatrix} u\tag{1.19}$$

Para o vetor de saídas (a parte medida, ou observada), foi obtida a matriz de saídas:

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u\tag{1.20}$$

Com o espaço de estados feito, é possível simular o modelo matemático utilizando o MATLAB® no próximo capítulo.

Parte II

Controle

2 Controle

Assim que a modelagem matemática foi feita, ela poderá ser controlada utilizando métodos mais diversos de controle. Muitos dos métodos de controles foram baseados de ([KULAKOWSKI; GARDNER; SHEARER, 2007b](#)), bibliografia recomendada em na disciplina PME3380 Modelagem de Sistemas Dinâmicos.

Parte III

Tecnologia Arduino

3 Conhecimentos de Arduino

Nos componentes referentes ao funcionamento, todos eles são um pouco estranhos à primeira vista. Apenas sabe-se das suas funções, mas nada se entende sobre o próprio funcionamento e aplicação deles apenas os vendo. Desta forma, neste capítulo, busca-se descrever cada um deles com o intuito de aprender mais sobre eles.

3.1 Software Arduino

Segundo os seus criadores, "O Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em hardware e software fáceis de usar"([ARDUINO, 2018](#)). Com ele, é possível desenvolver programas muito abrangentes, que incluem detecção de ângulos, luzes, movimento, leituras de proximidade, humidade do ar, entre muitos. Utilizando a linguagem C++, Também é uma poderosa ferramenta que embarca a lógica de funcionamento na placa principal, e quando ligada, processa o código infinitamente.

3.2 Placa Arduino Uno

Esta placa é o componente principal, onde computa as igualdades lógicas, salva valores e passa os comandos. Desta forma, é um componente comum em todos os sistemas de Arduino.

3.3 Módulo Bluetooth HC06

Para poder controlar o robô, é necessário conectar-se à placa Arduino Uno de alguma forma, e sem fios de preferência. Desta forma, este módulo irá cumprir esta tarefa.

3.4 Driver L298N

É um driver necessário para se comandar o motor que rotaciona as rodas.

4 Pesquisa On-Line

A maioria das bibliografias utilizadas neste projeto são vídeos do Youtube, que mostram o funcionamento do Segway com bastante clareza. Foram vistos muitos modelos, e a maioria dos robôs não conseguiam ficar parados de pé, alguns apresentavam uma reação "engasgada", e raras exceções ficavam parados de pé, mesmo depois de um empurrão.

Portanto, os projetos que tinham apresentavam melhor desempenho como o de [Mcgovern \(2015\)](#), tiveram uma credibilidade maior. Aqueles que não se equilibravam bem foram deixados de lado.

Nota-se que a tunagem do controle PID deve ser feita considerando o a massa e o centro de massa, pois parecem ser fatores determinantes no equilíbrio da máquina. Além disso, os autores parecem ter escolhido rodas que possuíam um alto fator de atrito com o chão, proporcionando aos modelos a vantagem de não precisar considerar o escorregamento da roda.

4.1 Componentes Iniciais

Com base nos exemplos encontrados na Internet, é possível afirmar que existem componentes voltados para a estrutura e para o funcionamento do mini-Segway. Estes componentes são importantes, e devem ser pensados com antecedência para que a forma do robô possa ser prevista e que o funcionamento dele também possa ser projetado e simulado. Assim, eles também são essenciais.

Os componentes destinados à estrutura são variados foram extraídos de [Black \(2015\)](#), mas principalmente contém:

- Duas rodas;
- Três placas;
- Quatro parafusos longos;
- Vinte porcas, para os parafusos;

Segundo Os componentes destinados ao funcionamento são os seguintes:

- Dois motores com alguma redução de engrenagem e encoder;
- Um ou Dois drivers de motor Arduino;

- Um módulo BlueTooth Arduino HC06;
- Um módulo giroscópio Arduino;
- Uma placa Arduino Uno;
- Um kit de baterias 12V;

Parte IV

Criação e montagem do protótipo

5 Conclusão

Foi feita uma extensa pesquisa para se modelar numericamente o mini-Segway. Porém, espera-se que o desempenho real do robô seja de certa forma diferente do movimento simulado, pois podem existir imperfeições que não foram levadas em conta.

Referências

ARDUINO. *What is Arduino?* 2018. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 25 out 2021. Citado na página 25.

BLACK, P. *Balancing Robot 2 : Arduino Program Code*. 2015. Vídeo do Youtube. Disponível em: <<https://youtu.be/YDmPUd5ZaCw>>. Acesso em: 13 out 2021. Citado na página 26.

BOLTON, W. *Control Systems*. 1. ed. Mineola, Nova Iorque: Newnes, 2002. Citado na página 14.

FRIEDLAND, B. *Control System Design, An Introduction to State-Space Methods*. Dover. Mineola, Nova Iorque: Dover Publications, INC., 2005. Citado na página 14.

KULAKOWSKI, B. T.; GARDNER, J. F.; SHEARER, J. L. *Dynamic Modeling and Control of Engineering Systems*. 3. ed. New York, NY, USA: Cambridge Press, 2007. 2-3 p. Citado na página 17.

KULAKOWSKI, B. T.; GARDNER, J. F.; SHEARER, J. L. *Dynamic Modeling and Control of Engineering Systems*. 3. ed. New York, NY, USA: Cambridge Press, 2007. Citado na página 23.

MCGOVERN, L. *Zippy Pt I: The Arduino Nano Balancing Robot*. 2015. Vídeo do Youtube. Disponível em: <<https://youtu.be/HS3fPfnke8o>>. Acesso em: 13 out 2021. Citado 3 vezes nas páginas 9, 15 e 26.

SEGWAY. *Segway i2 SE*. 2016. Disponível em: <<https://www.segway.com/segway-i2-se-pt>>. Acesso em: 27 out 2021. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 14.

TILBURY, D. et al. *Control Tutorials for MATLAB® & SIMULINK®*. 1995. Site. Disponível em: <<https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?aux=Home>>. Acesso em: 24 out 2021. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 18.