

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE INFORMÁTICA  
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

WILLIAN AMERICANO LOPES

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE ROBÔ AUTÔNOMO SEGUIDOR  
DE LINHA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PATO BRANCO**  
**2016**

**WILLIAN AMERICANO LOPES**

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE ROBÔ AUTÔNOMO SEGUIDOR  
DE LINHA**

Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 1, do Curso Superior de Engenharia de Computação do Departamento Acadêmico de Informática - DAINF - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de “Engenheiro de Computação”.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Favarim  
Co-orientador: Prof. Dr. Eng. César Rafael  
Claire Torrico

**PATO BRANCO**

**2016**

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>3</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	3
1.2 JUSTIFICATIVA	4
1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO	5
1.4 OBJETIVOS	5
1.4.1 Objetivo geral	5
1.4.2 Objetivos específicos	6
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>7</b>
2.1 ROBÓTICA	7
2.1.1 Robótica móvel	8
2.1.2 Robôs seguidores de linha	8
2.2 SISTEMA EMBARCADO	8
2.3 REGRAS DA ROBOCORE PARA ROBÔS SEGUIDORES DE LINHA	9
2.3.1 Especificação dos robôs	9
2.3.2 Especificações do Percurso	9
<b>3 MATERIAIS</b>	<b>11</b>
3.1 MICROCONTROLADOR	11
3.2 MOTORES CC	11
3.3 PONTE H	12
3.4 ENCODER MAGNÉTICO	12
3.5 SENSORES DE REFLETÂNCIA	12
3.6 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	12
3.7 MÓDULO BLUETOOTH	12
3.8 RODAS	13
3.9 BATERIA LIPO	13
3.10CONVERSOR STEP-UP	13
3.11ESFERA DESLIZANTE	13
<b>4 CRONOGRAMA PRELIMINAR</b>	<b>14</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>15</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo está dividido da seguinte forma: A Seção 1.1 traz uma visão geral do tema abordado, a Seção 1.2 trata da justificativa desta pesquisa, a Seção 1.3 trata as limitações do projeto e a Seção 1.4 trata dos objetivos a serem alcançados neste trabalho.

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A robótica é uma das áreas mais promissoras da engenharia, tendo aplicabilidade em várias áreas: de médicas a aeroespaciais, sempre oferecendo produtividade e flexibilidade à sua aplicação. Tanto que se torna difícil encontrar atividades industriais atuais que não possuam um sistema robótico ou automatizado, seja total ou parcialmente.

Devido à ampla aplicabilidade e utilidade que os robôs apresentam foram criadas competições, que visam estimular e contribuir com a pesquisa na robótica, tais como:

- A Robogames (2016) que também é conhecida como “Olimpíada dos robôs”, em que são disputadas mais de cinquenta categorias;
- A VEX Worlds (2016), a maior competição de robótica do mundo, que contou com 1075 times e mais de 15.000 participantes em sua última edição (RECORDS, 2016);
- A RoboCup (2016), que em 2016 foi sediada em Leipzig, Alemanha;
- A Robocore (2016a), com eventos realizados no Brasil.

O WinterChallenge, realizado anualmente pela Robocore, em São Paulo, é um dos maiores eventos de robótica da América Latina, contando com a participação de vários países e teve mais de mil competidores e cerca de quinhentos robôs na edição de 2016 (MAUÁ, 2016).

Uma das categorias disputadas é a dos seguidores de linha, na qual os robôs devem seguir, de maneira autônoma, um trajeto que é determinado por uma linha. Nessa categoria, se destacam os competidores do Japão, na competição Robogames, e do México, na Robocore, estes obtendo os três primeiros lugares

na competição WinterChallenge na categoria Seguidor de Linha - Pro (ROBOCORE, 2016b). Competindo nesta mesma categoria, a equipe Patobots, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Câmpus Pato Branco, conquistou o 5º e 6º lugar, com os robôs *Alpha project* e *Robbie 3.0*, respectivamente.

Com base nesse contexto, este trabalho propõe a construção de um protótipo de um robô seguidor de linha e o seu respectivo controle, visando participar de competições nacionais de robótica, como a Robocore.

O desenvolvimento deste trabalho contribuirá com a pesquisa que é feita na Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco, na área de robótica móvel, onde já foram produzidos os trabalhos de Guadagnin (2014) e Petry (2016), os quais servem de base para este trabalho.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O trabalho de Guadagnin (2014), utilizou-se de controle híbrido, o qual integrou dinâmicas de controle discreto, como detecção de marcas laterais e a faixa central na pista, e contínuo, como o controlador Proporcional Integral Derivativo (PID). Segundo o autor, o robô funcionou de acordo com o esperado para um percurso dentro das normas da Robocore, tendo alguns problemas relacionados à detecção das marcas laterais quando a pista estava com uma inclinação maior que 5º (graus).

O trabalho de Petry (2016) desenvolveu um robô híbrido, realizando um estudo sobre os resultados obtidos por controladores PID e *Fuzzy* (lógica difusa), sendo que o controlador PID apresentou melhor desempenho. Segundo o autor, não foi obtido sucesso considerável com a técnica *Fuzzy*, que necessitava de um processador com poder computacional maior do qual foi utilizado, com memória suficiente para implementar as variáveis de controle. Devido às dificuldades encontradas, a comparação dos métodos foi realizada no robô 3pi, da Pololu, no qual o autor conseguiu uma velocidade de 2 m/s em retas.

Comparando os sistemas de controle desenvolvidos verificou-se que o *Fuzzy* necessita de um processador bem mais eficiente comparado ao PID, com memória suficiente para implementar as variáveis de controle, além de maior poder computacional para processamento matemático, possibilitando o sistema de controle compensar o erro em tempo hábil.

Com base nos trabalhos de Guadagnin (2014) e Petry (2016), é proposta a

modelagem de um novo *hardware*, utilizando-se de técnicas de controle híbrido, o qual combina dinâmicas discretas (orientadas a eventos) e contínuas (orientadas a tempo) (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008). Também propõe-se a utilização de um microcontrolador com Unidade de Ponto-Flutuante (FPU), que pode facilitar a implementação de técnicas mais complexas e que exigem maior poder computacional e memória.

### 1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Este trabalho apresenta as seguintes limitações:

1. Devido à complexidade que é o projeto e a implementação de um robô, este trabalho não se preocupará com o desenvolvimento mecânico do dispositivo, sendo que a estrutura mecânica da mesma será confeccionada sobre uma placa de circuito impresso;
2. Devido à dificuldade em encontrar e adquirir peças de alto desempenho, poderão ser utilizadas peças de menor custo, as quais podem reduzir as capacidades do robô;
3. O projeto do robô seguidor de linha se aterá ao funcionamento em pistas que seguem as normas da Robocore, podendo apresentar restrições de comportamento e até mesmo não funcionar, caso a pista não esteja no padrão estabelecido.

### 1.4 OBJETIVOS

#### 1.4.1 OBJETIVO GERAL

Projetar e implementar um protótipo de um robô seguidor de linha, com velocidade próxima a 2 m/s, que seja autônomo, através da utilização de controle híbrido, aperfeiçoando as técnicas desenvolvidas por Petry (2016).

#### 1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Projetar e confeccionar a estrutura do protótipo, visando atender as dimensões especificadas pela Robocore;
- Projetar o condicionamento de sinais para os dispositivos a serem utilizados, permitindo uma boa precisão na leitura dos sensores;
- Implementar o controlador PID, de modo a obter um controlador robusto e estável;
- Realizar testes com o protótipo em pistas que sigam as normas da Robocore;
- Implementar um sistema de telemetria, visando obter informações em tempo real do robô;
- Comparar os resultados obtidos com o de Petry (2016).

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos teóricos relacionados ao desenvolvimento deste trabalho.

### 2.1 ROBÓTICA

A palavra “Robô” foi criada pelo escritor tcheco Karel Capek, sendo utilizada em sua peça *Rossum’s Universal Robots* (RUR), a qual foi encenada em 1921, em Praga. Na linguagem eslava, *robota* significa atividade forçada ou escrava. Na peça de Capek, os robôs eram pessoas fabricadas artificialmente, ausentes de emoção (POLONSKII, 1996).

A *Robotic Industries Association* (RIA), entidade norte-americana responsável pela indústria de robótica, define um robô industrial como *um manipulador multipropósito reprogramável, controlado automaticamente, programado em três ou mais eixos, os quais podem ser fixos em um lugar ou móveis para aplicações em automação industrial* (ANSI/RIA.R15.06-1999, 2010). Diferentemente do que foi imaginado por Capek, são máquinas que realizam o trabalho.

Secchi (2012) classifica os robôs em três tipos:

- Industriais: São formados por estruturas mecânicas articuladas, as quais se movem pelas ordens de um sistema de controle, normalmente um microcontrolador;
- Médicos: Também conhecidos como de cooperação ou reabilitação, são os utilizados em cirurgias de alta complexidade e precisão, assim como as próteses inteligentes, que visam manter a aparência e funcionalidade do membro de pessoas com deficiência.;
- Móveis: São plataformas mecânicas, que se locomovem através de um certo ambiente e apresentam certa autonomia. São empregados principalmente em tarefas onde se tem risco à vida humana, como na manutenção de reatores nucleares ou exploração de minérios, mas também podem ser aplicados na agricultura e no transporte de cargas.



### 2.1.1 ROBÓTICA MÓVEL

Mesmo que os robôs industriais apresentem alta precisão e velocidade, estes possuem uma grande desvantagem, que é a falta de mobilidade. Algumas atividades não seriam realizadas sem a utilização destes dispositivos, como a *Mars Pathfinder*, missão exploratória da NASA para o reconhecimento da atmosfera de Marte. O veículo Sojourner, utilizado na missão, explorou o território marciano por 83 dias, tirando fotografias e realizando medições do ambiente (NASA, 2016). O veículo pode ser visto na Figura 1.



**Figura 1 – Veículo exploratório Sojourner**

**Fonte:** Disponível em <https://mars.jpl.nasa.gov/MPF/rover/sim2.jpg>.

A robótica móvel lida com o controle de veículos autônomos e semi-autônomos, tendo ênfase em problemas relacionados com o espaço em larga escala, que são regiões com espaços consideravelmente maiores que as observáveis pelo ponto de visão do robô. O espaço em larga escala é de extrema importância para um robô móvel, visto que afeta o seu movimento, compreensão e raciocínio nesta área, sendo estes três subproblemas essenciais para este campo (JENKIN, 2010).

### 2.1.2 ROBÔS SEGUIDORES DE LINHA

## 2.2 SISTEMA EMBARCADO

Sistemas embarcados são sistemas computacionais que integram *hardware* e *software*, com o objetivo de rodar uma aplicação específica (??).

## 2.3 REGRAS DA ROBOCORE PARA ROBÔS SEGUIDORES DE LINHA

Na Seção 2.3.1 e Seção 2.3.2 são apresentadas as regras relacionadas à especificação dos robôs e do percurso, respectivamente, para a categoria robô seguidor de linha Pro, em eventos realizados pela Robocore (2016c).

### 2.3.1 ESPECIFICAÇÃO DOS ROBÔS

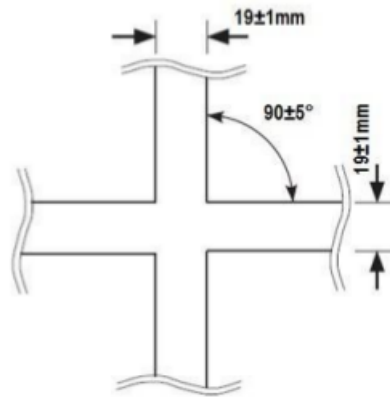
Para competir na categoria seguidor de linha, os robôs devem ser totalmente autônomos, não podendo ser controlados externamente por fio ou por rádio, com exceção para quando este for iniciado. Todos os componentes devem ser embarcados. A dimensão máxima permitida é de 250mm de comprimento, 250mm de largura e 200mm de altura. Não é permitido alterar as dimensões do robô durante a partida, assim como alterar o *hardware* ou *software* durante a tomada de tempo. Também não é permitida a utilização de mecanismo de sucção, que vise aumentar a força normal do robô em relação ao solo.

### 2.3.2 ESPECIFICAÇÕES DO PERCURSO

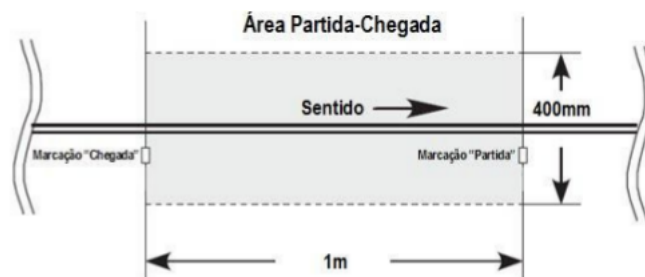
A pista é feita de uma ou mais placas de MDF revestidas com uma manta de borracha preta, assim, eventualmente serão necessárias emendas para compor a área do percurso. Os robôs, no entanto, devem ser capazes de superar os desníveis decorrentes das emendas, que são de aproximadamente 1mm. Uma linha branca, de  $19\pm 1$ mm, indica o percurso. Esta linha pode cruzar sobre ela mesma, tendo, neste caso, um ângulo de intersecção de  $90\pm 5^\circ$  (graus), com os 250mm antes e depois do cruzamento sendo retas (conforme pode ser visto na Figura 2). O circuito é totalmente plano, porém podem ocorrer inclinações de até  $5^\circ$ .

A área que se estende entre o ponto de partida e o ponto de chegada, considerando 200mm da linha e 200mm a esquerda da linha é denominada “área de partida-chegada”, conforme pode ser visto na Figura 3.

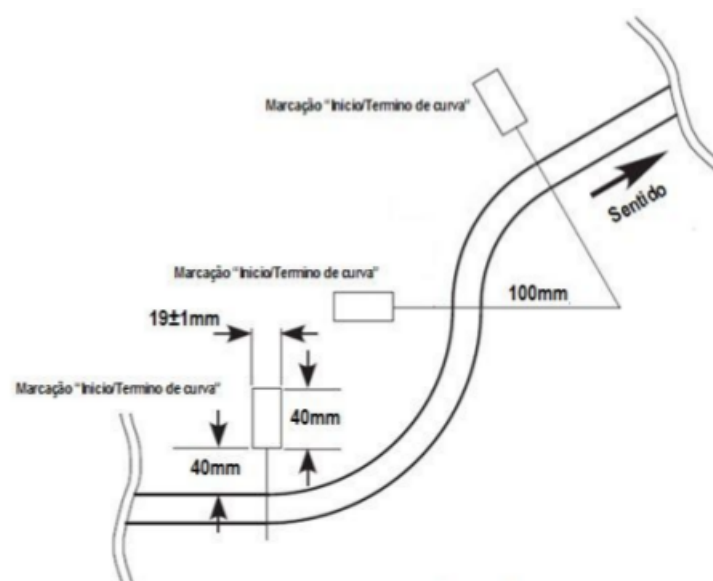
Quando houver um arco (intersecção entre a faixa branca), o raio deste é de pelo menos 100mm. Quando houver uma alteração na curvatura do percurso, deve haver uma marcação no lado esquerdo da linha, como pode ser visto na Figura 4.



**Figura 2 – Intersecções no percurso**  
 Fonte: Disponível em (ROBOCORE, 2016c, p.4).



**Figura 3 – Área de partida-chegada**  
 Fonte: Disponível em (ROBOCORE, 2016c, p.4).



**Figura 4 – Marcações de sinalização de curvatura**  
 Fonte: Disponível em (ROBOCORE, 2016c, p.4).

### 3 MATERIAIS

Neste capítulo serão apresentados os materiais a serem utilizados neste projeto.

#### 3.1 MICROCONTROLADOR

Será utilizado o *Kit* de desenvolvimento NUCLEO-F303K8, da ST Microelectronics, que possui as seguintes especificações básicas (STMICROELECTRONICS, 2016):

- Microprocessador de arquitetura *Advanced RISC Machine* (ARM) Cortex-M4 de 32 bits com FPU;
- 72 MHz de frequência máxima de operação;
- Instruções de *Digital Signal Processor* (DSP);
- 90 DMIPS de desempenho;
- 64KB de memória *Flash*;
- 16KB de SRAM;
- 2 módulos *Analog to Digital Converter* (ADC) com até 21 canais;
- 11 módulos de temporizadores (*timers*).

#### 3.2 MOTORES CC

Será utilizado o motor de corrente contínua (CC) *High-Power Carbon Brush* (HPCB) modelo 3041 da Pololu, (POLOLU, 2016b). Este motor possui alimentação de 12V, caixa de redução 10:1, 3000 RPM e eixo estendido, o qual permite o acoplamento do encoder magnético.

### 3.3 PONTE H

Será utilizada uma Ponte H para o controle de velocidade dos motores. O modelo que será utilizado é o TB6612FNG, da Toshiba, que é capaz de controlar até dois motores CC com corrente constante de 1,2A (TOSHIBA, 2016). A velocidade do motor é controlada por *Pulse Width Modulation* (PWM).

### 3.4 ENCODER MAGNÉTICO

Um *encoder* magnético é um transdutor de movimento, que converte movimentos em informações elétricas, sendo possível obter dados como posição e velocidade. Neste trabalho será utilizado o modelo 3081 da Pololu, o qual realiza 12 contagens por revolução do eixo e é compatível com o motor 3041 (POLOLU, 2016a).

### 3.5 SENSORES DE REFLETÂNCIA

O sensor de refletância é um dispositivo eletrônico que consiste de um *Light Emitter Diode* LED e um fototransistor, medindo assim a refletância de uma superfície. Este circuito será utilizado para detectar a linha do percurso. O modelo que será utilizado nesse trabalho é o QRE1113P, da Fairchild Semiconductor (SEMICONDUCTOR, 2016).

### 3.6 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

O *chassi* do robô, ou seja, a estrutura deste, será confeccionada em uma placa de circuito impresso (PCB) de fenolite.

### 3.7 MÓDULO BLUETOOTH

Será utilizado o módulo *bluetooth* HC-05 para a telemetria. Este módulo possuiu a configuração mestre-escravo e comunicação *Universal Asynchronous Receiver Transmitter* (UART).

### 3.8 RODAS

Serão utilizadas rodas de poliuretano ou silicone.

### 3.9 BATERIA LIPO

Será utilizada uma bateria do tipo Lítio-Polímero (Li-Po) de duas células, 7,4V, 1300mAh e 32,5A de corrente máxima de descarga, pois possui alta capacidade de corrente e densidade de carga.

### 3.10 CONVERTOR STEP-UP

O conversor *Step-up* que será utilizado é o XL6009, que é um módulo elevador de tensão. Este circuito possui eficiência de 94%, corrente e tensão de saída máxima de 3A e 35V, respectivamente (XLSEMI, 2016).

### 3.11 ESFERA DESLIZANTE

Será utilizada uma esfera deslizante para sustentar a parte frontal do robô e manter os sensores de refletância em sua correta posição de funcionamento.

#### 4 CRONOGRAMA PRELIMINAR

O Quadro 1 apresenta um cronograma preliminar do desenvolvimento do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Na sua elaboração foi considerada a continuação do desenvolvimento no semestre seguinte, junto à disciplina de TCC 2.

Atividades	Meses											
	08/16	09/16	10/16	11/16	12/16	01/17	02/17	03/17	04/17	05/17	06/17	07/17
Elaboração e entrega da proposta												
Revisão bibliográfica												
Condicionamento de sinais dos sensores												
Projeto do protótipo												
Projeto do controlador												
Desenvolvimento do sistema de telemetria												
Elaboração e apresentação do TCC 1												
Confecção do protótipo												
Implementação do controlador												
Integração do sistema												
Testes finais de desempenho												
Elaboração e apresentação do TCC 2												

**Quadro 1 – Cronograma das atividades previstas**

## REFERÊNCIAS

- ANSI/RIA.R15.06-1999. **Robot Terms and Definitions**. 2010. Disponível em: <<http://www.robotics.org/product-catalog-detail.cfm/productid/2953>>. Acesso em: 15 ago. 2016.
- CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. **Introduction to Discrete Event Systems**. 2. ed. New York: Springer US, 2008.
- GUADAGNIN, A. J. **Controle Híbrido de um Robô Seguidor de Linha**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- JENKIN, G. D. M. **Computational principles of mobile robotics**. 2. ed. Cambridge University Press, 2010. Disponível em: <<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=FCF0F4E452EC55632B18C18863BCB6FA>>.
- MAUÁ, I. **Instituto Mauá de Tecnologia sedia o evento de Robótica Winter Challenge 2016**. 2016. Disponível em: <<http://maua.br/imprensa/press-releases/instituto-maua-tecnologia-sedia-evento-robotica-winter-challenge-2016>>. Acesso em: 23 ago. 2016.
- NASA. **Mars Pathfinder/ Sojourner Rover**. 2016. Disponível em: <<http://www.jpl.nasa.gov/missions/mars-pathfinder-sojourner-rover>>. Acesso em: 24 set. 2016.
- PETRY, M. L. **Controle Híbrido de um robô autônomo seguidor de linha**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- POLOLU. **Pololu magnetic encoder datasheet**. 2016. Disponível em: <<https://www.pololu.com/product/3081>>. Acesso em: 01 set. 2016.
- POLOLU. **Pololu micromotor datasheet**. 2016. Disponível em: <<https://www.pololu.com/product/3048>>. Acesso em: 01 set. 2016.
- POLONSKII, M. **Introdução à robótica e mecatrônica**. 2. ed. Caxias do Sul: EDUCS, 1996.
- RECORDS, G. W. **Robotics tournament VEX Worlds is named largest in the world after 1,075 teams take part**. 2016. Disponível em: <<http://www.guinnessworldrecords.com/news/2016/4/robotics-tournament-vex-worlds-is-named-largest-in-the-world-after-1-075-teams-ta-426576>>. Acesso em: 29 ago. 2016.
- ROBOCORE. 2016. Disponível em: <<https://www.robocore.net/eventos>>. Acesso em: 22 ago. 2016.
- ROBOCORE. **Classificação WinterChallenge**. 2016. Disponível em: <[https://www.robocore.net/modules.php?name=GR\\_Eventos&evento=24&tab=2](https://www.robocore.net/modules.php?name=GR_Eventos&evento=24&tab=2)>. Acesso em: 23 ago. 2016.



ROBOCORE. **Regras Seguidor de Linha**. 2016. Disponível em: <[https://www.robocore.net/upload/attachments/robocore\\_regras\\_seguidor\\_de\\_linha\\_108.pdf](https://www.robocore.net/upload/attachments/robocore_regras_seguidor_de_linha_108.pdf)>. Acesso em: 28 ago. 2016.

ROBOCUP. 2016. Disponível em: <<http://www.robocup.org/about-robocup/objective>>. Acesso em: 22 ago. 2016.

ROBOGAMES. 2016. Disponível em: <<http://robogames.net/index.php>>. Acesso em: 29 ago. 2016.

SECCHI, H. A. **Uma introdução aos robôs móveis**. Serra: NERA-IFES, 2012. Traduzido do original *Una Introducción a los Robots Móviles*.

SEMICONDUCTOR, F. **Minature Reflective Object Sensor**. 2016. Disponível em: <<http://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/QRE1113.pdf>>. Acesso em: 01 set. 2016.

STMICROELECTRONICS. **STM32F303x6/x8 datasheet**. 2016. Disponível em: <<http://www.mouser.com/ds/2/389/DM00092070-524505.pdf>>. Acesso em: 01 set. 2016.

TOSHIBA. **Driver IC for Dual DC motor**. 2016. Disponível em: <<https://www.pololu.com/file/0J86/TB6612FNG.pdf>>. Acesso em: 01 set. 2016.

WORLDS, V. 2016. Disponível em: <<http://www.roboticseducation.org/competition-teams/vex-robotics-competition/>>. Acesso em: 29 ago. 2016.

XLSEMI. **400KHz 60V 4A Switching Current Boost / Buck-Boost / Inverting DC/DC Converter**. 2016. Disponível em: <<https://www.pollin.de/shop/downloads/D351434D.PDF>>. Acesso em: 01 set. 2016.