

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

ARTHUR GALLINA

**DESENVOLVIMENTO DE UM ROBÔ DE MINI SUMÔ AUTÔNOMO DESTINADO A COMPETIÇÕES DE ROBÓTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2019

ARTHUR GALLINA

**DESENVOLVIMENTO DE UM ROBÔ DE MINI SUMÔ AUTÔNOMO DESTINADO A COMPETIÇÕES DE ROBÓTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia de Computação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Computação

Orientador: Prof. Dr. César Rafael Claire Torrico

**PATO BRANCO**

**2019**



## TERMO DE APROVAÇÃO

Às 13 horas do dia 04 de dezembro de 2019, na sala V104, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus Pato Branco*, reuniu-se a banca examinadora composta pelos professores César Rafael Claire Torrico (orientador), Fábio Favarim e Marcelo Teixeira para avaliar o trabalho de conclusão de curso com o título **Desenvolvimento de um Robô de Mini Sumô Autônomo Destinado a Competições de Robótica**, do aluno **Arthur Gallina**, matrícula 1493310, do curso de Engenharia de Computação. Após a apresentação o aluno foi arguido pela banca examinadora. Em seguida foi realizada a deliberação pela banca examinadora que considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. César Rafael Claire Torrico  
Orientador (UTFPR)

---

Prof. Fábio Favarim  
(UTFPR)

---

Prof. Marcelo Teixeira  
(UTFPR)

---

Prof. Marco Antonio de Castro Barbosa  
Coordenador de TCC

---

Prof. Pablo Gauterio Cavalcanti  
Coordenador do Curso de  
Engenharia de Computação

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

## RESUMO

GALLINA, Arthur. DESENVOLVIMENTO DE UM ROBÔ DE MINI SUMÔ AUTÔNOMO DESTINADO A COMPETIÇÕES DE ROBÓTICA. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento Acadêmico de Informática, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

O crescimento tecnológico é contínuo e a automação de tarefas e processos cada vez mais comum. Nesse sentido, a robótica visa o desenvolvimento da automação de tarefas realizadas por pessoas, trazendo benefícios à sociedade por meio de um trabalho de maior precisão, rapidez e custos reduzidos. Contudo, um dos principais desafios da robótica é a obtenção da maior autonomia possível pela integração do robô com outros aspectos, como capacidade de percepção, capacidade de ação, robustez e tomada de decisão. Dessa maneira, um cenário em que esses robôs autônomos são vistos são as competições de robótica, as quais possuem diversas categorias, como a de mini sumô. Assim, visando obter uma lógica de controle ótima, este trabalho está inserido na robótica autônoma e tem como objetivo aplicar a Teoria de Controle Supervisório (TCS), proposta por Ramadge e Wonham, em 1989, para Sistemas a Eventos Discretos (SEDs) com vistas à obtenção de uma lógica de controle de um robô autônomo lutador de mini sumô. Para mais, o presente trabalho também visa estimular a pesquisa e promover a divulgação dos cursos da UTFPR nessas competições. Ao final do desenvolvimento do trabalho a lógica modelada e implementada funcionou corretamente tornando o robô apto a participar de competições.

**Palavras-chave:** Automação, Teoria de Controle Supervisório, Sistemas a Eventos Discretos, Autômatos

## ABSTRACT

GALLINA, Arthur. DEVELOPMENT OF AN AUTONOMOUS MINI SUMO ROBOT AIMED AT ROBOTIC COMPETITIONS. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento Acadêmico de Informática, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

Technological growth is continuous and the automation of tasks and processes are increasingly. In this sense, robotics aims to develop the automation of tasks performed by people, bringing benefits to society through more accurate work, faster and lower costs. However, one of the main challenges of robotics is to obtain the greatest possible autonomy by integrating the robot with other aspects such as perception capacity, action capacity, robustness and decision making. Thus, a scenario in which these autonomous robots are seen are the robotics competitions, which have several categories, such as mini sumo. Thus, aiming to obtain an optimal control logic, this work is inserted in autonomous robotics and aims to apply the Supervisory Control Theory (SCT), proposed by Ramadge and Wonham, in 1989, for Discrete Event Systems (DES) aiming to obtain a control logic from an autonomous mini sumo robot. Moreover, the present work also aims to stimulate research and promote the dissemination of UTFPR courses in these competitions. At the end of the development the modeled and implemented logic worked correctly, making the robot able to participate in competitions.

**Keywords:** Automation, Supervisory Control Theory, Discrete Event System, Automation

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Dojô das partidas .....	13
FIGURA 2	– Exemplo de um autômato representado graficamente. ....	15
FIGURA 3	– Modelagem de dois subsistemas G1 e G2. ....	16
FIGURA 4	– Composição síncrona G. ....	16
FIGURA 5	– Exemplo de autômato bloqueante. ....	17
FIGURA 6	– Exemplo de autômato não-bloqueante. ....	17
FIGURA 7	– Modelagem de uma especificação. ....	18
FIGURA 8	– Esquema de controle a malha fechada de um SED. ....	19
FIGURA 9	– Integração de hardware. ....	21
FIGURA 10	– Sensor JS40F. ....	21
FIGURA 11	– Sensor de Refletância QTR-1A. ....	22
FIGURA 12	– Micromotor com caixa de redução 50:1. ....	23
FIGURA 13	– Microcontrolador STM32F103C8T6. ....	23
FIGURA 14	– Esquema de rotação conforme sentido da corrente. ....	24
FIGURA 15	– Esquema básico de uma ponte H. ....	24
FIGURA 16	– Ponte H TB6612FNG. ....	25
FIGURA 17	– Step Up XL6009. ....	26
FIGURA 18	– Roda RW2i. ....	26
FIGURA 18	– Visão frontal do suporte dos sensores. ....	27
FIGURA 19	– Visão traseira do suporte dos sensores. ....	28
FIGURA 20	– Visão superior da base. ....	28
FIGURA 21	– Visão superior da base e do suporte para os sensores acoplados. .	29
FIGURA 22	– Visão do projeto da parte superior. ....	29
FIGURA 23	– Visão do projeto integrado. ....	30
FIGURA 24	– Esquemático dos sensores JS40F. ....	31
FIGURA 25	– Esquemático dos sensores JS40F. ....	31
FIGURA 26	– Esquemático da ponte H. ....	32
FIGURA 27	– Esquemático do circuito eletrônico. ....	32
FIGURA 28	– Circuito eletrônico. ....	33
FIGURA 29	– Arranjo e denominação dos sensores. ....	33
FIGURA 30	– Dinâmica de acionamento do robô. ....	35
FIGURA 31	– Planta do sensor P1. ....	36
FIGURA 32	– Planta do sensor P2. ....	36
FIGURA 33	– Planta do sensor P3. ....	37
FIGURA 34	– Planta do sensor P4. ....	37
FIGURA 35	– Planta do sensor P5. ....	38
FIGURA 36	– Planta do sensor S1. ....	38
FIGURA 37	– Planta do sensor S2. ....	39
FIGURA 38	– Especificação de afastamento da faixa do dojô. ....	40
FIGURA 39	– Especificação dos sensores laterais. ....	41
FIGURA 40	– Especificação de ataque. ....	42
FIGURA 41	– Protótipo final no Dojô. ....	44

FIGURA 42 – Ensaio no Dojô. ....	45
----------------------------------	----

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1	–	Especificações das categorias do robô de sumô. ....	12
TABELA 2	–	Denominação e descrição dos eventos controláveis modelados. .	34
TABELA 3	–	Denominação e descrição dos eventos não controláveis modelados. ....	34
TABELA 4	–	Características dos autômatos. ....	43



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAS .....	8
1.2 OBJETIVOS .....	10
1.2.1 Objetivo Geral .....	10
1.2.2 Objetivos Específicos .....	11
1.3 JUSTIFICATIVA .....	11
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>12</b>
2.1 COMPETIÇÕES DE ROBÓTICA MÓVEL .....	12
2.2 SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS .....	13
2.2.1 Modelagem de Sistemas a Eventos Discretos .....	14
2.2.1.1 Acessibilidade e Bloqueio .....	16
2.2.1.2 Especificações .....	17
2.3 TEORIA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO .....	18
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS</b> .....	<b>20</b>
3.1 MATERIAIS .....	21
3.1.1 Sensor de distância digital JS40F .....	21
3.1.2 Sensor de refletância QTR-1A .....	22
3.1.3 Micro motor HP 6v redução 50:1 .....	22
3.1.4 Microcontrolador STM32F103C8T6 .....	23
3.1.5 Ponte H TB6612FNG .....	24
3.1.6 Módulo step up XL6009 .....	25
3.1.7 Roda RW2I .....	26
<b>4 DESENVOLVIMENTO</b> .....	<b>27</b>
4.1 PROJETO DA ESTRUTURA .....	27
4.1.1 Suporte dos sensores .....	27
4.1.2 Base .....	28
4.1.3 Parte superior .....	29
4.2 PROJETO DO CIRCUITO ELETRÔNICO .....	30
4.3 PROJETO DE CONTROLE DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS .....	33
4.3.1 Modelagem das Plantas .....	35
4.3.2 Modelagem das especificações .....	40
4.4 PROTÓTIPO FINAL .....	43
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>46</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo, são apresentadas as considerações que mostram a importância da automação em nosso cotidiano, os aspectos conceituais que envolvem o projeto, o contexto que este trabalho está inserido e, por fim, os objetivos do trabalho.

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAS

O crescimento e evolução da tecnologia em escala global é contínuo e pode ser evidenciado por meio de dados que mostram que o setor tecnológico no Brasil voltou a crescer em 2017 e mantém o país entre os 10 maiores mercados do mundo, tendo alta de 4,5% e chegando ao valor de U\$ 38 bilhões (GOMES, 2018). Segundo a previsão da Computing Technology Industry Association (CompTIA), o mercado global de tecnologia irá crescer e atingir a marca de 5,2 trilhões de dólares em 2020 (COMPTIA, 2019).

Nessa perspectiva, a Confederação Nacional da Indústria (CNI) realizou a primeira pesquisa nacional sobre a adoção de tecnologias. Quando perguntados sobre os benefícios que as empresas esperam conseguir com a adoção de tecnologias digitais, os principais aspectos citados são a redução dos custos (54%) e aumento da produtividade (50%) (AFONSO, 2016). Desse modo, uma das áreas que mais obtém sucesso nesses quesitos é a da robótica, setor da tecnologia que visa desenvolver máquinas autônomas, capazes de tomar decisões por conta própria baseadas na sua capacidade de percepção e “inteligência” (como o robô transforma suas percepções em ações).

Ademais, é válido ressaltar que o desenvolvimento da robótica evoluiu dos autômatos, máquinas que se operam de maneira automática seguindo uma sequência predeterminada de operações, passando pelos robôs manipuladores de base fixa, pelos dispositivos móveis guiados a distância, aos robôs móveis semiautônomos (JUNG et al., 2005) e chegando recentemente aos totalmente autônomos (RUBIO et al., 2019). As aplicações da robótica móvel podem ser observadas em diversos setores da sociedade,

como doméstico (aspirador de pó autônomo), industriais (transportes automatizados) e transporte com carros autônomos, estudos apontam que a maioria das empresas automobilísticas lançarão carros com recursos semi e totalmente autônomos até 2020. Espera-se que a maioria dos carros sejam totalmente autônomos até 2035 (BIMBRAW, 2015), evidenciando o futuro próspero dessa área.

A implementação de robôs móveis autônomos deve levar os seguintes aspectos em conta (JUNG et al., 2005):

- Locomoção: como o robô irá se deslocar no ambiente;
- Percepção: como o ambiente será percebidos pelo robô;
- Controle: como o robô transforma suas percepções em ações;
- Comunicação: como o robô irá se comunicar com outros dispositivos ou até mesmo com um humano.

Apesar dos avanços obtidos até hoje, um dos desafios enfrentados na otimização é a obtenção da lógica ótima, a qual atua de forma que os recursos disponíveis sejam aproveitados ao máximo, trazendo melhores resultados possíveis. É possível tomar como exemplo as competições de robótica que a *Patobots*, equipe de robótica móvel da UTFPR Câmpus Pato Branco - fundada em 2015 por alunos dos cursos de engenharia de computação - participa nas categorias de *trekking*, seguidor de linha e sumô. Essa última categoria envolve um embate entre dois robôs móveis autônomos com o objetivo de empurrar o oponente para fora da arena comum aos dois, cenário em que é possível observar que robôs competidores que não possuem uma lógica ótima são prejudicados perante outros competidores.

Nesse paradigma de competições de sumô, os robôs participantes são compostos por uma estrutura física que precisa atender os requisitos de tamanho, categoria, assim como ser capaz de comportar todos os seus componentes: Ponte H e motores que são fisicamente responsáveis pela locomoção, microcontrolador que realiza as ações de controle e sensores que são encarregados de perceberem o ambiente externo. Nessa categoria é muito comum o uso de sensores digitais que, ao detectar um oponente, emitem um sinal de subida e um sinal de descida ao perder a detecção, de forma que essas ocorrências podem ser vistas como eventos que ocorrem de maneira abrupta com intervalos de tempo desconhecidos.

Portanto, é possível que esses cenários operacionais sejam vistos como um Sistema a Eventos Discretos (SED) e uma das formas de obter a lógica ótima é por meio da Teoria de Controle Supervisório (TCS) (RAMADGE; WONHAM, 1989), que pode ser descrita como um mecanismo formal que permite sintetizar controladores ótimos a partir de modelos. A TCS permite que o comportamento de um SED e suas especificações de controle sejam individualmente descritos por meio de um conjunto de autômatos e uma lógica de controle capaz de supervisionar o sistema e interferir no seu comportamento de forma minimamente restritiva e não-bloqueante, seja obtida.

Em competições de alto nível é de suma importância que os recursos sejam aproveitados ao máximo para se obter vantagem competitiva perante os demais participantes. Tendo em vista esse fato, é crível a utilização da TCS para SEDs para a obtenção de uma lógica ótima para o controle do robô. No trabalho (ZIELINSKI, 2018), a TCS a SEDs foram utilizadas para o desenvolvimento de um robô na categoria Sumô 3kg. Entretanto, é necessário considerar as diferenças entre requisitos de projeto tanto quanto as limitações de tamanho e peso. O peso máximo na categoria mini é de 500g e as dimensões máximas são 10cm de largura por 10cm de largura, acarretando, assim, menor espaço para distribuição componentes e também a diferente disposição dos sensores.

Esse trabalho visa estender o modelo proposto por Zielinski (2018), utilizando a mesma metodologia, porém alterando a lógica com uma disposição diferente dos sensores. Dessa maneira, nesse trabalho foram utilizados 3 sensores frontais cobrindo toda a frente do robô e também 2 sensores laterais, sendo um de cada lado. Também, entre as alterações propostas, está a estrutura para que seja possível atender as limitações e requisitos de um robô mini sumô, de forma que se torne apto a participar de competições de robótica.

## 1.2 OBJETIVOS

A seguir estão o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

### 1.2.1 OBJETIVO GERAL

Projetar um robô mini sumo autônomo apto a participar em competições de robótica.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar capacidades e deficiências de métodos já implementados;
- Estabelecer um arranjo dos sensores de maneira diferente do já proposto por (ZIELINSKI, 2018);
- Projetar a estrutura física do robô com suporte para os sensores e demais componentes, de forma a atender as limitações de tamanho e peso;
- Modelar as plantas e especificações do robô para controlar o comportamento dinâmico utilizando autômatos;
- Fazer uso da TCS, sintetizar um controlador minimamente restritivo e com lógica ótima;
- Implementar e integrar software e hardware;
- Testar e validar a integração do robô em ensaios no Dojô.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Projetos de integração entre software e hardware são cada vez mais comuns no dia a dia. O desenvolvimento desse projeto integra hardware e software e requer conhecimentos de diversas áreas estudadas durante o curso como eletrônica, programação, sistemas micro-controlados e embarcados, também possibilitando aprofundar os conhecimentos nessas áreas. Além disso, é um projeto com possibilidade de ser refletido em muitas áreas da indústria, bem como a aplicação dos conhecimentos utilizados durante o seu desenvolvimento.

No caso deste trabalho, a aplicação do robô autônomo tem como propósito a participação em competições de robótica, as quais estão ganhando cada vez mais popularidade, unindo universidades, estudantes e empresas patrocinadoras. O presente trabalho tem como objetivo participar de competições pela a equipe *PatoBots* na categoria de mini sumô, assim como visa representar a UTFPR e os seus cursos nesses eventos regionais, como a feira Inventum e também nacionais como a Robocore. Por fim, o robô ficará para a equipe *PatoBots* para trabalhos futuros, no qual podem ser feitas melhorias, usado como base para novos projetos ou simplesmente como inspiração.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 COMPETIÇÕES DE ROBÓTICA MÓVEL

Eventos de robótica reúnem equipes e entusiastas da área em um ambiente composto por uma série de competições, visando promover o estudo e difundir o conhecimento científico e tecnológico, bem como habilidade em trabalhar em equipe. Dentre os eventos existentes é destacada a competição Winter Challenge, organizada pela RoboCore e considerada a maior competição de robótica da América Latina, que possui as categorias de Robôs seguidores de linha, robôs de combate, hockey, trekking, desafios de inteligência e o abordado neste trabalho, os robôs de sumô. Na última edição, o evento teve mais de 450 robôs participantes (ROBOCORE, 2019). A categoria de sumô é dividida em 7 sub categorias que devem atender a especificações como peso, altura e largura, detalhadas na Tabela 1.

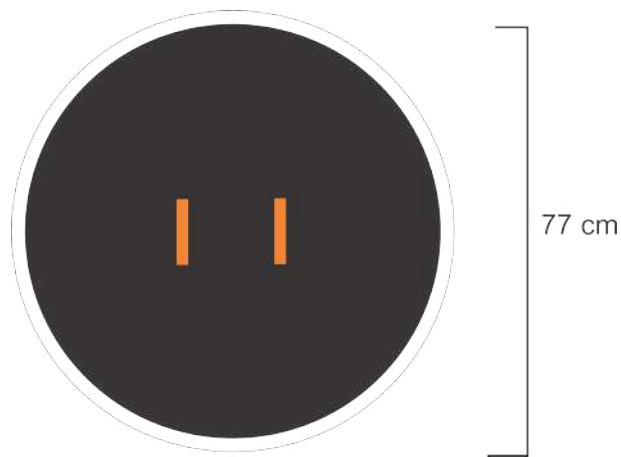
**Tabela 1:** Especificações das categorias do robô de sumô.

Classe	Altura	Largura	Comprimento	Peso
3 kg Sumô	Ilimitada	20 cm	20 cm	3000 g
Mini Sumô	Ilimitada	10 cm	10 cm	500 g
Micro Sumô	5 cm	5 cm	5 cm	100 g
Nano Sumô	2,5cm	2,5 cm	2,5 cm	25 g
Lego Sumô	Ilimitada	15,2 cm	15,2 cm	1000 g
Lego Junior	Ilimitada	15,2	15,2 cm	1000 g
Humanóide	50 cm	20 cm	20 cm	3000 g

Nessas sub-categorias, ainda, existem duas opções: autônomo e radio controlado, sendo o foco o robô autônomo de 500g. Para o robô autônomo o método de controle deve estar completamente contido no robô e que não pode interagir com um sistema de controle externo (humano ou máquina) enquanto os radio controlados são

operados por uma pessoa. O objetivo dessa categoria é empurrar o adversário para fora da área de combate, mais conhecida por Dojô, o qual tem formato circular e, nessa categoria, tem o diâmetro de 77cm e é feito de placa de MDF (ROBOCORE, 2018).

Na Figura 1, é possível visualizar as linhas de início, duas linhas marrons (ou equivalentes para absorção de luz infravermelha) com espessura de 1cm na categoria Mini centradas no Dojô. A linha de borda é uma faixa circular com espessura de 2,5cm, sendo que a área do Dojô se estende até a borda externa dessa faixa circular. A partida é disputada por duas equipes, cada uma composta por um ou mais integrantes e consiste em até 3 rodadas de até 1 minuto cada. Dessa forma, é necessário vencer 2 rodadas para ser considerado o vencedor do confronto.



**Figura 1:** Dojô das partidas

No início da luta, os robôs são colocados na linha de início em direções aleatórias e ela é iniciada a partir do comando do juiz. A partir daí, os robôs autônomos deverão entrar em operação automaticamente em não menos do que cinco segundos. As pontuações acontecem quando um robô tocar o lado de fora do dojô por conta própria ou quando forçado legalmente pelo adversário (ROBOCORE, 2018).

## 2.2 SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS

Um sistema pode ser definido como uma parte limitada do universo que interage com o mundo externo através das fronteiras que o delimitam (CURY, 2001). A modelagem computacional de um sistema qualquer é estruturada sobre dois fundamentos (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2009):

- (1) o conceito de estado, que identifica o estado do sistema em determinada

circunstância; e

(2) um mecanismo de transição de estados, caracterizando a evolução do sistema.

Nesse contexto, são destacados os Sistemas a Eventos Discretos (SEDs). Os conceitos essenciais são apresentados nesse capítulo, sendo a classe de sistema utilizada nesse trabalho. Um SED é um sistema dinâmico que evolui de acordo com a ocorrência abrupta, em intervalos de tempo irregulares e possivelmente desconhecidos, de estímulos, denominados eventos (CURY, 2001).

Corroborando esses pressupostos, um SED satisfaz duas propriedades (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2009):

- (1) O espaço de estados é um conjunto discreto;
- (2) O mecanismo de transição de estados é orientado a eventos.

Logo, a evolução dos estados depende inteiramente da ocorrência de eventos discretos assíncronos. São exemplos de eventos o início e fim da produção de uma determinada peça em uma fábrica ou a percepção de um sensor de presença que muda de estado ao detectar a presença de algo. Portanto, esses eventos não dependem do tempo e, em geral, não é possível prever quando irão ocorrer.

## 2.2.1 MODELAGEM DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS

A modelagem de um SED pode ser vista como o meio de especificar o seu comportamento, de modo a determinar uma sucessão ordenada de eventos que atinja o objetivo do sistema. Uma das formas de modelar um sistema pode ser pela utilização de Autômatos Finitos, que, consoante (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2009), é uma estrutura formal de diagramação que permite representar problemas de diversas naturezas, tamanhos e complexidades, por meio de um método prático e intuitivo.

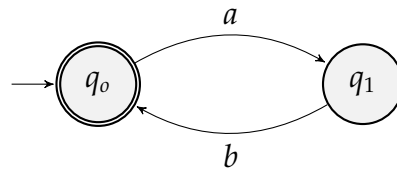
Autômatos finitos podem ser representados de maneira formal como uma quintupla  $(\Sigma, Q, q^\circ, Q^w, \delta)$ , em que:

- $\Sigma$  é o alfabeto finito de eventos;
- $Q$  é o conjunto finito de estados;
- $q^\circ \in Q$  é o estado inicial;
- $Q^w \subseteq Q$  é o subconjunto de estados marcados;



- $\delta : Q \times \Sigma \rightarrow Q$  é a relação de transição de estados.

Ainda, de maneira a facilitar a visualização e manipulação, mas ainda preservando o caráter formal, um autômato pode ser representado graficamente por um grafo dirigido, em que os nós representam os estados, e os arcos direcionados conectando estados representam as transições entre estados, conforme a Figura 2.



**Figura 2:** Exemplo de um autômato representado graficamente.

O estado inicial é evidenciado por uma seta apontada para ele, enquanto os estados marcados são representados com círculos duplos e são um estado aceitável de parada. São os eventos que irão indicar as transições entre diferentes estados do sistema, sendo a cadeia de eventos a representação de uma sequência finita de eventos.

Em um SED, primeiramente, é necessário a modelagem dos componentes do sistema, também chamado de planta, que pode ser considerado como o modelo de todo comportamento possível do sistema, sem considerar a ação de controle. Esses componentes são organizados separadamente dentro de um arranjo lógico e, posteriormente, a junção dos componentes determina o comportamento global do sistema.

A obtenção de um modelo para a planta de um SED se dá por meio da associação dos autômatos de cada componente, normalmente feito pela operação de composição síncrona, que visa analisar o funcionamento global das plantas funcionando simultaneamente mantendo um modelo composto equivalente. Exemplificando, tem-se dois autômatos  $G_1 = (\Sigma_1, Q_1, q_1^o, Q_1^w, \delta_1)$  e  $G_2 = (\Sigma_2, Q_2, q_2^o, Q_2^w, \delta_2)$ , a composição síncrona desses autômatos  $G_1 \parallel G_2$  é dada por:

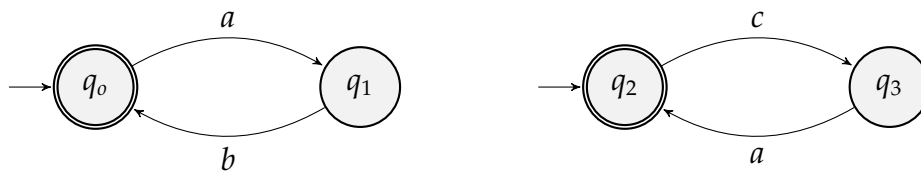
$$G_1 \parallel G_2 = (\Sigma_1 \cup \Sigma_2, Q_1 \times Q_2, (q_1^o, q_2^o), Q_1^w \times Q_2^w, \delta_1 \parallel \delta_2),$$

em que,  $\Sigma_1 \cup \Sigma_2$  é a união dos alfabetos,  $Q_1 \times Q_2$  o conjunto composto de estados de ambos os autômatos,  $(q_1^o, q_2^o)$  é o estado inicial do autômato composto,  $Q_1^w \times Q_2^w$  são os conjuntos marcados e  $\delta_1 \parallel \delta_2$  representa a função de transição de estados da composição.

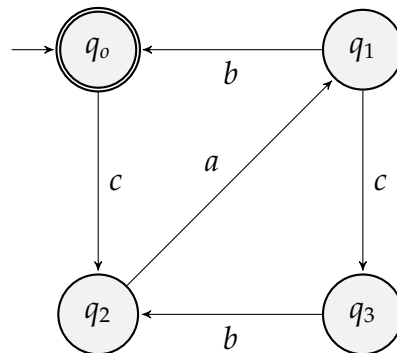
A função de transição de estados após a composição síncrona, na qual  $(q_1, q_2)$  é o estado antecedente a transição,  $(q'_1, q'_2)$  o estado posterior e  $\sigma$  o rótulo da transição, é dada por:

- $(q_1, q_2) \xrightarrow{\sigma} (q'_1, q'_2)$ , se  $\sigma \in \Sigma_1 \cap \Sigma_2$ ;
- $(q_1, q_2) \xrightarrow{\sigma} (q'_1, q_2)$ , se  $\sigma \in \Sigma_1 \setminus \Sigma_2$ ;
- $(q_1, q_2) \xrightarrow{\sigma} (q_1, q'_2)$ , se  $\sigma \in \Sigma_2 \setminus \Sigma_1$ .

Conforme (RAMADGE; WONHAM, 1989), uma composição síncrona leva em consideração os eventos compartilhados. Um evento comum a G1 e G2 será fundido na composição quando puder ser executado de forma síncrona nos dois autômatos. Os outros eventos ocorrem de forma assíncrona, em qualquer ordem. A Figura 3 ilustra os subsistemas modelados por G1 e G2, e a Figura 4 sua composição síncrona  $G = G1||G2$ .



**Figura 3:** Modelagem de dois subsistemas G1 e G2.



**Figura 4:** Composição síncrona G.

Após a composição síncrona, algumas propriedades do autômato são avaliadas.

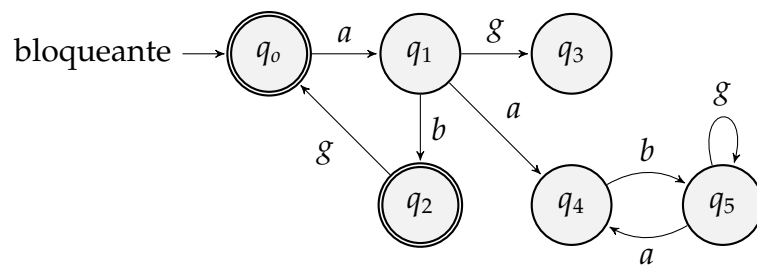
#### 2.2.1.1 ACESSIBILIDADE E BLOQUEIO

Dado um autômato  $G = (\Sigma_G, Q_G, q_G^o, Q_G^w, \delta_G)$ , há três tipos de acessibilidades em G:

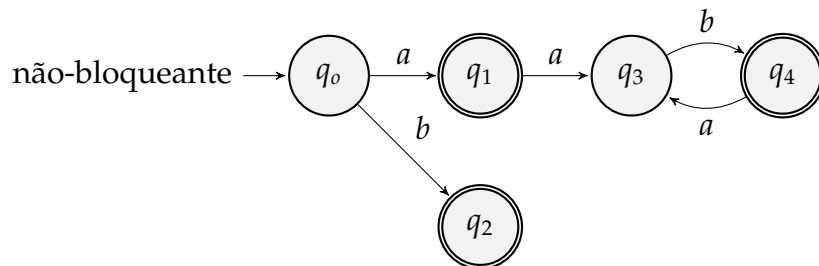
- **Acessível:** Todos os estados de  $Q_G$  podem ser alcançados a partir de  $q_G^o$ ;

- Não acessível: Há estados de  $Q_G$  inacessíveis a partir de  $q_G^o$ ;
- Co-acessível (Não bloqueante): É possível chegar a um estado final (marcado de  $Q_G^w$ ) a partir de qualquer estado.

Por conseguinte, a propriedade de bloqueio está relacionada à propriedade de acessibilidade. Um autômato  $G$  é dito ser não-bloqueante se é co-acessível (CURY, 2001). As Figuras 5 e 6 mostram dois autômatos que geram comportamentos bloqueante e não-bloqueante.



**Figura 5:** Exemplo de autômato bloqueante.



**Figura 6:** Exemplo de autômato não-bloqueante.

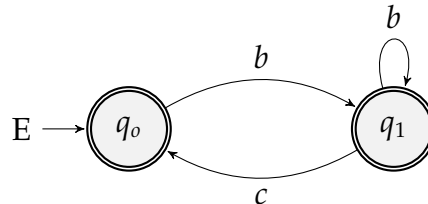
Em  $G_{\text{bloqueante}}$  é impossível chegar a um estado final (marcado de  $Q_G^w$ ) a partir dos estados  $q_3, q_4$  e  $q_5$ . Logo, esse autômato não é co-acessível e, portanto, é bloqueante. Já em  $G_{\text{não-bloqueante}}$ , é possível chegar a um estado final  $q_1, q_2$  e  $q_4$  a partir de qualquer estado, sendo esse um autômato co-acessível e, conseqüentemente, não-bloqueante.

### 2.2.1.2 ESPECIFICAÇÕES

As especificações são ações proibitivas para o sistema. Diante disso, essa modelagem pode ser vista como a implementação das restrições que o sistema deverá cumprir quando estiver em funcionamento. Para mais, é necessário definir o que será restrinvido na planta e a implementação da semântica de cada uma das restrições em forma de especificações de controle, para adequar o comportamento da planta aos requisitos de

controle. Assim, os outros componentes do sistema e as especificações também podem ser representadas de forma individual, por intermédio de um autômato, expressando os requisitos de controle na forma de desabilitação de eventos em determinados estados.

A Figura 7 exemplifica um modelo de especificação para a planta G da Figura 4.



**Figura 7:** Modelagem de uma especificação.

A especificação E tem por objetivo controlar a planta G, proibindo o evento  $c$  no estado inicial e evitando, dessa maneira, a transição no subsistema  $G_2$  sem que antes  $G_1$  tenha realizado a transição do evento  $b$ .

### 2.3 TEORIA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO

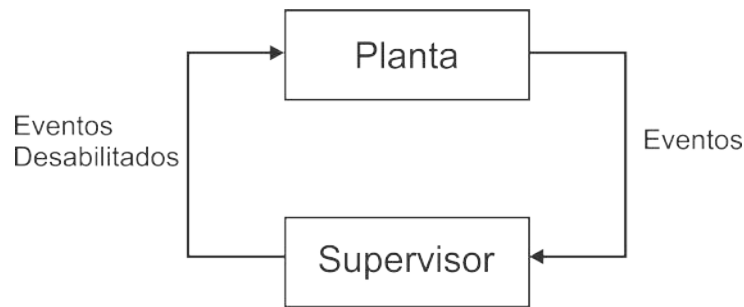
A abordagem proposta por (RAMADGE; WONHAM, 1989) para o controle supervisório de SEDs é estruturada, fundamentalmente, na Teoria dos Autômatos e Linguagens. Ela assume que o comportamento de um SED e suas especificações de controle sejam individualmente descritas por meio de um conjunto de autômatos, o que faz a diferenciação entre o sistema que irá ser controlado, chamado de planta, e do agente de controle, chamado supervisor.

O objetivo é projetar uma estrutura de supervisão cuja função é habilitar ou desabilitar eventos controláveis, conforme a sequência de eventos observados na planta, de forma que o sistema em malha fechada obedeça a algumas regras operacionais especificadas (QUEIROZ; CURY, 2002). Para que se calcule o referido supervisor, a estrutura de eventos da planta precisa ser particionada em  $\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_u$ , sendo  $\Sigma_c$  os eventos controláveis, aqueles que podem ser proibidos a qualquer momento e evitados pelo agente de controle. Já  $\Sigma_u$  representa os eventos não controláveis, em que não é possível evitar a sua ocorrência, como por exemplo a detecção de um objeto móvel por um sensor.

Na TCS, o cálculo do supervisor leva em conta esses aspectos por meio do conceito de *controlabilidade*, que lida justamente com a impossibilidade de atuar em

alguns eventos por eles não serem diretamente controláveis. A controlabilidade pode ser definida tanto para autômatos, quanto para linguagens. Dado dois autômatos  $G = (\Sigma_G, Q_G, q_G^o, Q_G^w, \delta_G)$  e  $E = (\Sigma_E, Q_E, q_E^o, Q_E^w, \delta_E)$ ,  $E$  é dito ser controlável em relação a  $G$  se, para todos  $s \in \Sigma^*$  e todo  $\mu \in \Sigma_w$ , se  $E \xrightarrow{s} q_E$  e  $G \xrightarrow{s} q_G \xrightarrow{\mu} q'_G$ , então existe um estado  $q'_E \in Q_E$  tal que  $E \xrightarrow{s} q_E \xrightarrow{\mu} q'_E$  (RAMADGE; WONHAM, 1989).

O resultado da aplicação dessa definição sobre  $G$  e  $E$  leva a uma estrutura que modela um supervisor controlável  $S$ . Esse supervisor  $S$  é dito ter uma lógica ótima se ela é minimamente restritiva, não bloqueante e satisfaz às especificações de controle. O processo de cálculo do supervisor é chamado de *síntese*. Ao ser implementado, o supervisor interage com a planta numa estrutura em malha fechada, como indicado na Figura 8 (RAMADGE; WONHAM, 1989).



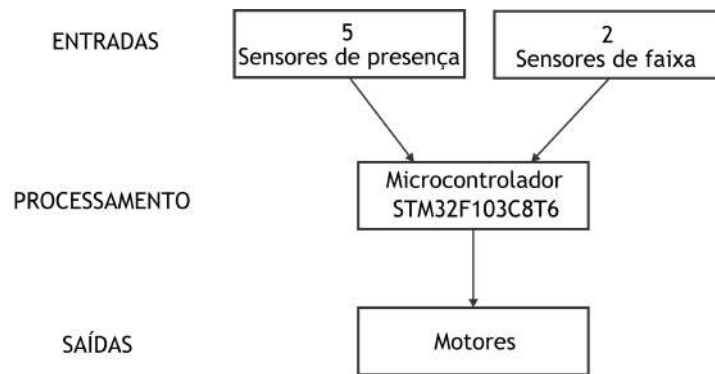
**Figura 8:** Esquema de controle a malha fechada de um SED.

Um supervisor controlável pode ser representado por um autômato, cujas mudanças de estado são ditadas pela ocorrência de eventos na planta  $G$ . Então, o supervisor é um agente de controle cuja função é desabilitar em  $G$  os eventos que não possam ocorrer em  $S$  após uma cadeia de eventos observada, garantindo o funcionamento adequado do sistema segundo as especificações modeladas (QUEIROZ; CURY, 2002). Na prática, o supervisor ótimo representa o comportamento menos restritivo e de máxima permissividade possível de ser implementado sobre a planta, cumprindo as especificações e não bloqueando. Entre os benefícios de dispor de um supervisor ótimo está a garantia do comportamento não-bloqueante. Isso o torna conveniente para ser usado em cenários em que a máxima eficiência é um aspecto importante, como é o caso das competições, descritas anteriormente.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

Nesse trabalho, foi desenvolvido um robô de mini sumô 500g apto a participar em competições. O desenvolvimento de um robô autônomo requer o conhecimento e integração de várias áreas de conhecimento e para isso foi seguida a seguinte metodologia:

- Inicialmente, foi projetado a estrutura física (chassi) dentro das limitações de tamanho e peso, com um suporte para os sensores customizado, impresso em 3D, atendendo o arranjo dos sensores de presença. Sendo 3 sensores na parte frontal e 2 nas laterais, também os 2 sensores de refletância na parte de baixo e espaço para acomodar os demais componentes.
- A lógica de funcionamento foi modelada por SEDs, por intermédio de autômatos e a TCS, utilizando o software *Supremica*. A lógica de funcionamento deve ser passada para a linguagem de programação do microcontrolador, a partir do software *Deslab*.
- Para a integração de todo o sistema, um microcontrolador foi utilizado como uma central de processamento de sinais, responsável por realizar a ação de controle proposta seguindo a modelagem e as especificações, as quais recebem sinais do meio externo através dos sensores de presença e de faixa e emite os sinais acionando os motores para realização da devida resposta à entrada. A integração pode ser vista de maneira ilustrativa na Figura 9.
- Por fim, foram realizados os testes no dojô com o robô sozinho e com uma caixa de madeira para simular o oponente, validando a modelagem implementada.



**Figura 9:** Integração de hardware.

### 3.1 MATERIAIS

#### 3.1.1 SENSOR DE DISTÂNCIA DIGITAL JS40F

Como principal forma de detecção de um oponente, foram utilizados sensores de distância digital. Assim, sensores infravermelhos funcionam emitindo uma onda infravermelha que, ao encontrar um objeto, é refletida voltando para o sensor que eleva sua saída para nível lógico 1. Fabricado pela marca JSumo, é feito especialmente para a categoria de mini sumô e outros pequenos robôs. Pode detectar objetos a partir de 40cm até aproximadamente 80cm, tem como dimensões 17,7mm de comprimento x 11,5mm de largura x 12,6mm de altura, funcionando de 3,3V a 5V consumindo 15mA de corrente. Um total de 5 sensores foram utilizados no arranjo proposto nesse trabalho, sendo 3 dispostos na parte da frente e 2 nas laterais.



**Figura 10:** Sensor JS40F.

### 3.1.2 SENSOR DE REFLETÂNCIA QTR-1A

Foram utilizados dois desses sensores acoplados na base e na parte da frente como sensores de linha, que visam identificar a borda do dojô que é branca e evita que o robô saia do dojô sozinho. O sensor é composto apenas por um conjunto de LED infravermelho e fototransistor, sendo que a refletância medida é a saída dada em tensão analógica. Quanto mais luz for detectada pelo receptor IR, menor é a tensão na saída analógica. Superfícies pretas refletem muito menos do que as superfícies brancas (CASTRO et al., 2003), resultando em uma tensão de saída maior.



**Figura 11:** Sensor de Refletância QTR-1A.

### 3.1.3 MICRO MOTOR HP 6V REDUÇÃO 50:1

Os motores são os responsáveis pela movimentação do robô. Nesse viés, devido ao propósito competitivo do robô, o motor escolhido foi de alta potência com caixa de redução, cujo propósito é diminuir a velocidade de rotação a partir de um sistema de engrenagens aumentando o torque. Quanto a isso, motores elétricos transformam energia elétrica em energia mecânica e essa energia mecânica é desenvolvida através da rotação de um eixo que gira gerando velocidade e torque (PAZOS, 2002). Um motor CC é um motor alimentado por corrente contínua (CC) e é composto por um eixo acoplado ao rotor que é a parte girante do motor. Além disso, sua velocidade pode ser controlada apenas variando a tensão aplicada. Nesse âmbito, foi escolhido um motor CC escovado de 6 V e caixa de redução de 50:1, tendo torque máximo de 0,86 kg·cm e chegando a 590 rotações por minutos sem carga.





**Figura 12:** Micromotor com caixa de redução 50:1.

### 3.1.4 MICROCONTROLADOR STM32F103C8T6

Pela necessidade de um microcontrolador com alto poder de processamento para atuar como a central de processamento de sinais e realizar a ação de controle, assim como pela quantidade de portas de entrada e saída de sinal necessárias, o microcontrolador escolhido foi o STM32F103C8T6, fabricado pela empresa STMicroelectronics que tem como principais características:

- Processador ARM Cortex TM-M3 de 32 bits;
- Memória Flash de 32 Kbytes;
- Memória RAM de 10 Kbytes;
- Clock de até 16MHz.

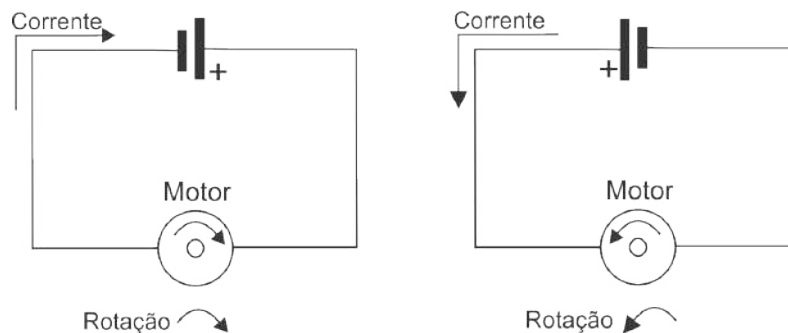
Além das características citadas que suprem a necessidade desse projeto, a escolha também foi influenciada pelo bom suporte que é oferecido pela fabricante e pela comunidade de usuários.



**Figura 13:** Microcontrolador STM32F103C8T6.

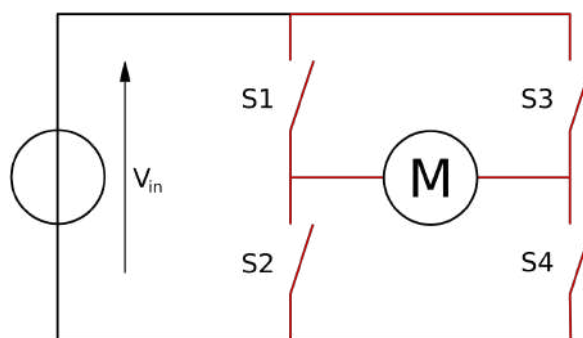
### 3.1.5 PONTE H TB6612FNG

Pode-se definir uma Ponte H como um circuito eletrônico de potência que permite o controle de velocidade e direção, que serve para inverter a polaridade de uma carga sem a necessidade de utilizar uma fonte simétrica (SIEBEN, 2003). O sentido de rotação de um motor de corrente contínua depende do sentido de circulação da corrente nele. Isso significa que, invertendo a polaridade da alimentação de um motor, invertemos, também, o seu sentido de rotação, conforme mostra a figura 14.



**Figura 14:** Esquema de rotação conforme sentido da corrente.

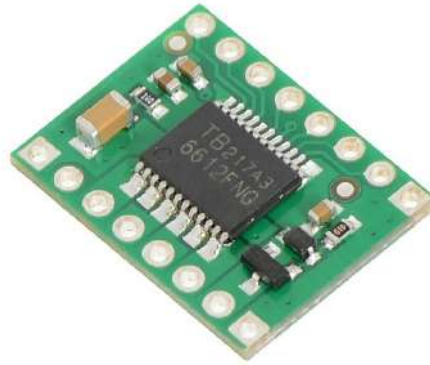
O esquemático simplificado de uma ponte H pode ser visto na Figura 15. O circuito é composto por 4 chaves S1, S2, S3 e S4, no qual geralmente transistores são utilizados como chave. Ao controlar essas chaves, é possível variar a corrente que passa pelas cargas, determinando a direção e a velocidade do acionamento.



**Figura 15:** Esquema básico de uma ponte H.

Uma ponte H deve garantir que enquanto as chaves S1 e S4 estiverem abertas, S2 e S3 estejam fechadas ou de maneira contrária, fazendo com que o motor rode em sentido horário ou anti-horário. Nesse sentido, responsável pelo sentido de giro dos motores, a ponte H é essencial na movimentação do robô de maneira correta. Essa,

tem como entrada o sinal gerado pelo microcontrolador e saída para o motor, o qual controla o seu sentido. Desse modo, a ponte H escolhida é capaz de acionar 2 motores simultaneamente com corrente de pico de 3A e 2A contínuas em cada canal, atendendo as especificações do micromotor.



**Figura 16:** Ponte H TB6612FNG.

### 3.1.6 MÓDULO STEP UP XL6009

Nesse projeto, foi utilizado um módulo conversor CC step up XL6009, que pode ser visto na Figura 17, para aumentar a tensão nos motores para níveis mais altos do que normal implementando o efeito de turbo no robô. Um conversor boost é um conversor CC/CC que aumenta a tensão de sua entrada para sua saída, enquanto diminui a corrente. Um dos métodos de conversão de tensão é a conversão chaveada em que os circuitos trabalham com a comutação de tensão em conjunto de um indutor e capacitor para fazer a regulação da tensão de saída (MALVINO, 2007). Esse método é utilizado pelo módulo XL6009 e tem como uma das vantagens a baixa perda de potência, em média 12% da potência de entrada.

Além do motivo citado, a escolha também é justificada pelas características do produto que tem como faixa de tensão de entrada de 3V a 32V e faixa de tensão de saída de 5V a 35V, atendendo os requisitos desse projeto que irá fornecer, em média, 6V aos motores e 9V no modo turbo fazendo-o operar sobre o valor recomendado para a vida útil do motor.



**Figura 17:** Step Up XL6009.

### 3.1.7 RODA RW2I

Rodas são essenciais para movimentação do robô. Acopladas nos motores, fazem o contato com o Dojô e geram a movimentação, devido os robôs estarem constantemente se empurrando em uma partida de mini sumô. Nesse meio, a característica levada em conta para a escolha da roda nesse projeto foi o material de composição para que essa tenha tração máxima. A roda utilizada foi a RW2i da marca Pololu, a qual consiste em um núcleo arredondado de alumínio com um parafuso interno escondido debaixo do pneu, economizando espaço, que é essencial em competições com restrições de tamanho. O núcleo é envolvido por uma camada de borracha de silicone de alta tração, com diâmetro total de 2,8cm e peso de 12,2g. Sua escolha é justificada pela boa tração, tamanho e peso reduzido e encaixe específico para os micromotores.



**Figura 18:** Roda RW2i.

## 4 DESENVOLVIMENTO

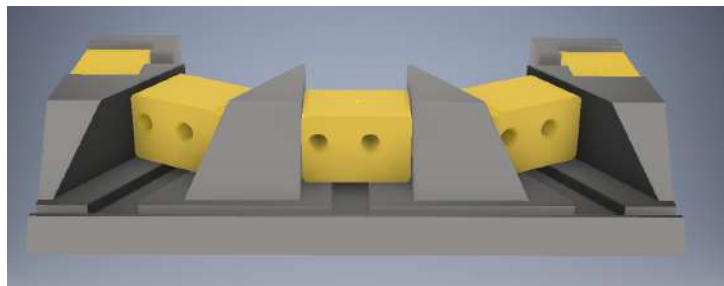
A fase de desenvolvimento foi iniciada após o estudo do referencial teórico, etapa que foram decididas quais seriam as características e materiais utilizados para o desenvolvimento do robô de acordo com a proposta desse trabalho.

### 4.1 PROJETO DA ESTRUTURA

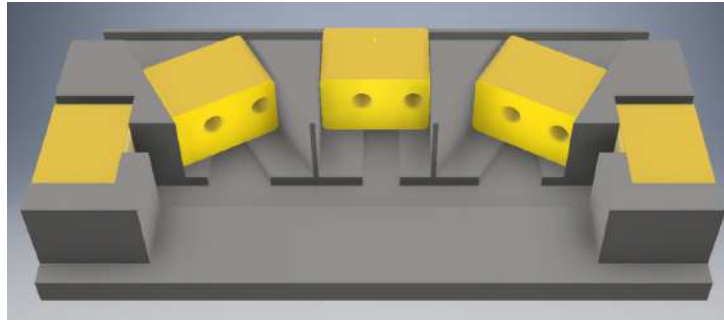
O projeto da estrutura foi modularizado por partes que posteriormente foram integradas para compor o robô. Desse modo, as partes projetadas foram o suporte para os sensores, a base do suporte dos sensores, rodas, motores e circuito eletrônico foram acoplados e a tampa para proteger a parte interna do robô.

#### 4.1.1 SUPORTE DOS SENSORES

Para que o projeto cumprisse o requisito da disposição dos sensores e do tamanho máximo limitante de forma precisa, foi desenvolvido um suporte customizado para os sensores e, posteriormente, impresso em 3D de alta precisão. O suporte possui 9,8cm de largura por 4,5cm de comprimento, com 5 espaços para os sensores de 1,77cm de comprimento por 1,15cm de largura cada um. Ademais, 3 desses espaços estavam dispostos na parte frontal e 2 laterais. Nesse viés, o projeto do suporte pode ser visto com mais detalhes na Figura 18 e Figura 19.



**Figura 18:** Visão frontal do suporte dos sensores.



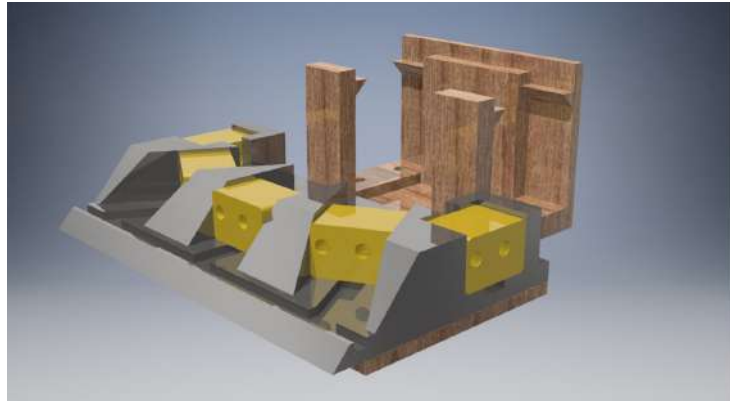
**Figura 19:** Visão traseira do suporte dos sensores.

#### 4.1.2 BASE

A base do robô é onde o suporte dos sensores e os demais componentes foram acoplados. Essa também foi projetada de forma customizada e impressa em impressora 3D. Para atender os requisitos do projeto, tem 8 cm de comprimento por 9,8 cm de largura máxima, possui encaixe para os dois motores com uma elevação com o objetivo de manter o robô o mais próximo do solo possível. Essa possui, na parte traseira uma proteção com altura de 5 cm e encaixe para o circuito, conforme pode ser visto na Figura 20. Na Figura 21 pode ser visto o suporte dos sensores acoplado a base.



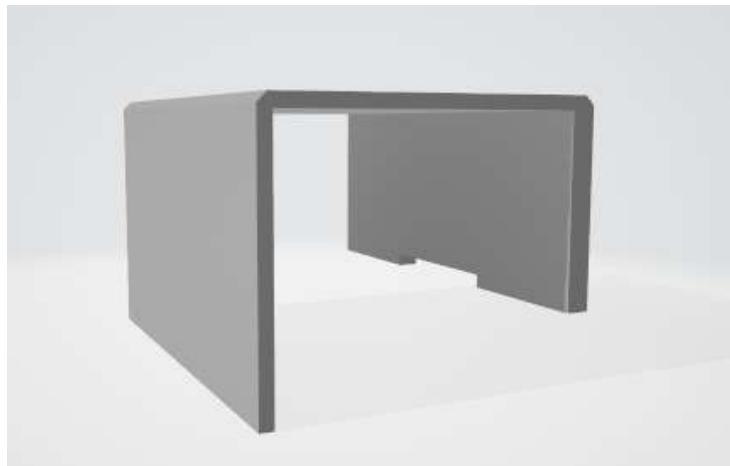
**Figura 20:** Visão superior da base.



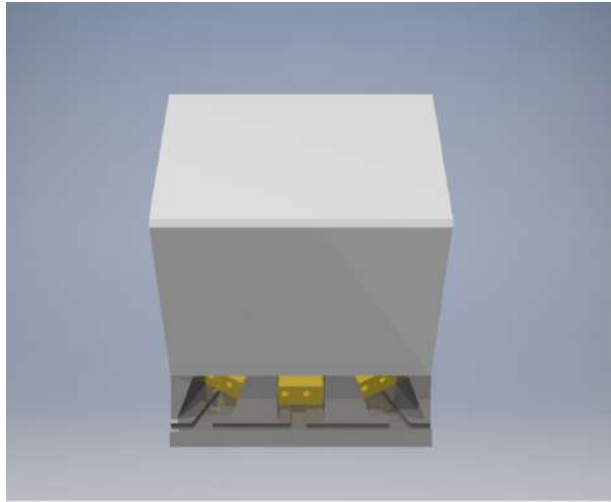
**Figura 21:** Visão superior da base e do suporte para os sensores acoplados.

#### 4.1.3 PARTE SUPERIOR

Foi projetada uma parte superior para proteger e acomodar a bateria e o circuito eletrônico, com 6cm de altura, 7,5cm de comprimento. As laterais abertas para facilitar a manutenção do robô, caso necessário, são encaixadas diretamente na base. A peça pode ser visualizado na Figura 22 e a sua integração com as demais partes na Figura 23.



**Figura 22:** Visão do projeto da parte superior.



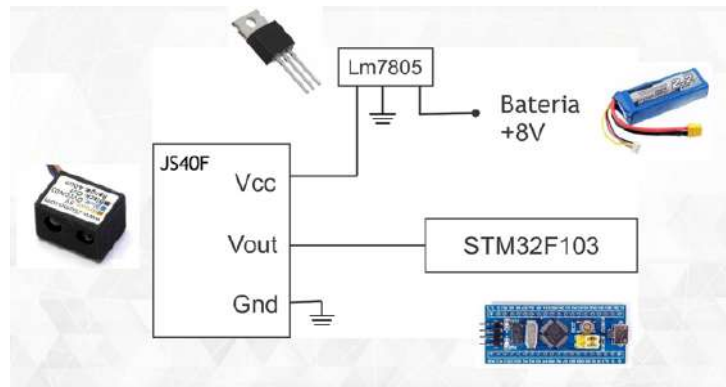
**Figura 23:** Visão do projeto integrado.

## 4.2 PROJETO DO CIRCUITO ELETRÔNICO

Foi necessária a criação de um circuito eletrônico capaz de atender o esquema apresentado na Figura 9, levando em consideração as especificações dos componentes. A integração do sistema acomoda o microcontrolador, que utiliza suas portas tanto para entrada como para saída, também os 5 sensores de distância digital que são usados como sensores de presença do adversário, 2 sensores de faixa para não deixar o robô sair do Dojô, a chave de acionamento responsável por ligar e desligar todo o circuito e a alimentação da ponte H responsável por controlar os motores.

Tendo em vista esses aspectos, a alimentação de todo circuito é feita por uma bateria de LiPo que fornece em média 8V de tensão. Essa tensão é utilizada para alimentar o step que aumenta a tensão que alimenta os motores e também dois reguladores de tensão LM7805 que aceitam receber como tensão de entrada entre 7V-20V e regulam a tensão de saída de maneira fixa em 5V. A saída regulada é usada para alimentar o acionamento da ponte H, sensores de faixa e presença. Assim, o segundo regulador é utilizado para alimentar o microcontrolador. Por conseguinte, os sensores de presença são alimentados com o 5V da saída regulada e seu sinal de saída é binário. Quando não detecta a presença de um adversário sua saída  $V_{out}$  é igual a  $Gnd$ , e quando detecta a presença sua saída  $V_{out}$  é igual a  $V_{cc}$ . Nesse caso, 5V as portas do microcontrolador STM32F103C8T6 suportam receber 5V e o esquemático da aquisição de sinais pode ser visto de forma separada na Figura 24.





**Figura 24:** Esquemático dos sensores JS40F.

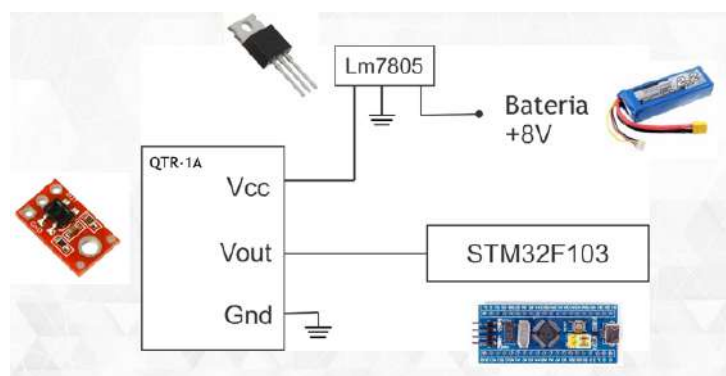
Para os sensores de faixa, a alimentação é feita de forma análoga, porém sua saída é analógica, o que significa que a saída irá variar entre 0V e 5V. Conforme descrito anteriormente, a refletância da superfície escura é menor resultado em uma tensão de saída maior. As portas do microcontrolador STM32F103C8T6 têm como característica que a tensão máxima, que será lida como um sinal baixo, é dada pela fórmula:

$$0,32 * (V_{cc} - 2V) + 0,75V$$

Tendo  $V_{cc} = 5V$ , tem-se que a tensão máxima que será lida como sinal baixo dado é igual a 1,71V. Já para o sinal ser lido como alto pela porta do microcontrolador, a tensão mínima que ele deve receber é dada por:

$$0,41 * (V_{cc} - 2V) + 1,3V$$

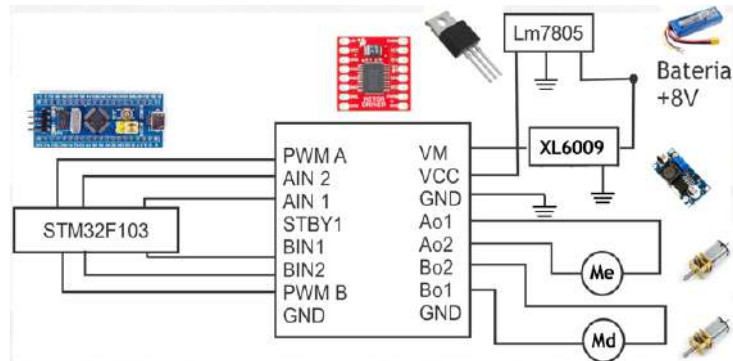
resultando em uma tensão mínima necessária de 2,53V para ser lida como alta pela porta do microcontrolador. O esquemático é pode ser visto na Figura 25.



**Figura 25:** Esquemático dos sensores JS40F.

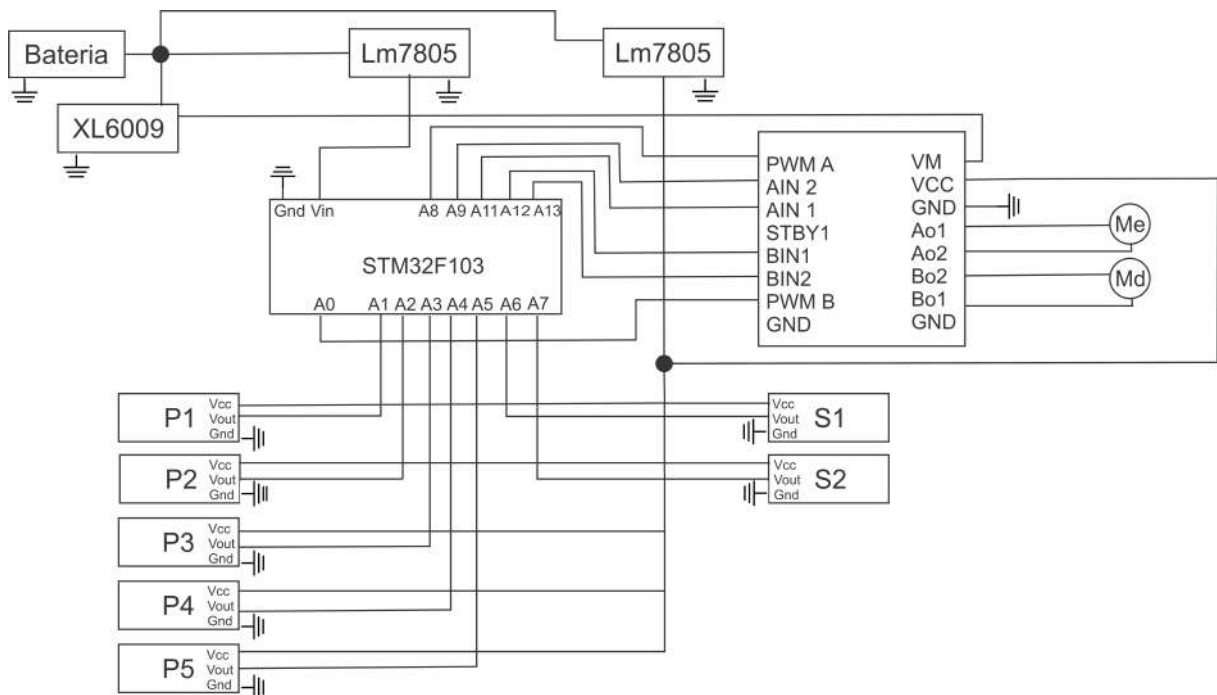
Para o acionamento da ponte H, essa é alimentada pela saída de tensão regulada em 5V. Para os motores, a tensão de alimentação vem do step up devido a necessidade de tensão maior, enquanto as entradas  $A_{IN1}$ ,  $A_{IN2}$ ,  $B_{IN1}$ ,  $B_{IN2}$  que são responsáveis pelo sentido dos motores,  $PWM_A$  e  $PWM_B$  recebem os sinais do microcontrolador e são

utilizados para controlar a velocidade dos motores. O esquemático pode ser visto na Figura 26.

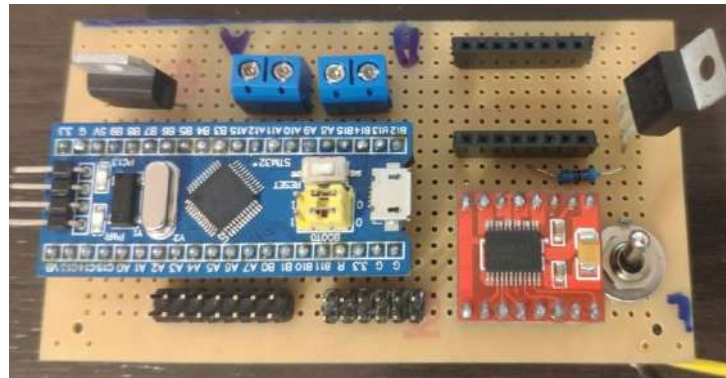


**Figura 26:** Esquemático da ponte H.

O circuito desenvolvido funcionou de maneira correta e foi capaz de realizar a aquisição dos sinais, tratar e gerar as saídas propostas de maneira correta. É possível verificar o esquemático na Figura 27 e uma foto do circuito montado na Figura 28.



**Figura 27:** Esquemático do circuito eletrônico.

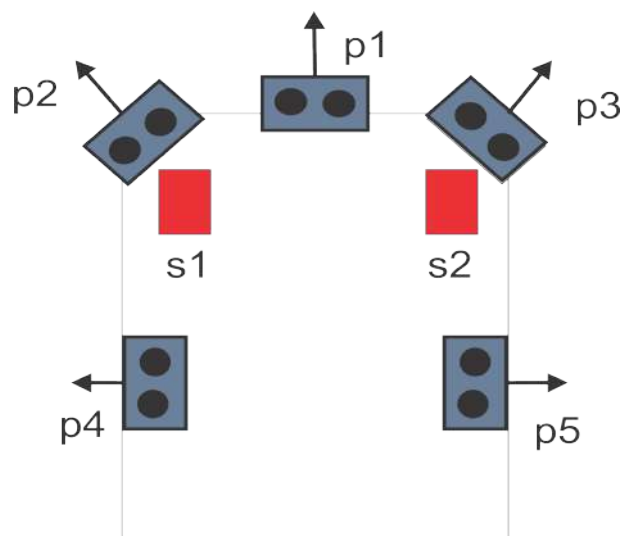


**Figura 28:** Circuito eletrônico.

#### 4.3 PROJETO DE CONTROLE DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS

Feito o levantamento do referencial teórico, foi projetada a lógica de automação do robô com base nas necessidades de movimentação e da entrada dos sensores externos, denominados de eventos. Para cada evento, foram definidas ações que o robô deve tomar, tendo em vista que foi utilizada uma máquina de estados para modelagem do controle e cada transição é o agente de ação. Seguindo a TCS, os eventos foram divididos em controláveis e não controláveis. Os controláveis são transições geradas pelo sistema de controle que, nessa situação, são todos os movimentos do robô causados pelo acionamento dos motores, enquanto os não controláveis são os que não é possível saber quando ocorrerão e são gerados a partir dos sensores.

A denominação dos eventos foi feita com base no arranjo dos sensores do robô, os quais são detalhados na Figura 29 para facilitar o entendimento.



**Figura 29:** Arranjo e denominação dos sensores.

Os sensores p1, p2, p3, p4 e p5 são os sensores de distância digital utilizados para detectar a presença do robô adversário e os sensores s1 e s2 são os sensores de refletância utilizados para detectar a faixa do dojô. Os eventos obtidos são descritos na Tabela 2 e Tabela 3.

**Tabela 2:** Denominação e descrição dos eventos controláveis modelados.

<b>Denominação do evento</b>	<b>Descrição do evento</b>
$F$	Andar para frente.
$F_{turbo}$	Andar para frente com velocidade máxima.
$G_{de}$	Gira para direita no próprio eixo travando o motor esquerdo.
$G_{df}$	Gira para direita diminuindo velocidade do o motor esquerdo.
$G_{ee}$	Gira para esquerda no próprio eixo travando o motor direito.
$G_{ef}$	Gira para esquerda diminuindo velocidade do o motor direito.
$Ré$	Andar de ré

**Tabela 3:** Denominação e descrição dos eventos não controláveis modelados.

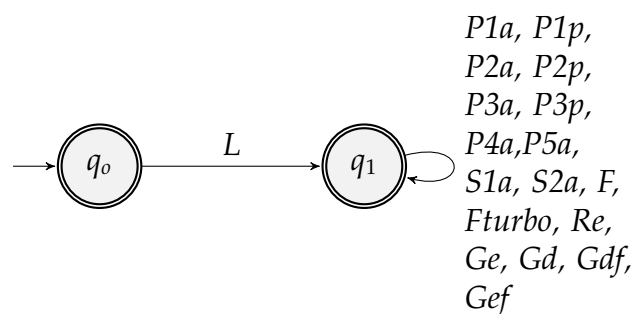
<b>Denominação do evento</b>	<b>Descrição do evento</b>
$L$	Robô é acionado
$P1_a$	Borda de subida do sensor P1
$P1_p$	Borda de descida do sensor P1
$P2_a$	Borda de subida do sensor P2
$P2_p$	Borda de descida do sensor P2
$P3_a$	Borda de subida do sensor P3
$P3_p$	Borda de descida do sensor P3
$P4_a$	Borda de subida do sensor P4
$P5_a$	Borda de subida do sensor P5
$S1_a$	Borda de subida do sensor S1
$S2_a$	Borda de subida do sensor S2

Com os eventos definidos e descritos, os autômatos das plantas e especificações foram gerados com o propósito de dar ao sistema de controle do robô a dinâmica desejada. Para cada sensor, foi modelada uma planta individual, totalizando 7 plantas. Ademais, foram modeladas 4 especificações. Para a modelagem das plantas foi utilizado o software *Supremica*, o qual possibilita a modelagem das plantas, composição e síntese dos autômatos desejados. As modelagens são apresentadas a seguir.

#### 4.3.1 MODELAGEM DAS PLANTAS

Com base na disposição dos sensores apresentada, a lógica de controle foi idealizada de maneira que o robô realize as movimentações com o propósito de ficar alinhado de frente com o oponente, reposicionando-se até que o sensor P1 esteja detectando a presença do oponente e, em casos de maior proximidade, os três sensores frontais estejam detectando o oponente. Assim, tem-se a garantia que o oponente está alinhado para poder ativar o modo turbo com um *step-up* aplicando tensão extra nos motores, elevando suas rotações a níveis maiores para empurrar o adversário para fora do Dojô.

O autômato do acionamento faz com que todos os demais eventos (controláveis e não controláveis) sejam ignorados até que o evento  $L$  ocorra, sinalizando que foi dado início à partida e o robô pode começar operar. Sua representação pode ser observada na Figura 30.

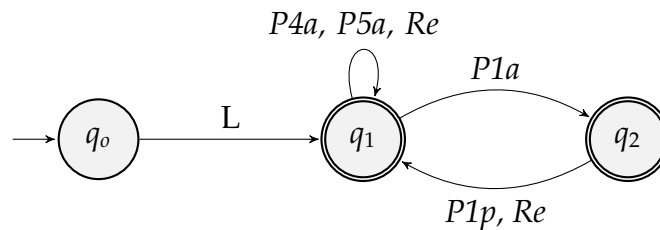


**Figura 30:** Dinâmica de acionamento do robô.

Os 5 sensores de presença possuem eventos próprios: quando detecta o oponente, evento denominado  $Pna$ . Além disso, os três sensores frontais possuem um segundo evento que ocorre quando o sensor para de detectar o oponente, denominado  $Pnp$ , sendo  $n$  o número do sensor.

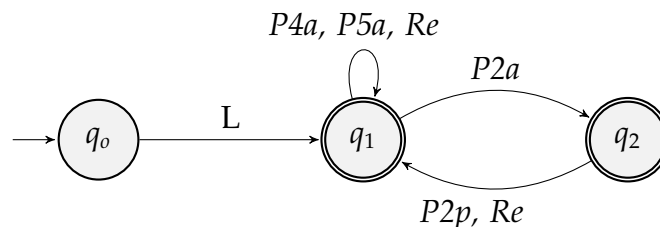
Para o sensor  $P1$ , conforme modelagem apresentada na Figura 31, após a ocorrência do evento  $L$  o autômato faz a transição para o estado  $q_1$ , com quatro transições

possíveis: três em auto-laço com os eventos  $P4a$ ,  $P5a$  e  $Re$  e também o evento  $P1a$  que ocorre ao detectar o oponente mudando para o estado  $q_2$ . Nesse estado, os eventos  $P4$ ,  $P5$  são fisicamente impossíveis de acontecer e são descartados por fazerem parte do auto-laço de  $q_1$ . Os eventos possíveis em  $q_2$  são os eventos  $P1p$  indicando uma borda de descida no sensor P1, que na prática significa que o sensor parou de detectar o oponente e leva o autômato de volta para o estado  $q_1$ . Também, o evento controlável  $Re$  que é projetado para estar sempre habilitado em estados que envolvem a movimentação do robô para que tenha prioridade, dando a garantia que não será bloqueado por outra planta e as especificações dos sensores de faixa sejam respeitadas para que o robô não saia do Dojô. A ocorrência de um desses eventos retorna o autômato para o estado  $q_1$ .



**Figura 31:** Planta do sensor P1.

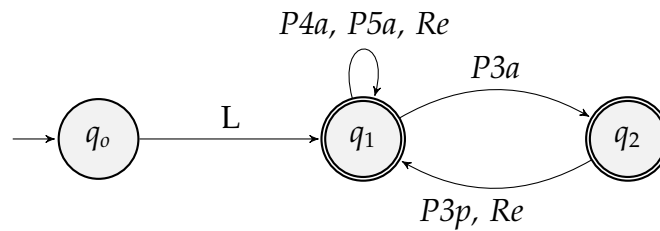
O sensor P2, representado na Figura 32, também realiza a transição para o estado  $q_1$  após a ocorrência do evento  $L$  que, de forma análoga ao sensor P1, possui três transições em auto-laço com o evento de  $Re$  e eventos de borda de subida dos sensores laterais pelo mesmo motivo. A transição para o estado  $q_2$  é pela ocorrência do evento  $P2a$ , que na prática indica que o oponente foi encontrado mas não está alinhado de maneira ideal. Nesse estado, tem-se o evento não controlável  $P2p$  indicando que o sensor P2 parou de detectar o oponente e o evento  $Re$  habilitado pelo motivo já citado.



**Figura 32:** Planta do sensor P2.

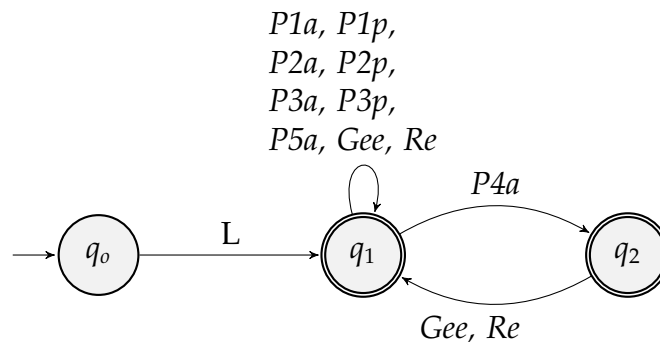
O sensor P3 foi modelado de maneira similar a P2, conforme mostrado na Figura 33, com a diferença que suas transições serão pela ocorrência dos eventos  $P3a$ ,  $P3p$ .

O sensor P4, que fica na parte lateral esquerda do robô, modelado conforme



**Figura 33:** Planta do sensor P3.

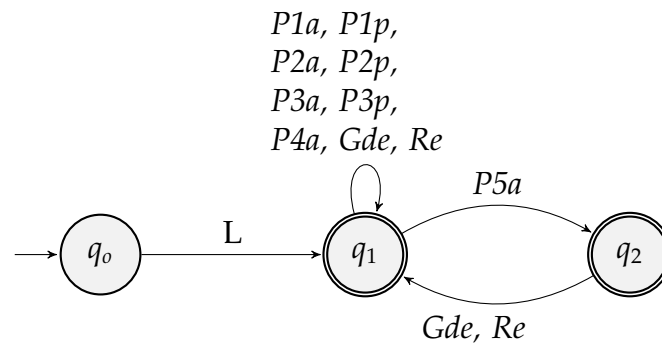
Figura 34, mantêm a lógica de transição de  $q_0$  para  $q_1$  das plantas apresentadas até agora. Nesta planta, a transição para o estado  $q_2$  ocorre pelo evento  $P4a$ , indicando que o adversário foi encontrado do lado esquerdo, fazendo com que os demais sensores fiquem impossibilitados de encontrar nesse estado. Logo, são descartados no auto-laço de  $q_1$ . Na planta, a transição para  $q_1$  ocorre pelo evento controlável  $Gee$  acionado pelo microcontrolador. Essa ação faz com que o robô gire a esquerda no próprio eixo aplicando tensão apenas no motor do lado direito, visando ficar de frente para o adversário. O sensor P5, fisicamente presente na lateral direita do robô, foi modelado



**Figura 34:** Planta do sensor P4.

seguindo a mesma lógica de P4, tendo como diferença que sua transição para o estado  $q_2$  é dada pelo evento  $P5a$  que indica que o oponente foi encontrado à direita. Portanto, o evento de transição que leva de volta para  $q_1$  é o evento controlável  $Gde$  gerado pelo microcontrolador, que faz o robô girar a direita sobre o próprio eixo aplicando tensão apenas no motor esquerdo. Sua modelagem pode ser observada na Figura 35.

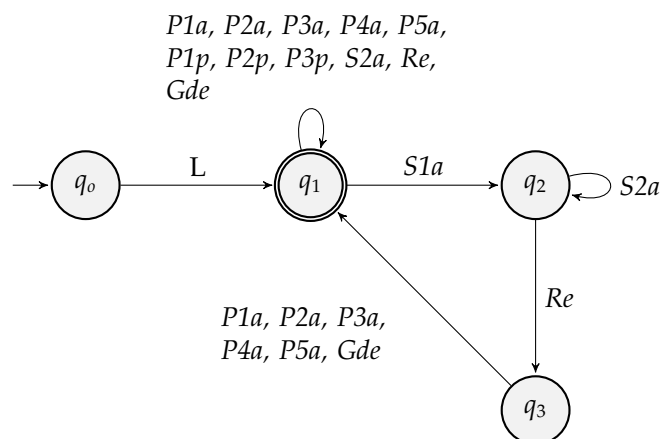
Os sensores  $S1$  e  $S2$ , também chamados sensores de faixa, são responsáveis por evitar que o robô ultrapasse as faixas que demarcam o limite do Dojo gerando uma ação correspondente conforme a ocorrência dos eventos de borda de subida nos sensores  $S1$  ou  $S2$ . Suas plantas podem ser observadas nas Figuras 36 e 37 e, da mesma maneira que as demais plantas o seu estado  $q_0$  ignoram os outros eventos até a ocorrência de  $L$  que o leva para o estado  $q_1$ , esse estado possui um auto-laço para que os eventos



**Figura 35:** Planta do sensor P5.

presentes nele não sejam ignorados.

No caso da planta de  $S1$ , sua evolução para o estado  $q2$  ocorre pelo evento  $S1a$  que, na prática, significa que o robô está sobre uma linha delimitadora de área do Dojô. No estado  $q2$ , há um auto-laço contendo o evento  $S2a$  para que esse não seja ignorado e uma transição gerada pelo evento  $Re$  que leva o autômato para o estado  $q3$  também faz com que as plantas dos sensores de presença voltem para o estado  $q0$ , uma vez que esse evento é tratado como prioridade e deve estar presentes nas outras plantas modeladas. Depois de evoluir para o estado  $q3$ , que tem na sua transição a possibilidade de ocorrência do evento de borda de subida por qualquer um dos sensores de presença, caso não ocorra é gerado o evento controlável  $Gde$  para o robô voltar sua parte frontal ao centro da arena, levando seu estado de volta para  $q1$ .

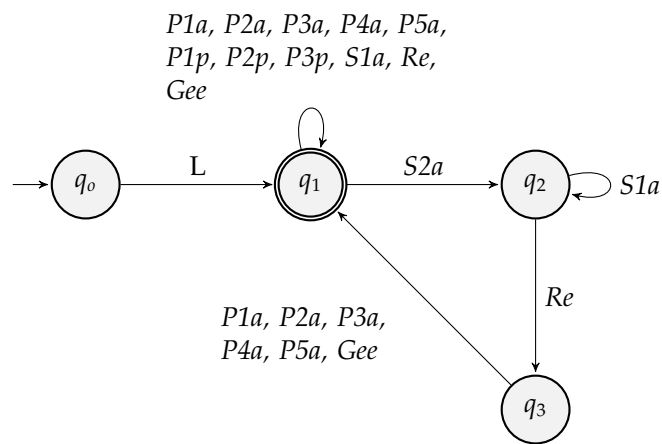


**Figura 36:** Planta do sensor S1.

Para o sensor  $S2$ , a modelagem foi feita de maneira semelhante, com a diferença que sua evolução para o estado  $q2$  é dada pela ocorrência do evento  $S2a$ . Nesse estado, o seu auto-laço está habilitando o evento  $S1a$  que também é seguido pela geração do evento controlável  $Re$  levando o autômato para o estado  $q3$  que também considera



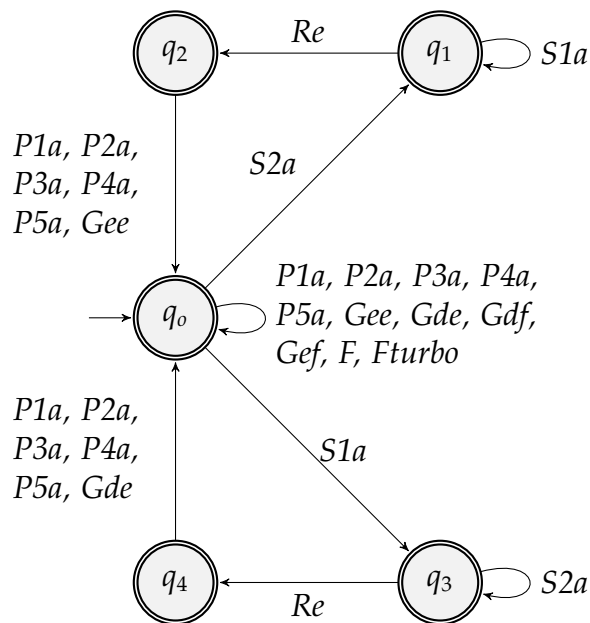
a possibilidade de ocorrência de borda de subida por qualquer um dos sensores de presença. Em caso de não ocorrerem, é gerado o evento  $Gee$  para que o robô gire em direção ao centro do dojô e o autômato evolua para o estado  $q1$ .



**Figura 37:** Planta do sensor S2.

### 4.3.2 MODELAGEM DAS ESPECIFICAÇÕES

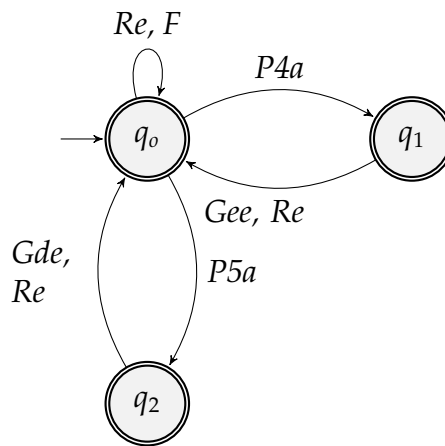
A especificação de afastamento da faixa do dojô, que tem como propósito evitar a saída do robô do Dojô, é apresentada na Figura 38. Essa mostra que a partir de  $q_0$  o autômato pode evoluir para  $q_1$  com a ocorrência do evento  $S2a$  ou para  $q_3$  por  $S1a$ . Nesses estados, os eventos  $P1a, P2a, P3a, P4a, P5a, Gee, Gde, Gdf, Gef, F, Fturbo$  são desabilitados até a ocorrência do evento  $Re$ , garantindo a prioridade desse que, após sua ocorrência, faz que as demais plantas e especificações retornem ao estado que o robô começa as movimentações. Nos estados  $q_2$  e  $q_4$  os sensores de presença são habilitados novamente para que o oponente possa ser detectado novamente e retornar o autômato para o estado  $q_0$ .



**Figura 38:** Especificação de afastamento da faixa do dojô.

A Figura 39 mostra a modelagem da especificação de ataque utilizando os sensores laterais, que têm como objetivo fazer com que o robô realize um giro sobre o próprio eixo para ficar de frente com o oponente caso ele seja detectado em algum dos lados. A partir do estado  $q_0$ , o autômato evolui para o estado  $q_1$  caso ocorra uma borda de subida em  $P4$  gerando o evento  $Gee$  ou para  $q_2$  caso ocorra borda de subida de  $P5$  gerando o evento  $Gde$ . Ambos os estados possuem  $Re$  como transição para o estado  $q_0$  para que retornem a esse estado caso ocorra o evento  $Re$  durante esse meio tempo.

A especificação de ataque frontal, apresentada na Figura 40, mapeia em um autômato a ideia de ataque proposta para o arranjo de sensores determinados, começando no estado  $q_0$  que possui um auto-laço contendo os eventos  $F, Re$  para o robô iniciar



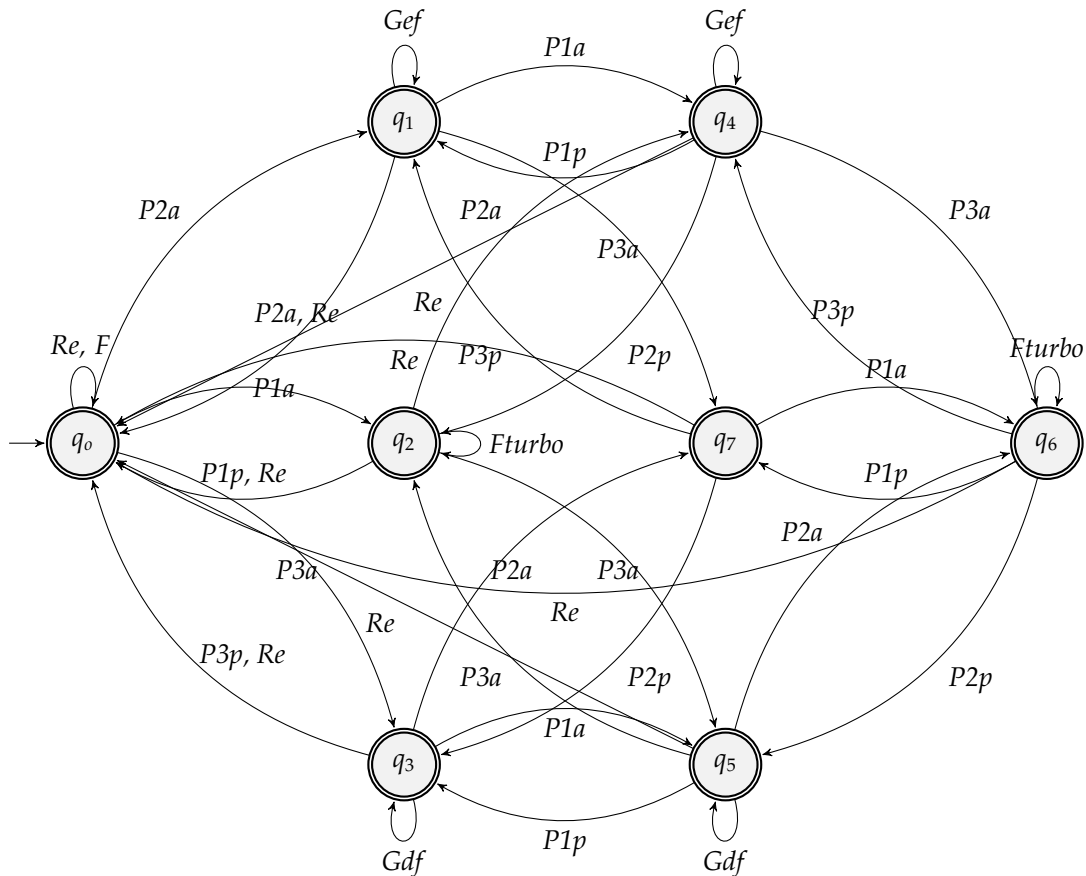
**Figura 39:** Especificação dos sensores laterais.

o ataque se movimentando para frente e mantendo habilitado  $Re$ , caso necessário na especificação de faixa. A partir desse estado é possível evoluir para os estados  $q_1$ ,  $q_2$  ou  $q_3$ , os quais representam a ocorrência de borda de subida nos sensores, respectivamente,  $P2$ ,  $P1$ ,  $P3$ . No caso de evoluir para o estado  $q_2$ , que na prática representa que o oponente foi detectado em linha reta, é gerado o evento  $Fturbo$  em um auto-laço. Esse estado pode voltar para o estado  $q_0$  pela ocorrência das transições  $P1p$ ,  $Re$  e também pode evoluir para os estados  $q_4$  ou  $q_5$ , com a ocorrência das transições  $P2a$  ou  $P3a$ , que significam que o oponente está sendo detectado pelo sensor frontal reto mais o sensor  $P2$  ou  $P3$ .

Caso a borda de subida seja do sensor  $P2$ , o autômato migra para o estado  $q_1$ , sinalizando que o oponente foi encontrado mais a esquerda. Nesse estado é gerado em auto-laço a transição  $Gef$  rotacionando o robô para a esquerda enquanto anda para frente. O retorno para  $q_0$  pode se dar pela ocorrência de  $P2a$  ou  $Re$  e também pode passar para o estado  $q_4$ , que na prática significa que o sensor  $P2$  e  $P1$  estão detectando o oponente. Caso o evento que ocorre em  $q_0$  seja  $P3a$ , o autômato evolui para  $q_3$ , que se comporta de forma parecida do estado  $q_2$ , Contudo as suas rotações serão à direita e o autômato evoluirá para o estado  $q_5$ . Nessa situação, o oponente está localizado levemente a direita.

No estado  $q_4$  é gerado o evento controlável  $Gef$  que faz o robô andar para frente direcionado para o lado diminuindo a tensão no motor do lado esquerdo. No estado  $q_5$  a ideia é a mesma, todavia o evento gerado é  $Gef$ , fazendo o robô se direcionar a esquerda. A partir desses estados é possível retornar a  $q_2$ , caso ocorra borda da descida no sensor. Já a evolução para o estado  $q_6$  ocorre pelo evento de borda de subida no terceiro sensor frontal, sendo que, fisicamente, isso significa que os 3 sensores frontais estão detectando o oponente e, logo, nesse estado é gerado o evento  $Fturbo$  para empurrar o adversário.

Todos os estados possuem a transição *Re* que leva o autômato para o estado  $q_0$ . Isso se deve à prioridade do evento e o mantém sempre habilitado e, em caso de ocorrência, retorna ao estado inicial de ataque.



**Figura 40:** Especificação de ataque.

Com todas as plantas e especificações modeladas, foi realizada a composição síncrona de todos os modelos. Posteriormente, foi feita a composição entre os resultados da composição das plantas e especificações, o que resultou em um autômato com o comportamento desejado. Após todas as composições síncronas serem feitas, foi realizada a síntese do supervisor com base na TCS para o SED, a qual ficou com 55 estados e 136 transições que foram minimizadas em um autômato menor, considerando uma linguagem gerada correspondente, resultando em 15 estados e 66 transições. O número de estados e transições resultante da composição síncrona de todas as subplantas, planta *G*, a composição síncrona de todas as especificações *K*, supervisor e o supervisor minimizado podem ser vistos na Tabela 4.

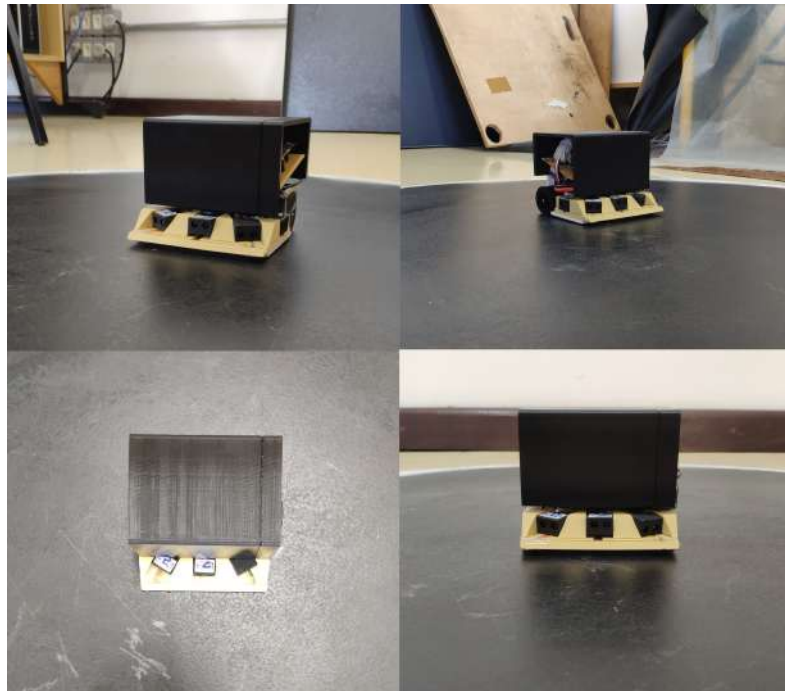
**Tabela 4:** Características dos autômatos.

<b>Tipo</b>	<b>Identificação</b>	<b>Estados</b>	<b>Transições</b>
Planta	<i>G</i>	44	168
Especificação	<i>K</i>	75	350
Supervisor	<i>Supervisor</i>	55	136
Min(Sup)	<i>Supervisor minimizado</i>	15	66

Utilizando o mesmo software *Supremica* para realizar simulações do conjunto de plantas, especificações projetadas e o supervisor minimizado sintetizado, foram feitas simulações obtendo respostas dentro da restritividade esperada. Dessa maneira, as ações ocorreram de acordo com o idealizado, demonstrando a maturidade da modelagem. A partir das simulações e modelagens, foi utilizado o software *Deslab* que é capaz de implementar e gerar código em C utilizando as modelagens das plantas, especificações e supervisor minimizado empregando o modo da Máquina de Mealy, que é uma máquina de estados finito. O código gerado é utilizado no microcontrolador, o qual é responsável por exercer a lógica de controle conforme o especificado.

#### 4.4 PROTÓTIPO FINAL

Com as peças da estrutura impressas conforme o projetado, a modelagem do sistema de controle e a implementação prontas, foi montado o protótipo final e realizados ensaios para testar o funcionamento do sistema como um todo. O protótipo ficou com o tamanho dentro dos limites de 10cm de largura por 10cm de comprimento, com o altura de 8,5cm e peso de 372g com a bateria, pode ser visto na Figura 41.

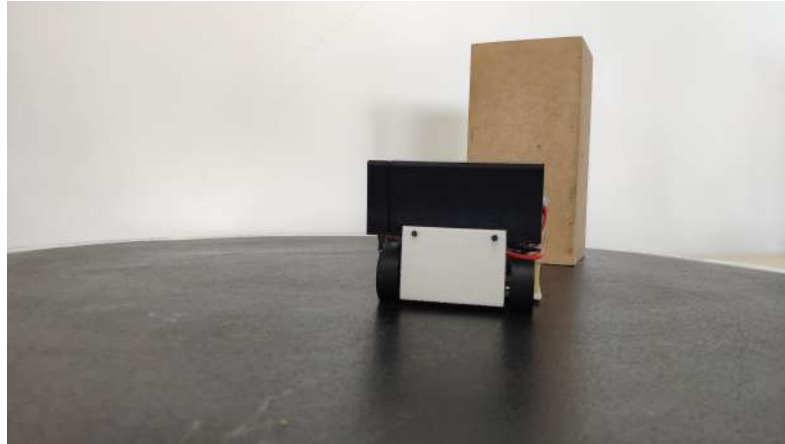


**Figura 41:** Protótipo final no Dojô.

Nos ensaios, a caixa de madeira que representa um oponente foi posicionado em diversas posições diferentes no dojô de forma a testar todas as possibilidades de uma partida de competição, com isso foi verificado a capacidade de movimentação do robô conforme a modelagem sendo capaz de realizar os movimentos propostos após o período de 5 segundos, respeitando as regras. Efetuando, por exemplo, a movimentação sobre o próprio eixo ao detectar o oponente pelos sensores de presença lateral, também a capacidade de fazer curvas ao detectar o oponente com os sensores P2 ou P3 e além disso a aptidão em realizar o ataque frontal com o tensão máxima nos motores ao detectar o oponente frontalmente pelo sensor P1 ou pelos sensores P1, P2 e P3. Além disso, também foi realizado um ensaio com o robô sozinho no dojô provando a capacidade do mesmo não sair da área de combate por conta própria, comprovando a eficiência da modelagem. Também foi possível ajustar o PWM deixando a movimentação mais suave e compatível com o tamanho do Dojô.

Um dos desafios apresentados durante o ensaio foi a distância que o sensor digital é capaz de detectar os objetos, sendo que, por vezes, pegava sinais de fora do área de combate, o que fazia com que o robô realizasse movimentações desnecessárias. Outro ponto, é a força dos motores que faz, às vezes, com que o robô não consiga parar ao detectar uma borda branca, sendo necessário diminuir o PWM nos motores para ficar em uma velocidade menor, garantindo que o robô não saia do Dojô sozinho. Na

Figura 42, é possível ver o ensaio realizado no Dojô com um bloco de madeira para simular o adversário.



**Figura 42:** Ensaio no Dojô.

## 5 CONCLUSÕES

Com a realização do projeto, é possível evidenciar as atividades realizadas para que fosse desenvolvido um robô autônomo destinado a competições de robótica, salientando as principais:

- Foi estabelecido um arranjo de sensores diferentes dos já propostos pela equipe *PatoBots*;
- O projeto das partes individuais da estrutura e impressão 3D, realizando a montagem de um protótipo que atende as limitações da categoria e as necessidades específicas desse projeto;
- Ao utilizar a teoria de sistemas a eventos discretos e a teoria de controle supervisão foi possível modelar o sistema de controle do robô de forma rápida e eficiente;
- Implementação da lógica de controle do robô em um microcontrolador de forma a ser capaz de gerar as saídas necessárias conforme as entradas do sistema;
- Montagem de um circuito eletrônico que atendesse as especificações dos componentes utilizados no projeto;
- Integração para montar o sistema final, capaz de realizar as ações propostas.

Por envolver diversas áreas, o desenvolvimento desse projeto mostrou a importância das matérias vistas durante o curso que serviram como base de conhecimento para conseguir aplicar a teoria na prática, trazendo um projeto do zero para o funcionamento. Também evidencia a importância da equipe *PatoBots* por ser uma equipe na qual os alunos podem aplicar seus conhecimentos em projetos reais e que participam de competições, sendo uma forma de estímulo aos alunos dos cursos de engenharia da UTFPR, Campus Pato Branco.



É possível destacar algumas dificuldades encontradas durante a execução desse projeto, que foram:

- A limitação de tamanho da categoria. Devido ao pequeno espaço, foi necessário aprender um *software* de desenho para modelar cada peça individualmente pensando no conjunto final;
- A qualidade de impressão 3D nos serviços encontrados, pois foi necessário realizar pequenos ajustes na peça ou aumentar a espessura dessa para ter a resistência necessária;
- Necessidade de diversos ensaios para chegar na velocidade que o robô se comportasse da melhor maneira possível;

É necessário, também, destacar possíveis melhorias a serem realizadas futuramente nesse trabalho:

- A utilização de sensores de faixa na parte traseira do robô, trazendo um grau de segurança maior ao robô para não sair da área de combate por conta própria;
- A utilização de pesos de até 130g para melhorar a distribuição do peso, fazendo que a parte frontal do robô fique o mais próxima do solo possível;
- Remodelagem da estrutura para diminuir a altura máxima do robô, aspecto de grande importância no desempenho em competições;
- Possibilidade de utilizar sensores digitais de presença com uma distância máxima de detecção menor, evitando que objetos fora área de combate sejam detectados causando movimentações errôneas que prejudicam o robô no combate;

## REFERÊNCIAS

- AFONSO, I. **Pesquisa inédita da CNI mostra cenário da indústria 4.0 no Brasil**. jun. 2016. <https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/inovacao-e-tecnologia/pesquisa-inedita-da-cni-mostra-cenario-da-industria-40-no-brasil/>. Acesso em: 20 ago. 2018.
- BIMBRAW, K. Autonomous cars: Past, present and future - a review of the developments in the last century, the present scenario and the expected future of autonomous vehicle technology. **ICINCO 2015 - 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Proceedings**, v. 1, p. 191–198, 01 2015.
- CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. Introduction to discrete event systems. Springer Science & Business Media, 2009.
- CASTRO, A. et al. Medidas de refletância de cores de tintas através de análise espectral. **Ambiente Construído**, v. 3, n. 2, p. 69–76, 2003.
- COMPTIA. **IT industry outlook 2020**. 2019. <https://bit.ly/38mtjFl>. Acesso em: 09 dez. 2019.
- CURY, J. E. R. Teoria de controle supervisorio de sistemas a eventos discretos. 2001.
- GOMES, H. S. **Tecnologia no Brasil volta crescer em 2017**. 2018. <https://g1.globo.com/economia/tecnologia/noticia/tecnologia-no-brasil-volta-crescer-em-2017-e-mantem-pais-entre-os-10-maiores-mercados-do-mundo.ghtml>. Acesso em: 30 jun 2018.
- JUNG, C. R. et al. Computação embarcada: Projeto e implementação de veículos autônomos inteligentes. **Anais do CSBC**, v. 5, p. 1358–1406, 2005.
- MALVINO. **Electronic Principles, 7E, Sie**. McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited, 2007. ISBN 9780070634244. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=DRYflafnaaQC>>.
- PAZOS, F. **Automação de sistema 6 robótica**. [S.l.]: Axel Books, 2002.
- QUEIROZ, M. H. d.; CURY, J. E. Controle supervisorio modular de sistemas de manufatura. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, SciELO Brasil, v. 13, n. 2, p. 123–133, 2002.
- RAMADGE, P. J. G.; WONHAM, W. M. The control of discrete event systems. **Proceedings of the IEEE**, v. 77, n. 1, p. 81–98, Jan 1989. ISSN 0018-9219.
- ROBOCORE. **Regras sumô**. jun. 2018. <https://bit.ly/2OBQgv3>. Acesso em: 22 ago. 2018.
- ROBOCORE. **Robocore Winter Challenge Concordia**. 2019. <https://events.robocore.net/wcxv/?list=>. Acesso em: 15 10. 2019.

RUBIO, F.; VALERO, F.; LLOPIS-ALBERT, C. A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, v. 16, n. 2, p. 1729881419839596, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1729881419839596>>.

SIEBEN, V. A high power h-bridge. 2003.

ZIELINSKI, K. M. C.

**Aprimoramento de um robô lutador de sumô autônomo**, Pato Branco, 2018.