

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS – UEA
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA – EST
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**

**ROBÔ MÓVEL ASPIRADOR AUTÔNOMO PARA AMBIENTES
DOMÉSTICOS**

KATHRIAN DE FRANÇA MARQUES

**MANAUS – AM
2021**

KATHRIAN DE FRANÇA MARQUES

**ROBÔ MÓVEL ASPIRADOR AUTÔNOMO PARA AMBIENTES
DOMÉSTICOS**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade do Estado do Amazonas – UEA – Escola Superior de Tecnologia, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. MSc. Moisés Pereira Bastos

**MANAUS – AM
2021**

MARQUES, Kathrian de França

Robô móvel aspirador autônomo para ambientes domésticos / Kathrian de França Marques. - Manaus, 2021
90 f.

Trabalho de conclusão de curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação – Universidade do Estado do Amazonas – UEA. Escola Superior de Tecnologia – EST, 2021.

Orientador: Prof. MSc. Moisés Pereira Bastos

1. Automação. 2. Automação Residencial. 3. Robótica Móvel.

KATHRIAN DE FRANÇA MARQUES

ROBÔ MÓVEL ASPIRADOR AUTÔNOMO PARA AMBIENTES DOMÉSTICOS

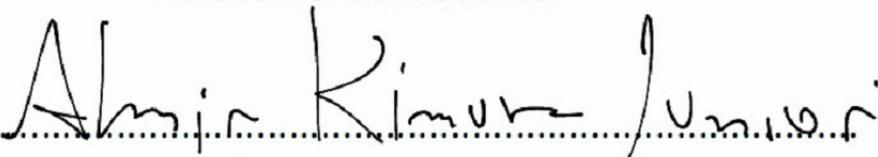
Esta monografia foi julgada e aprovada para obtenção do título de Bacharel, no Curso de Engenharia de Controle e Automação, da Universidade do Estado do Amazonas

Manaus, 20 de Dezembro de 2021

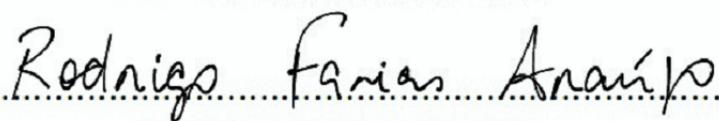
Prof. DSc. Israel Mazaira Morales
Coordenador do Curso de Engenharia de Controle e Automação

Banca Examinadora:


.....
Moisés Pereira Bastos


.....
Almir Kimura Junior


.....
Israel Mazaira Morales


.....
Rodrigo Farias Araújo


.....
Cleto Cavalcante De Souza Leal

RESUMO

Embasado nas áreas de automação residencial e robótica móvel, este projeto apresenta uma solução tecnológica para auxiliar na limpeza do chão em ambientes residenciais. Analisando o cotidiano doméstico, verifica-se uma necessidade da automatização de tarefas repetitivas e cansativas, otimizando o uso do tempo gasto e, conseqüentemente, aumentando o conforto dos usuários. Este projeto teve o objetivo de modelar e desenvolver um protótipo de um robô móvel para ser destinado a aspirar a sujeira no chão de ambientes domésticos. Foi proposto a manufatura aditiva na construção de partes mecânicas do chassi do robô, para se integrar com os sistemas eletrônicos de sensoriamento e controle. O sistema de processamento e controle foi realizado pela plataforma Arduino, que fornece soluções de hardware e software livre para prototipagem de sistemas de automação acessível a baixo custo. A aplicabilidade do robô está restrito a ambientes domésticos com pisos planos horizontais e secos. Ao final do projeto, obteve-se como resultado um protótipo funcional de um robô móvel capaz de realizar a sucção da sujeira e poeira do chão e de se transladar com determinada autonomia em um ambiente doméstico simples. O robô foi projetado para evitar obstáculos, paredes e degraus.

Palavras chaves: Automação. Robótica Móvel. Sistemas Embarcados.

ABSTRACT

Based on the areas of home automation and mobile robotics, this project presents a technological solution to help clean the floor in residential environments. Analyzing daily life at home, there is a need to automate repetitive and tiring tasks, aiming to optimize the use of time spent and, consequently, increase the comfort of users. This project aimed to model and develop a prototype of a mobile robot to be designed to vacuum solid dirt and dust on the floor of domestic environments. Additive manufacturing was proposed in the construction of mechanical parts of the robot chassis, to integrate with the electronic sensing and control systems. The processing and control system was carried out by the Arduino platform, which provides hardware and free software solutions for prototyping automation systems accessible at low cost. The applicability of the robot is restricted to domestic environments with flat horizontal dry floors. At the end of the project, the result was a functional prototype of a mobile robot capable of suctioning dirt and dust from the floor and moving with certain autonomy in a simple domestic environment. The robot is designed to avoid obstacles, walls and steps.

Keywords: Automation. Mobile Robotics. Embedded Systems.

Índice de figuras

Figura 1: Diagrama de Venn do conceito abrangente da automação.....	13
Figura 2: Algumas das possíveis trajetórias que um robô móvel poderia seguir.....	16
Figura 3: Esquema da estrutura do robô tipo uniciclo.....	18
Figura 4: Esquema de funcionamento do sonar ativo ultrassônico para a medição da distância entre o sensor e um objeto.....	20
Figura 5: Ilustração do funcionamento do sensor infravermelho.....	21
Figura 6: Esquema base do circuito de ponte h.....	24
Figura 7: Esquema de funcionamento do circuito base da ponte h.....	24
Figura 8: Estrutura simplificada de um relé e sua simbologia.....	25
Figura 9: Circuito comum de acionamento de uma carga através do relé.....	26
Figura 10: Esquema do circuito regulador chaveado básico.....	29
Figura 11: Fluxograma da metodologia de execução do projeto do robô aspirador...31	
Figura 12: Foto da chapa base de acrílico.....	33
Figura 13: Foto das rodas de tração independente com pneus.....	33
Figura 14: Foto da vista inferior da roda castor.....	34
Figura 15: Foto da vista lateral esquerda da roda castor.....	34
Figura 16: Foto do motor DC com caixa de redução e eixo duplo.....	35
Figura 17: Foto do fixador de acrílico.....	35
Figura 18: Foto do módulo sensor ultrassônico HC-SR04.....	36
Figura 19: Fotos da vista frontal (à esquerda) e posterior (à direita) do módulo TCRT5000.....	37
Figura 20: Foto do Arduino Uno R3.....	39
Figura 21: Foto do módulo de ponte H dupla L298n.....	40
Figura 22: Foto do módulo relé JQC-3FF-S-Z.....	41
Figura 23: Foto da bateria Li-Ion de 12 V e 4400 mAh.....	42
Figura 24: Foto do carregador da bateria.....	43
Figura 25: Foto do módulo regulador de tensão LM2596.....	44
Figura 26: Foto da visão inferior do motor de sucção.....	44
Figura 27: Foto da visão superior do motor de sucção.....	45
Figura 28: Esquema da prototipagem eletrônica completa do robô.....	47
Figura 29: Foto do modelo do kit chassi 2wd montado.....	52
Figura 30: Foto da impressora 3d modelo Sethi3D S4X.....	53
Figura 31: Ilustração em perspectiva do modelo mecânico do suporte para o sensor IR TCRT5000.....	53
Figura 32: Ilustração em perspectiva do modelo mecânico do suporte frontal para o sensor HC-SR04.....	54
Figura 33: Ilustração em perspectiva do modelo mecânico da barreira esquerda do robô.....	55
Figura 34: Ilustração em perspectiva do modelo mecânico da barreira direita do robô.....	55
Figura 35: Ilustração em perspectiva do modelo mecânico da peça inferior do depósito de poeira (visão superior).....	56
Figura 36: Ilustração em perspectiva do modelo mecânico da peça superior do depósito de poeira (visão superior).....	56
Figura 37: Foto do tecido microtule fixado no depósito como filtro de poeira.....	57
Figura 38: Ilustração em perspectiva do modelo mecânico do funil de sucção de poeira.....	58

Figura 39: Ilustração em perspectiva do modelo mecânico do suporte para os circuitos e módulos eletrônicos.....	58
Figura 40: Foto da montagem do sensor ultrassônico HCSR04.....	59
Figura 41: Foto da montagem do sensor infravermelho TCRT5000.....	60
Figura 42: Foto da montagem do Arduino Uno com o protoboard.....	61
Figura 43: Foto do modelo de protoboard de 170 furos utilizado.....	61
Figura 44: Foto da montagem dos módulos eletrônicos. Da esquerda para direita: ponte H, relé e regulador de tensão.....	62
Figura 45: Foto da montagem do motor de sucção.....	63
Figura 46: Foto da montagem final do robô aspirador em perspectiva.....	64
Figura 47: Foto do ambiente antes da realização do teste 1: Ambiente ideal e restrito com chão empoeirado.....	67
Figura 48: Inclusão da biblioteca Ultrasonic no código de programação principal.....	68
Figura 49: Ilustração das trajetórias de controle aleatório.....	69
Figura 50: Trecho da programação de definição dos tempos de recuo e giro do robô.	69
Figura 51: Código de verificação dos sensores e atuação para o recuo e giro do robô para o teste 1.....	70
Figura 52: Foto do ambiente após a realização do teste1: Ambiente ideal e restrito com chão parcialmente aspirado.....	73
Figura 53: Foto do estado do depósito de poeira após a realização do teste 1: Depósito quase cheio.....	74
Figura 54: Foto do estado do filtro de poeira após a realização do teste.....	75
Figura 55: Foto do estado da roda direita de tração motorizada após a realização do teste 1.....	76
Figura 56: Foto do ambiente doméstico do teste 2.....	77
Figura 57: Foto do desnível para o teste antiquedas.....	77

Índice de tabelas

Tabela 1: Parâmetros de funcionamento do HC-SR04. Fonte: Retirado do <i>datasheet</i> , 2021.....	37
Tabela 2: Parâmetros <i>de funcionamento</i> do módulo TCRT5000. Fonte: Retirado do <i>datasheet</i> , 2021.....	38
Tabela 3: Especificações básicas do microcontrolador ATmega328p. Fonte: Retirado do site oficial do fabricante: https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328P	39
Tabela 4: Especificações técnicas do módulo L298n. Fonte: Retirado do <i>datasheet</i> , 2021.....	40
Tabela 5: Resumo das especificações da bateria. Fonte: Retirado do <i>datasheet</i> , 2021.....	42
Tabela 6: Resumo das especificações do módulo LM2596. Fonte: Retirado do <i>datasheet</i> , 2021.....	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Objetivo Geral.....	12
1.2 Objetivos Específicos.....	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1 Automação.....	13
2.2 Automação Residencial.....	14
2.3 Robótica Móvel.....	15
2.3.1 Morfologia de robôs móveis.....	16
2.4 Sensores.....	18
2.4.1 Sensor Ultrassônico.....	19
2.4.2 Sensor Infravermelho Refletivo.....	20
2.5 Microcontroladores.....	21
2.6 Motor DC.....	22
2.7 Ponte H.....	23
2.8 Relé.....	25
2.9 Bateria de Íons de Lítio.....	27
2.10 Regulador de tensão chaveado DC-DC tipo <i>buck</i>	28
2.11 Manufatura Aditiva.....	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1 Atividade 1: Verificação de recursos e materiais.....	32
3.1.1 Chassi de robô 2wd.....	32
3.1.2 Sensores.....	36
3.1.2.1 Sensor ultrassônico HC-SR04.....	36
3.1.2.2 Sensor óptico refletivo TCRT5000.....	37
3.1.3 Plataformas de processamento e controle.....	38
3.1.3.1 Arduino UNO R3.....	38
3.1.3.2 Ponte H L298n.....	40
3.1.3.3 Módulo relé.....	41
3.1.4 Equipamentos de fornecimento e tratamento de energia elétrica.....	41
3.1.4.1 Bateria recarregável de íons de lítio.....	42
3.1.4.2 Módulo regulador de tensão DC-DC tipo <i>buck</i>	43
3.1.5 Motor de sucção.....	44
3.1.6 Relação de custos de aquisição dos equipamentos.....	45
3.2 Atividade 2: Projeto dos circuitos eletrônicos.....	46
3.2.1 Conexões do Módulo regulador de tensão LM2596.....	47
3.2.2 Conexões do Arduino UNO R3.....	48
3.2.3 Conexões do Motor DC de sucção.....	48
3.2.4 Conexões do Sensor Ultrassônico HC-SR04.....	48
3.2.5 Conexões do Módulo ponte H dupla L298n.....	49
3.2.6 Conexões do Sensor infravermelho TCRT5000.....	50
3.2.7 Conexões do Módulo relé.....	50
3.2.8 Conexões da Bateria de Li-Ion de 12 V / 4400 mAh.....	51
3.3 Atividade 3: Projeto e construção mecânica da estrutura do chassi.....	51
3.4 Atividade 4: Montagem e calibração dos componentes eletrônicos.....	59
3.5 Atividade 5: integração das partes mecânicas e eletrônicas do robô.....	63
4 RESULTADOS OBTIDOS.....	66
4.1 Aplicação do teste 1: atuação do robô em um ambiente ideal e restrito.....	66
4.2 Estratégias de controle do robô.....	68

4.3 Análise dos resultados do teste 1.....	70
4.4 Aplicação do teste 2: atuação do robô em ambientes domésticos reais.....	76
4.5 Análise dos resultados do teste 2.....	78
5 CONCLUSÃO.....	80
5.1 Considerações finais e trabalhos futuros.....	81
6 REFERÊNCIAS.....	83
7 APÊNDICES.....	85
APÊNDICE A – CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO COMPLETO EMBARCADO NO ARDUINO.....	85
APÊNDICE B – CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO DA BIBLIOTECA ULTRASONIC.H	88

1 INTRODUÇÃO

No cotidiano, o tempo disponível para tarefas domésticas, como a limpeza do piso, é cada vez mais escasso. Segundo alguns autores (ASAFA et al., 2018; GOON et al., 2019; PATEL; PATIL, 2017), as tarefas domésticas, como varrer e aspirar pó do chão, ainda são feitas na sua maior parte de forma manual, utilizando-se de vassouras e máquinas aspiradoras manuais, e assim necessita de tempo e disposição humana. Por outro lado, segundo Prudente (2011), os avanços tecnológicos constantes e a busca por conforto e segurança vem fazendo com que a cada dia as residências tenham mais e melhores sistemas de automação para essas tarefas domésticas. Porém, em um ambiente doméstico, segundo Secchi (2012), sempre surgem restrições na movimentação e mudanças constantes no ambiente, e com isso, torna-se desafiador o desenvolvimento de estratégias de automação para a limpeza do ambiente, ou mais especificamente, do piso.

Uma solução existente para, no mínimo, auxiliar na limpeza do piso é a utilização dos chamados robôs aspiradores autônomos. Um robô aspirador, que é um robô móvel, precisa ser autônomo no sentido de ser capaz de se localizar no ambiente e conseguir se movimentar desviando dos obstáculos presentes, como paredes, mesas, cadeiras e degraus. (SIEGWART; NOURBAKHS; SCARAMUZZA, 2011). Também se faz necessário o robô ter a capacidade de cobrir todo ou quase todo o chão do ambiente, e de forma mais rápida possível, sendo até apto de perceber quais foram as áreas já cobertas.

A utilização de robôs para realizar a limpeza do piso é uma solução relativamente conhecida, de tal forma que, modelos disponíveis para venda já são existentes em quase o mundo inteiro. Porém, muitos desses modelos comerciais e atuais de robôs autônomos aspiradores geralmente possuem um custo elevado de aquisição, mesmo que ainda não conseguem substituir totalmente uma limpeza manual mais profunda e pesada, como, por exemplo, em pisos irregulares, tapetes, em paredes e móveis. (ASAFA et al., 2018; GOON et al., 2019). Dessa forma, pode-se concluir que, atualmente os robôs aspiradores servem principalmente para auxiliar na limpeza suave e superficial de pisos.

Alguns fatores são decisivos na eficiência desse produto, tais como a duração da bateria, a capacidade do recipiente de poeira, a presença de filtros adequados na sucção, e principalmente do nível de inteligência aplicada na navegação do ambiente doméstico.

Com base nas constatações realizadas, este trabalho busca verificar se é possível realizar a modelagem, a construção e a programação de um robô móvel, de baixo custo, dedicado a aspirar partículas sólidas em trajetórias retas, para ambientes domésticos.

Este trabalho justifica-se pois o robô aspirador autônomo é uma aplicação prática da robótica móvel, uma vez que lida com áreas importantes de pesquisa tecnológica, que é a navegação e exploração robótica de ambientes fechados e

dinâmicos, que exemplifica melhor os ambientes reais. O projeto de um robô móvel lida com aplicações de mecatrônica e de sistemas embarcados, de tal forma que é necessário o planejamento estratégico da execução das partes mecânicas, eletrônicas e da programação do *software* do robô móvel. (SECCHI, 2012). Justifica-se então esse estudo, modelagem e construção desse produto.

1.1 OBJETIVO GERAL

Modelar e desenvolver um protótipo de um robô móvel, de topologia de uniciclo e tração diferencial, para ser destinado a aspirar a sujeira do chão de ambientes domésticos. Busca-se um protótipo funcional, de baixo custo e com um determinado nível de autonomia.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar um levantamento bibliográfico das áreas de conhecimento envolvidas.
- Dimensionar e selecionar modelos comerciais para os dispositivos de alimentação, sensoriamento, controle e atuação.
- Projetar, implementar e integrar os circuitos elétricos de alimentação, sensoriamento, controle e de interface entre o controlador e os atuadores.
- Realizar a modelagem da estrutura mecânica, assim como sua manufatura aditiva, para comportar os dispositivos de movimentação, aspiração, junto aos circuitos e equipamentos de controle.
- Desenvolver os algoritmos e os *softwares* para o controle da movimentação autônoma em ambientes domésticos para aspiração de pó.
- Realizar testes de navegação e aspiração em um ambiente ideal e restrito para desenvolver e aprimorar o desempenho do robô.
- Fazer as correções necessárias no *software* para a eliminação de *bugs* e realizar testes de desempenho nos ambientes alvo: Ambientes domésticos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são expostas as definições e conceitos necessários das teorias para o entendimento do leitor. Estabeleceu-se alguns tópicos para a delimitação dos assuntos e dos componentes do trabalho desenvolvido.

2.1 AUTOMAÇÃO

Automação é todo processo que realiza tarefas e atividades de forma autônoma ou que auxilia o homem em suas tarefas do dia a dia. (ROSÁRIO, 2009). Um sistema pode ser definido como automatizado quando é capaz de cumprir um ou mais tarefas por meio de decisões que são tomadas em função de sinais de várias naturezas que provêm do mesmo sistema a ser controlado. Em poucas palavras, o sistema age sem intervenção humana. (PRUDENTE, 2011)

As decisões humanas são tomadas e substituídas por dispositivos (mecânicos, elétricos e eletrônicos, entre outros) e *softwares* concebidos por meio de especificações funcionais e tecnológicas, com uso de metodologias. (ROSÁRIO, 2009). A figura 1 ilustra esse conceito mais abrangente da automação por meio de um diagrama de Venn da integração de áreas afins da engenharia e tecnologia.

Figura 1: Diagrama de Venn do conceito abrangente da automação.



Fonte: Adaptado de Rosário (2009, p. 24)

A automação também pode ser definida como qualquer sistema que substitui o trabalho humano, apoiado por computadores, de modo a favorecer a segurança das pessoas, qualidade do produto, velocidade de produção ou redução de custos. Atualmente, os objetivos da automação de sistemas transcendem o aumento da produtividade e redução de custos, ou seja, a automação não só possui a indústria como uma área de aplicação. (MORAES; CASTRUCCI, 2010).

As pessoas possuem cada vez menos tempo disponível para as tarefas do dia a dia, e assim a automação passou a ser utilizada para auxiliar ou até mesmo para realizar por si só tais tarefas, e dessa forma, pode-se entrar no conceito de automação residencial que será tratado na seção seguinte. Dessa forma, a automação tem também a função de prover o conforto a seus usuários, em contextos que alcançaram os prédios e residências. (PRUDENTE, 2017).

2.2 AUTOMAÇÃO RESIDENCIAL

Dentro da área da automação, pode-se subdividi-la nos campos de aplicação de forma mais específica e então analisar os conceitos, as possibilidades de aplicação e soluções. A automação pode ser utilizada em diferentes campos, como por exemplo, em processos de produção industrial, nas residências e nos serviços prestados em ambientes comerciais. Entre essas aplicações previamente mencionadas está a automação residencial, que também é conhecida como domótica.

O termo Domótica define-se como o conjunto de técnicas de gestão automatizada dos equipamentos de edifícios ou estruturas. O termo é mundialmente conhecido por *home automation* na língua inglesa, ou na sua origem na língua francesa, *Domotique*, das palavras *Domus* (casa) e *Imotique* (automática). (PEDRO, 2021).

A domótica também pode ser entendida como um processo que utiliza diferentes soluções e dispositivos de automação, para diminuir o esforço realizado nas atividades diárias nas residências e comércios, e assim, aumentar o conforto e segurança dos seus usuários e também racionaliza o consumo de energia. O sistema que integra todos os dispositivos para automatizar e controlar uma residência é o sistema domótico. Tal sistema é composto por vários elementos, entre eles os atuadores, sensores, controladores, redes de dados e as interfaces com os usuários. (PRUDENTE, 2017). Para este TCC, a atividade residencial e diária a ser automatizada será a da limpeza do chão através da aspiração da sujeira/pó utilizando um protótipo de um robô móvel.

2.3 ROBÓTICA MÓVEL

Diferentemente dos robôs fixos, como por exemplo, um manipulador robótico industrial, que são formados por uma estrutura mecânica articulada com semelhanças antropomórficas e com uma base fixa, os robôs móveis são plataformas mecânicas que possuem um sistema de locomoção capaz de se movimentar através de um determinado ambiente de trabalho, dotados de certo nível de autonomia para sua locomoção, portando cargas.

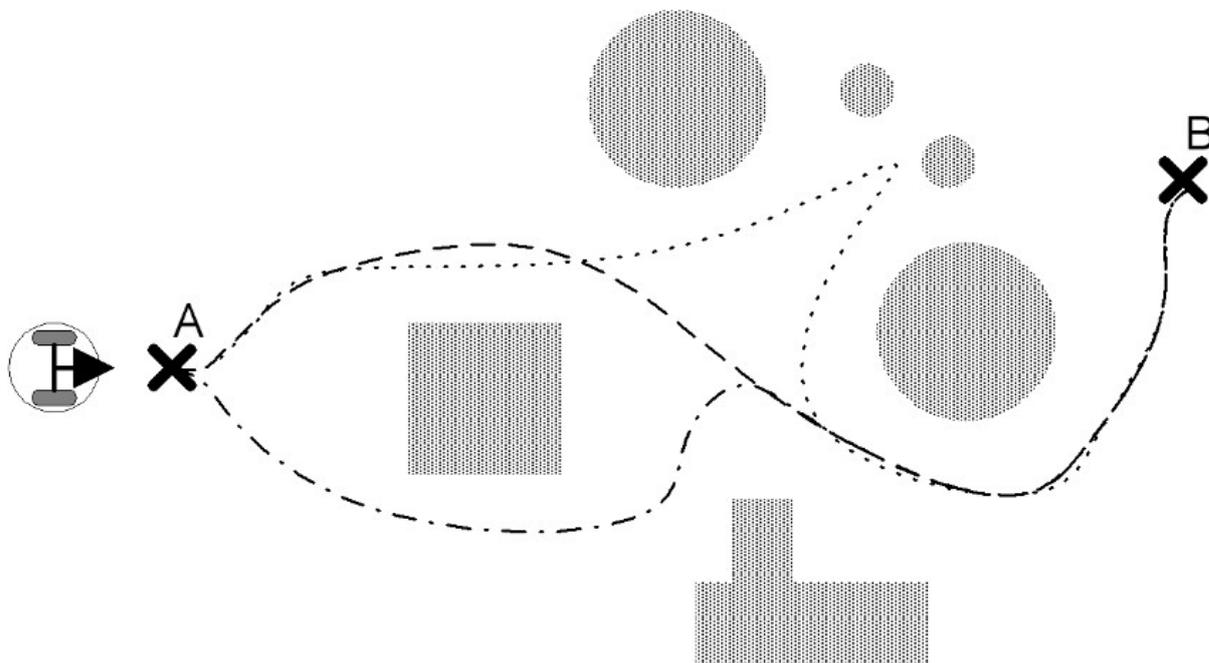
Segundo Secchi (2012), faz-se necessário esclarecer que o conceito de autonomia não se relaciona apenas com questões energéticas, mas também se refere à capacidade de perceber, modelar, planejar e atuar para alcançar determinados objetivos, sem a intervenção (ou com uma intervenção muito pequena) do operador humano, já que o robô pode se locomover em ambientes estruturados, semiestruturados, ou não estruturados, total ou parcialmente conhecidos. O papel deste deve ser desempenhado pelo próprio sistema de controle do veículo, que o deve suprir com a inteligência necessária para fazê-lo mover corretamente.

Na área da robótica móvel, conhecer a localização do robô é uma atividade essencial visto que é um dos requisitos para torná-lo autônomo para navegação. Isso consiste no robô ter informações sobre a sua própria posição e orientação em relação a um sistema de coordenadas fixo em cada instante definido. Os robôs móveis muitas vezes operam em ambientes não estruturados ou semiestruturados (também conhecidos como ambientes dinâmicos), ou seja, ambientes não totalmente controlados, que se alteram de forma inesperada, com obstáculos que variam sua forma e posição no tempo, e inclusive podendo ter a presença de pessoas e de outros objetos móveis.

Os robôs que atuam nesses ambientes dinâmicos devem deparar-se com significativas incertezas na posição e na identificação de objetos. A incerteza é tal que, mover-se de um ponto A até um ponto B é uma atividade arriscada, pois ao ter que lidar com tantas incertezas do entorno, não se espera que o robô siga trajetórias pré-determinadas ou alcance seu destino final com o mesmo nível de precisão que se espera de um manipulador industrial fixo, que possui um volume de trabalho limitado e, geralmente, está enclausurado por questões de segurança. (SECCHI, 2012).

Na figura 2 está exemplificado esse caso de movimentação com algumas das possíveis trajetórias que um robô móvel poderia seguir.

Figura 2: Algumas das possíveis trajetórias que um robô móvel poderia seguir.



Fonte: Adaptado de Secchi (2012, p.12).

2.3.1 MORFOLOGIA DE ROBÔS MÓVEIS

O aspecto da morfologia dos robô móveis também é um ponto importante no projeto pois definirá as suas características mecânicas e de controle de acordo com o ambiente de atuação e as tarefas a serem desempenhadas. A morfologia de um robô diz respeito aos seus sistemas de tração, direção, as características sensoriais e a sua forma física, de tal forma que atenda as exigências de precisão de posicionamento, velocidade, manobrabilidade e as características do terreno. (SECCHI, 2012). O ambiente alvo de atuação deste TCC é um ambiente doméstico interior, como um quarto, uma sala de estar ou cozinha, e com as características do terreno em plano horizontal e piso seco, desta forma, evita-se a sua utilização em planos inclinados e em banheiros por exemplo. A possibilidade do robô alcançar um desnível descendente, ou seja, uma decida em degrau no ambiente é um problema. Esse problema será considerado no projeto e o robô deverá perceber esse desnível e evitá-lo. A solução desse problema será melhor explanado nas seções seguintes. Classificou-se esse ambiente nos chamados ambientes semiestruturados, ou seja, é um ambiente construído pelo homem mas não projetado especificamente para a atuação de robôs.

O tipo do sistema de locomoção a ser utilização será o de rodas. Robôs móveis sobre rodas são extremamente populares pois alcançam um bom nível de eficiência e possuem uma implementação mecânica relativamente simples. Além

disso, a falta de equilíbrio do robô geralmente não é uma fonte de problemas na pesquisa de tal forma que, robôs com três rodas são suficientes para alcançar um equilíbrio mecânico estável. Por isso, as pesquisas sobre robôs móveis sobre rodas tendem a focar nos problemas de tração, manobrabilidade e controle. (SIEGWART; NOURBAKHS; SCARAMUZZA, 2011).

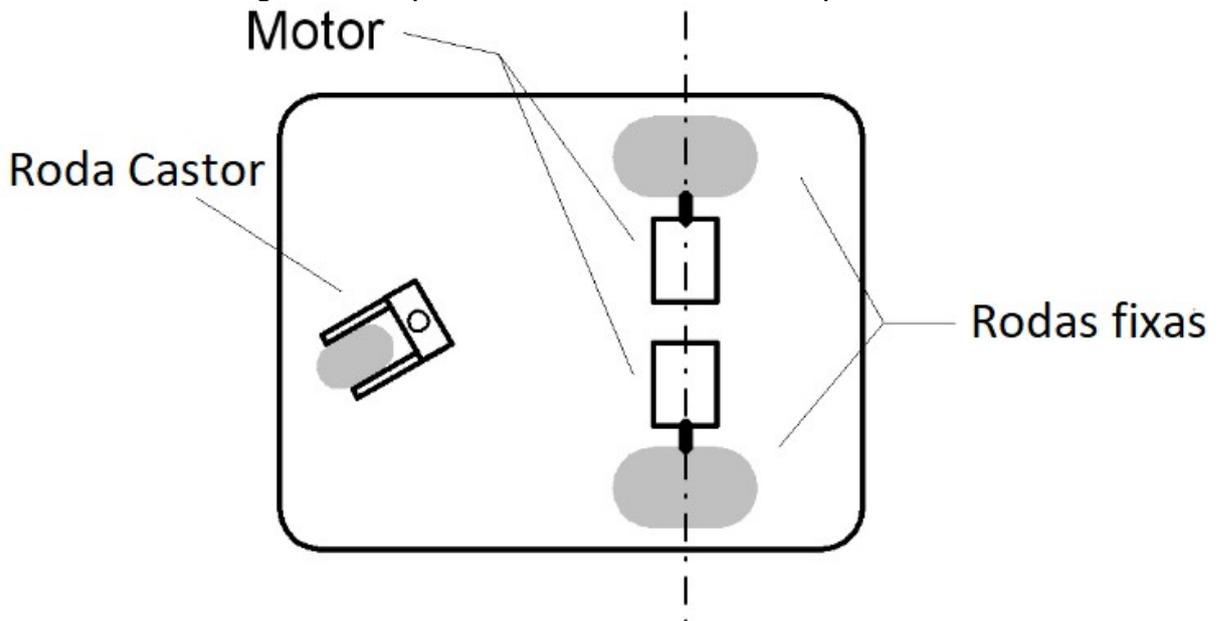
Segundo Secchi (2012), a mobilidade de um robô móvel terrestre sobre rodas está caracterizada por dois fatores: o tipo de rodas que possuem e sua disposição sobre uma estrutura mecânica. Dentro das rodas conhecidas como rodas convencionais não-omnidirecionais temos três tipos:

- **Roda fixa:** o eixo da roda é fixado na estrutura do robô. Em geral este tipo está associado ao sistema de tração do robô.
- **Roda orientável centralizada:** é aquela em que o movimento do plano da roda com respeito à estrutura é uma rotação ao redor de um eixo vertical que passa através do centro da roda. Em geral é usada como roda de direção ou de tração com direção.
- **Roda orientável não-centralizada (roda boba):** conhecida também como roda castor (*castor wheel* em inglês) ou rodízio. É uma roda orientável com relação à estrutura tal que a rotação do plano da roda ocorre ao redor de um eixo vertical que não passa através do centro da roda. Sua principal função é dar estabilidade à estrutura mecânica do robô como roda de direção.

A disposição das rodas no robô permite a variedade do seu grau de manobrabilidade. Neste TCC, pretende-se utilizar a disposição conhecida como unicycle. O robô tipo do unicycle é, em geral, o eleito por pesquisadores para experimentar novas estratégias de controle por possuir uma cinemática simples. É uma estrutura formada por duas rodas fixas convencionais, sobre um mesmo eixo, controladas de maneira independente, e por uma roda castor que lhe confere estabilidade. O sistema de tração e direção associado ao robô lhe permite controlar de forma suas velocidades lineares e angulares de forma independente. (SECCHI, 2012). A figura 3 apresenta um esquema da estrutura do robô do tipo unicycle.

Sobre a tração e direção do robô móvel, será utilizada uma configuração chamada de tração diferencial, onde a tração e a direção estão em um mesmo eixo com duas rodas motorizadas independentes e uma roda castor para estabilização, da mesma forma como está apresentado na figura 3.

Figura 3: Esquema da estrutura do robô tipo uniciclo.



Fonte: Adaptado de Secchi (2012, p. 22).

2.4 SENSORES

Uma das mais importantes tarefas de um sistema autônomo é adquirir informações do próprio ambiente, e isso é realizado através de medições de vários sensores e de extrair e interpretar as informações úteis dessas medições. O robô autônomo necessita de sistemas de sensoriamento capazes de coletar e interpretar informações para ter condições de perceber o ambiente a sua volta (sensores exteroceptivos ou externos), como, por exemplo, sobre a distância entre si e um obstáculo. Dessa forma o robô pode impedir colisões na sua movimentação. (SIEGWART; NOURBAKHS; SCARAMUZZA, 2011).

O principal problema a ser resolvido em um robô móvel é gerar trajetórias e guiar seu movimento segundo estas, com base na informação proveniente do sistema de sensores externos (ultrassom, LASER, visão), permitindo ao veículo mover-se entre os quaisquer pontos do ambiente de trabalho de maneira segura, sem colisão. Isso exige o projeto de sistemas de controle de trajetórias (posição, direção, velocidade) em diversos níveis hierárquicos, de maneira que o processamento da informação proveniente dos sensores externos assegure a maior autonomia possível. (SECCHI, 2012). Contudo existem certas incertezas associadas a esses sistemas de percepção, e elas pode ter as seguintes causas:

- Resolução limitada.
- Reflexão, absorção e espalhamento do sinal emitido pelos sensores.

- Condições ruins para o funcionamento do sensor, como por exemplo, baixa luminosidade para a utilização de câmeras.

A seguir, explicaremos a fundamentação teórica dos sensores que serão utilizados neste no projeto do robô aspirador doméstico.

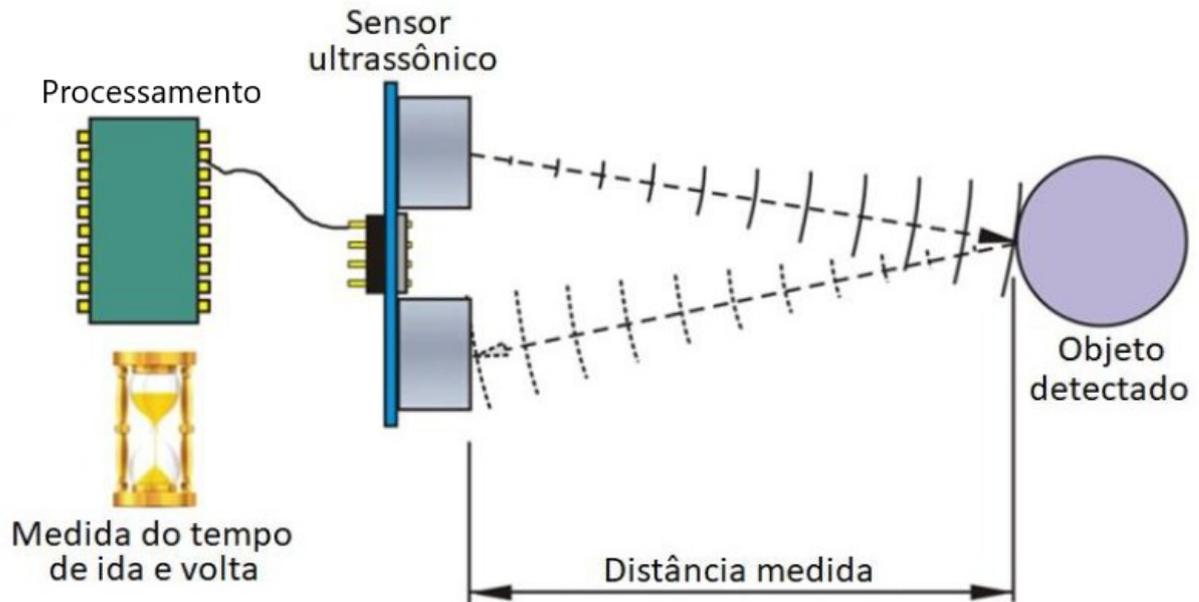
2.4.1 SENSOR ULTRASSÔNICO

Sobre o conceito físico de ultrassom: são ondas mecânicas sonoras com frequências situadas acima do limite audível para o ser humano (acima de 16 kHz). As ondas ultrassônicas são geradas por transdutores construídos a partir de materiais piezoelétricos (materiais que apresentam a propriedade de sofrer uma deformação mecânica numa certa direção quando aplicados uma tensão elétrica em sua superfície). O ultrassom, em geral, consegue se propagar em fluidos e sólidos e apresenta diferentes velocidades de propagação para diferentes meios, sendo essa característica inerente ao processo de interação das ondas mecânicas ultrassônicas. Por exemplo, a velocidade de propagação do ultrassom no ar possui um valor que fica em torno de 351 metros por segundo (na temperatura ambiente de 33 °C). Esse valor é dependente de outras variáveis além temperatura do ambiente, como também a umidade relativa do ar e etc. (BISCEGLI, 2003).

Os sensores ultrassônicos são dispositivos eletrônicos ativos (emitem a energia ao meio e mede a reação) que podem proporcionar informação de distância entre o sensor localizado no robô e um obstáculo pertencente ao ambiente, através da medição do tempo de voo entre a excitação do transdutor e a recepção do eco da onda de ultrassom. Dessa forma, pode-se estabelecer, através de uma programação em software, uma distância máxima permitida entre o sensor posicionado no robô e um obstáculo, para assim evitar a colisão. (AMORIM et al., 2019) (BARBOSA et al., 2019). A figura 4 apresenta um esquema de funcionamento do sonar ativo ultrassônico para a medição da distância entre o sensor e um objeto.

No ambiente de operação de robôs móveis, as superfícies existentes refletem quase 100% da onda de ultrassom incidente. Um dos principais problemas do uso de ultrassom é a atenuação, pois limita o seu alcance de operação. A atenuação ocorre devido à absorção de energia da onda acústica pelo meio e implica na conversão da energia acústica em outra forma de energia, como em calor por exemplo. Outro fonte de erro do sensor ultrassônico é derivado da sua zona morta, ou seja, uma região próxima ao transdutor que corresponde a um período de tempo logo após o momento de emissão, onde o transdutor, por inércia, continua vibrando depois da excitação. Portanto, durante estes instantes, o transdutor estará inoperante (impossibilitado de detectar o eco refletido por qualquer obstáculo). (FREIRE, 1997).

Figura 4: Esquema de funcionamento do sonar ativo ultrassônico para a medição da distância entre o sensor e um objeto.



Fonte: Barbosa et al. (2019, p. 4)

2.4.2 SENSOR INFRAVERMELHO REFLETIVO

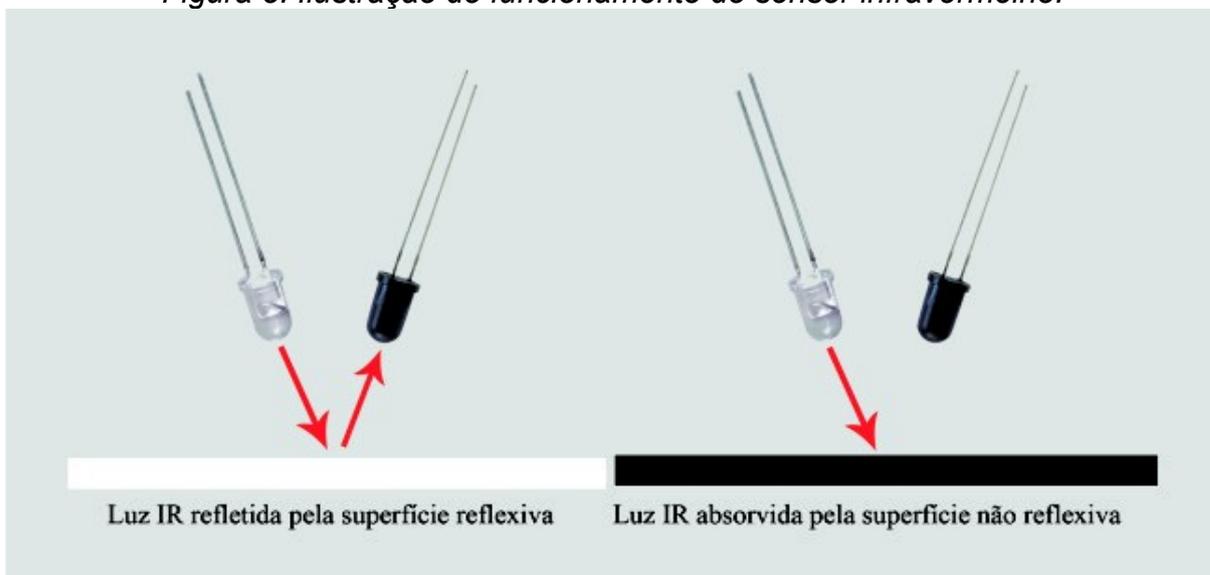
A luz infravermelha (abreviada como IV em português ou IR do inglês *infrared*) pode ser definida como uma radiação eletromagnética invisível diretamente aos olhos humanos, e é caracterizada por comprimentos de onda que ficam entre 730 nm e 1 mm. Pelo ponto de vista de frequência da onda, a radiação infravermelha está na faixa de $800 \cdot 10^9$ Hz e $300 \cdot 10^{12}$ Hz. (LEITE; PRADO, 2012).

Um sensor infravermelho refletivo, da mesma forma como o sensor ultrassônico, é um dispositivo eletrônico ativo que também pode perceber informações de presença e de distância até objetos. Como sendo um sensor ativo, a detecção da presença se faz na emissão e recepção de um sinal de luz infravermelha. Uma vantagem do sensor IV sobre o sensor ultrassônico é o tempo de voo do sinal, pois a velocidade da luz (299.792.458 m/s no vácuo) é muito maior que a velocidade do som. Esses sensores de IV (infravermelho) refletivos de luz possuem módulos pares de emissor de infravermelho e receptor (fototransistor) que são adequados para aplicações que requerem detecção de mudanças na refletividade. Essa mudança na refletividade pode ser devido a uma mudança de cor em uma distância fixa, como ao detectar uma linha preta em um fundo branco, bem como devido a uma mudança na distância ou na presença de um objeto na frente do sensor. (PINTO; MAZZOCCANTE; DA SILVA, 2015)

Pensando na aplicação neste trabalho, existe a possibilidade do robô alcançar um desnível descendente, ou seja, uma decida em degrau no ambiente é um problema, pois fatalmente ocasionará em uma queda do robô, avariando-se. Lembro ao leitor que o robô está restrito a mover-se em superfícies horizontais e secas. Esse problema será considerado no projeto e o robô deverá perceber esse desnível e evitá-lo. Pretende-se a utilização de um sensor de infravermelho de reflexão direcionado ao piso e posicionado em um ponto na extrema frontal do robô. No caso do robô a ser desenvolvido, uma mudança brusca na distância entre o sensor e o chão indicará um desnível a ser evitado.

Uma situação existente que pode prejudicar a utilização deste sensor é que a superfície do chão pode ser de material não refletivo, e isso pode confundir o sensor, de modo a detectar falsos desníveis. Uma ilustração desse caso e também do funcionamento do sensor está apresentada na figura 5.

Figura 5: Ilustração do funcionamento do sensor infravermelho.



Fonte: Retirado de <https://www.daeletrica.com.br/blog/2018/10/03/sensor-seguidor-de-linha/> - Acessado em 16/10/2021 as 16:29.

2.5 MICROCONTROLADORES

Um microcontrolador é um circuito eletrônico integrado que contém um computador inteiro embutido em um mesmo *chip*. Dentro de um microcontrolador tem-se os componentes básicos de uma arquitetura de computadores, como a unidade central de processamento (*CPU*, do inglês *Central Processing Unit*), as memórias *RAM* (*Randon Acess Memory*) ou “memória de acesso aleatório” em

português, as memórias *ROM* (*Read-Only Memory*) ou “memória de apenas leitura” em português, a memória *flash*, as interfaces de entrada e saída, temporizadores, conversores de sinais analógico/digitais (A/D) e digitais/analógicos (D/A) entre outros periféricos. Os microcontroladores são projetados para uso em aplicações embarcadas, ou seja, para aplicação em um sistema específico e dedicado, por serem geralmente de baixo custo. Com o auxílio de um *software* como ambiente para desenvolvimento integrado (IDE), é possível desenvolver programas (algoritmos codificados) para embarcar nas memórias do microcontrolador e então controlar os periféricos e dispositivos externos à plataforma. Em sistemas embarcados para automação como deste TCC, os microcontroladores são os responsáveis por receber as leituras dos sinais dos sensores existentes, processar esses dados realizando cálculos e ações programadas, e então enviar os comandos desejados aos atuadores. (STRIPPOLI; SERNAGLIA; EMMANUEL, 2020).

2.6 MOTOR DC

O motor de corrente contínua, também conhecido como motor “CC” ou motor “DC” (do inglês *direct current*), é uma máquina capaz de converter a energia elétrica em energia mecânica rotacional utilizando uma corrente elétrica contínua na sua entrada, que pode ser proveniente de uma bateria por exemplo. O motor DC tem o princípio básico de operação explicado pela interação entre campos eletromagnéticos. A estrutura básica de um motor DC convencional tem partes fisicamente distintas que são associadas circuitos elétricos de funções específicas: o rotor, anel comutador e o estator. Ambos o rotor e estator são constituídos de materiais ferromagnéticos envolvidos em enrolamentos de armadura e de campo respectivamente. (BIM, 2012).

- O rotor é a parte que se movimenta rotacionalmente no eixo do motor.
- O anel comutador é o responsável por realizar a inversão do sentido das correntes que circulam no enrolamento de armadura.
- O estator é a parte imóvel do motor que é montada em volta do rotor.

Em robótica móvel, quando o motor é utilizado para realizar a atuação de movimento do robô, a sua carga geralmente é uma roda, como já explanado na seção de morfologia de robôs móveis. Durante a utilização de rodas motorizadas em robótica móvel, faz-se necessário se atentar para algumas situações existentes que podem prejudicar e comprometer o desempenho do conjunto (motor / roda). O autor Bim (2012), cita algumas das causas de queda deste desempenho podem ser citadas como:

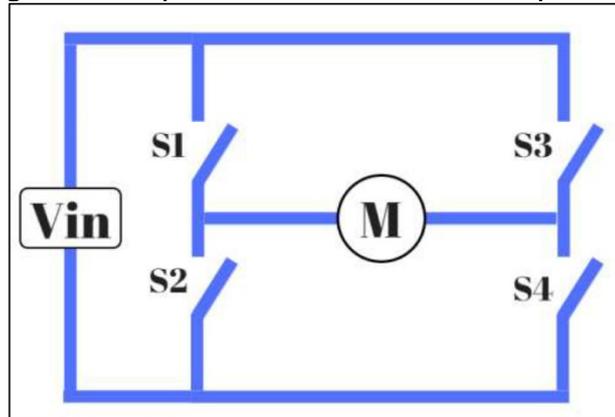
- Atrito constante ou variável do terreno como, por exemplo, em carpetes, pisos de vinil, pisos de madeira e no chão sujo).
- Deslizamento das rodas ao tentar realizar a movimentação em superfícies muito sujas. Esta causa contribui ao fato atual, de que um robô aspirador muitas vezes não é capaz de realizar a limpeza em situações onde a sujeira do chão é muito grave. Ressalta-se novamente que o robô aspirador serve apenas como uma forma de auxiliar na limpeza do chão. Porém, entende-se que a regularidade na atividade do robô pode ajudar a evitar situações graves nesse sentido.
- Quando o nível de energia disponível na bateria mostra-se insuficiente para o bom funcionamento do motor, pois logicamente a bateria vai sendo descarregada durante a tarefa. Por isso, faz-se necessário realizar um monitoramento deste nível de energia, para que então o usuário possa pausar as atividades do robô e recarregar a sua bateria.
- Velocidade de rotação das rodas muito altas também podem causar derrapagem em curvas.

2.7 PONTE H

Um motor DC trabalha a partir princípio básico de aplicação de uma corrente elétrica em seus dois terminais, para que dessa forma, o seu rotor gire em um determinado sentido. Para que o mesmo motor DC gire no sentido inverso ao anterior, faz-se necessário inverter o sentido da corrente elétrica em seus terminais. Dessa forma, a ponte “h” é um circuito de interface que trabalha com esse controle de sentido da rotação do motor DC. O termo “ponte h” é derivado da representação gráfica típica desse circuito.

A ponte h consiste em um circuito eletrônico que permite a inversão do sentido da corrente elétrica contínua que flui através de uma carga a partir de uma ponte fixa. As chaves eletrônicas utilizadas são geralmente os transistores *MOSFET* (acrônimo em inglês de *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*, ou transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor – *TECMOS*), pois são controlados por tensão. A ponte h aliado ao um sistema de controle por *PWM* (do inglês “*Pulse Width Modulation*” ou do português “Modulação por largura de pulso”) também facilita o controle de velocidade do motor DC quando existe a inversão de suas polaridades. (NETO, 2017). A figura 6 apresenta um esquema base do circuito de ponte h.

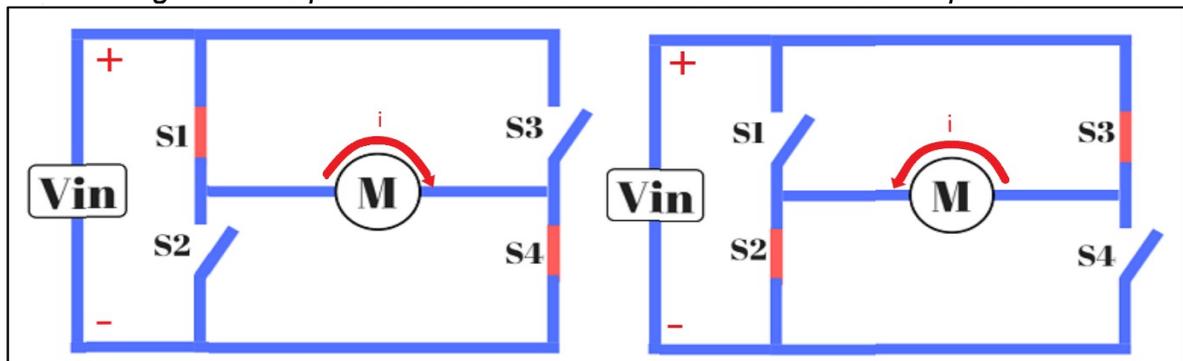
Figura 6: Esquema base do circuito de ponte h.



Fonte: Retirado de Neto (2017, p. 24)

As chaves eletrônicas S1, S2, S3 e S4, são fechadas e abertas de formas convenientes para controlar o sentido da corrente elétrica que atravessa a carga, que nesse caso da figura 6, é um motor DC “M”. Na figura 6 todas as quatro chaves estão abertas, ou seja, sem conduzir corrente elétrica, o motor encontra-se parado. A corrente elétrica é fornecida por uma tensão contínua “Vin”. A partir do momento em que um par conveniente de chaves é fechado, o motor é acionado e uma corrente elétrica “i” o atravessa e o motor gira no mesmo sentido da corrente “i”. A figura 7 mostra um esquema desse funcionamento do circuito base da ponte h para o giro de um motor DC.

Figura 7: Esquema de funcionamento do circuito base da ponte h.



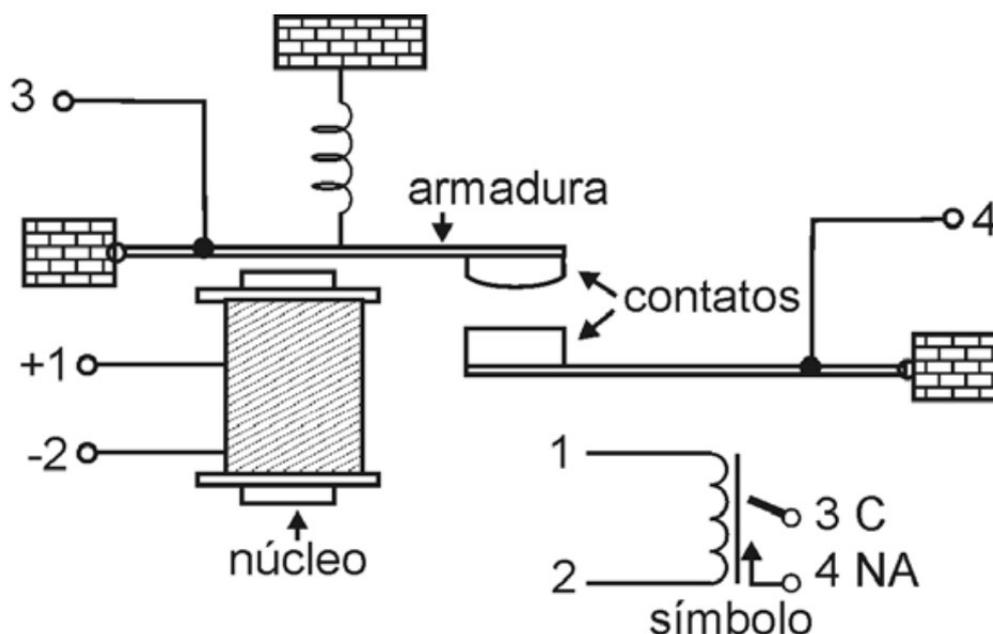
Fonte: Adaptado de Neto (2017, p. 25).

A combinação de acionamento das chaves deve ser feita de forma ‘cruzada’ para permitir que a corrente seja forçada a percorrer o motor, pois caso contrário o motor não entra em funcionamento, além inclusive de evitar um curto circuito com a fonte de acionamento “Vin” do motor. Para o motor girar em sentido horário (Figura 7 circuito à esquerda), deve-se fechar as chaves S1 e S4, e para o motor girar em sentido anti-horário (figura 7 circuito à direita), deve-se fechar as chaves S2 e S3.

2.8 RELÉ

Para a atuação do motor de sucção, faz-se necessário a utilização de um circuito capaz de realizar o controle de caráter *ON/OFF*, ou seja, liga e desliga de atuadores, cargas e outros dispositivos. Um circuito capaz realizar esta interface é o relé. Relés são dispositivos comutadores eletromecânicos muito semelhantes a interruptores elétricos. Pensando com base em um interruptor, um relé realiza a comutação do estado de seu contato elétrico quando há a presença de uma corrente elétrica em um terminal de controle específico que é uma bobina. Neste caso, diz-se que o relé comuta o seu estado em nível lógico alto. Diz-se que o relé comuta o seu estado em nível lógico baixo quando a corrente elétrica no terminal de controle é cessada, ou seja, a tensão é igual a 0. A figura 8 apresenta uma ilustração de uma estrutura simplificada de um relé e sua simbologia. Os terminais 1 e 2 são os terminais da bobina. Os terminais 3 e 4 correspondem aos contatos.

Figura 8: Estrutura simplificada de um relé e sua simbologia.



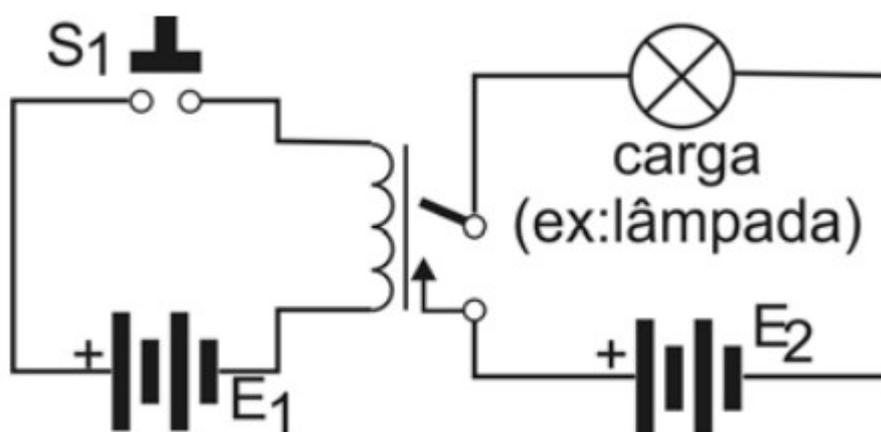
Fonte: Retirado de Braga (2012, p. 19).

Nas proximidades de um eletroímã é posicionada uma armadura móvel de metal ferroso, que tem por finalidade controlar um jogo de contatos. Quando a bobina é percorrida por uma corrente elétrica, um campo magnético é criado. O campo magnético atua sobre a armadura e provoca sua atração. Com esta atração, a armadura e conseqüentemente os contatos se movimentam, o que faz com que os contato móvel se encoste no contato fixo inferior (terminais 3 e 4 em curto circuito). Neste caso, diz-se que os contatos são “normalmente abertos” ou em inglês

“normally open (NO)”. Em uma outra situação inversa, os contatos podem ser do tipo “normalmente fechado” ou em inglês “normally closed (NC)”, e dessa forma se separam ou ‘abrem’ quando a corrente atravessa a bobina. (BRAGA, 2012)

Em uma aplicação comum do relé, usa-se os contatos normalmente abertos (NA/NO) para controlar a corrente que circula em um circuito externo, ligando e desligando (ON/OFF), conforme mostra a figura 9. No caso da figura 9, a carga acionada é uma lâmpada, mas outros dispositivos podem ser acionados também, como no caso desse TCC que é um motor DC para a sucção de poeira.

Figura 9: Circuito comum de acionamento de uma carga através do relé.



Fonte: Retirado de Braga (2012, p. 22).

Neste circuito, quando a chave S1 for fechada, uma corrente atravessa a bobina do relé. A intensidade desta corrente é determinada pela relação entre a tensão E1 de controle e a resistência da bobina. Esta corrente faz com que o relé feche seus contatos e assim uma outra corrente atravessa os contatos e a carga. Essa segunda corrente é determinada pela relação entre a tensão do gerador E2 e a impedância da carga. O importante desta configuração é que o circuito de controle que energiza o relé é completamente independente do circuito controlado em que a carga está. (BRAGA, 2012)

Estes circuitos são isolados, o que torna o relé um dispositivo ideal para aplicações que envolvem segurança. Note que a corrente e a tensão responsáveis pelo acionamento do relé na bobina podem ser totalmente diferentes da corrente e tensão do dispositivo controlado na carga. Assim, podemos por exemplo, ter uma bateria de 5 V DC (E1) controlando um relé que exige apenas 100 mA para controlar uma lâmpada alimentada pela rede de energia de 110 V AC ou 220 V AC (E2), com uma corrente que pode chegar a vários amperes. Dessa forma, cargas de alta potência, como lâmpadas, motores, solenoides e outros equipamentos, podem ser controlados por correntes muito menores vindas de sensores, circuitos integrados e

outros circuitos eletrônicos de baixa potência. Esta característica torna o relé um dispositivo importante nas aplicações que envolvem controle de potência, pois além da segurança dada pelo isolamento, temos a possibilidade de controlar grandes potências a partir de pequenos sinais. (BRAGA, 2012)

2.9 BATERIA DE ÍONS DE LÍTIO

Faz-se necessário um dispositivo portátil fornecedor de energia elétrica contínua para alimentação de todos os circuitos presentes no robô. Um dispositivo capaz de suprir essa necessidade é uma bateria de íons de lítio (Li-Ion). Uma bateria, de modo geral, é um dispositivo que converte a energia desenvolvida em uma reação química em energia elétrica. Uma bateria é composta por uma associação de células eletroquímicas, constituídas por um eletrodo positivo, denominado de cátodo, um eletrodo negativo, denominado de ânodo, que normalmente são separados por um isolador, e imersos em um eletrólito. Na bateria, ocorrem reações químicas de oxidação e redução (oxirredução), nas quais ocorre a transferência de elétrons. Esses elétrons são transportados do eletrodo negativo para o positivo por meio de um condutor externo, fechando um circuito elétrico. O resultado desse processo é a eletricidade, que pode ser aproveitada para alimentar cargas. (FERREIRA, 2021)

A bateria Li-Ion é atualmente empregada em uma vasta gama de aparelhos eletrônicos portáteis e em veículos elétricos, além de ser largamente utilizada em projetos que envolvem eletrônica embarcada, como exatamente o robô proposto nesse TCC. O aumento do uso desta bateria, ocorre devido as inúmeras vantagens proporcionadas por esse modelo. (NICOLLI, 2019). O autor Nicolli (2019) cita algumas seguintes vantagens e desvantagens no uso de baterias Li-Ion, como por exemplo:

- **Vantagens**
 - Baterias com menor peso e volume, comparado com as demais baterias para uma mesma capacidade de carga.
 - Maior densidade de energia comparada a outros tipos de bateria.
 - Possui um relativo baixo nível de autodescarga.
 - Ausência do efeito memória, ou seja, da capacidade de se 'viciar', aumentando a vida útil da bateria.
 - Tensão de circuito aberto elevada.

- **Desvantagens**

- Maior custo, comparado com as demais baterias para uma mesma capacidade de carga.
- Possui sensibilidade a temperaturas elevadas.
- Envelhecimento da vida útil independente do uso, por alterações em sua composição química.
- Apresenta pouca estabilidade térmica, ocasionando em alguns problemas de segurança, como incidentes de incêndio.
- O fato de que uma única célula de bateria Li-Ion é muitas vezes insuficiente para aplicações onde haja uma maior necessidade de potência. Faz-se necessário associações em série e/ou paralelo de mais de uma célula para atender os parâmetros de tensão, corrente e a capacidade de carga. Por isso, existe a necessidade de haver um balanceamento equilibrado de carga e tensão entre as células, para então haver um bom funcionamento da bateria, assim como também em garantir uma boa durabilidade de cada célula individualmente. Por esse motivo, as baterias Li-Ion necessitam de uma placa com circuitos de proteção e gerenciamento de carga denominada de placa *BMS (Battery Management System)*.

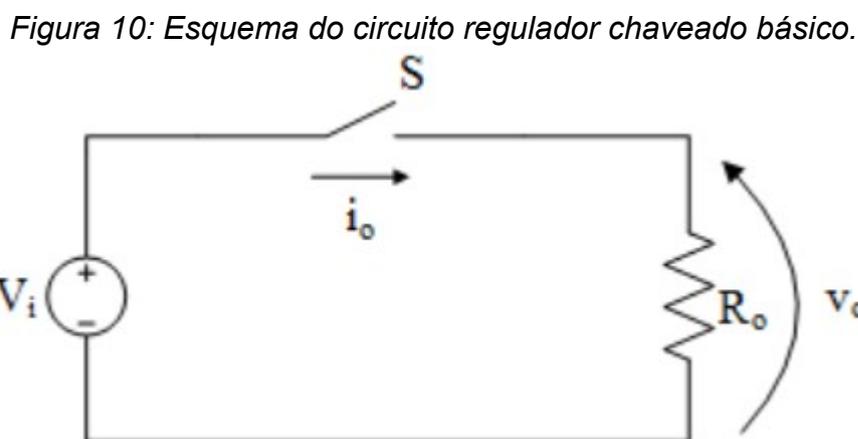
2.10 REGULADOR DE TENSÃO CHAVEADO DC-DC TIPO *BUCK*

A energia elétrica que provem de uma fonte, como uma bateria por exemplo, necessita de certos tratamentos antes de alimentar os diversos circuitos de controle, sensoriamento e atuação. Em muitos casos, a quantidade de tensão necessária para alimentar os diferentes circuitos são diferentes e, por isso, a tensão constante de saída da bateria precisa ser convertida, regulada e estabilizada. Por exemplo, 5 V podem ser obtidos a partir de uma fonte de 12 V via um conversor DC. Um circuito capaz de realizar esse trabalho é um regulador de tensão, também chamado de conversor de tensão. No caso dos circuitos deste TCC, todas tensões utilizadas são de característica DC, e dessa forma o regulador terá tensões DC tanto na entrada quanto na saída. Um regulador do tipo *buck* diminuirá a amplitude da tensão de entrada e estabilizará esta tensão menor na saída. (HART, 2016)

Podemos citar dois métodos para diminuir esta tensão. O primeiro método é utilizando reguladores lineares e o segundo método é utilizando reguladores chaveados. O primeiro método é bastante simples e utiliza transistores bipolares trabalhando em suas faixas lineares, ou seja, evita-se as regiões de corte e

saturação. O funcionamento deste regulador se assemelha ao de um resistor variável conectado em série com a carga na saída, e desta forma a tensão de entrada é dividida entre o resistor e a carga. Porém, essa técnica apresenta um baixo rendimento de potência, pois desperdiça a energia dissipada em forma de calor no resistor variável. Esse desperdício de potência aumenta conforme a diferença entre as tensões de entrada e saída aumenta. Além disso, esse desperdício diminuiria significativamente a duração e conseqüentemente o tempo de vida da bateria. (HART, 2016)

No caso do regulador chaveado, o circuito utiliza uma chave eletrônica (que na prática é tipicamente um *MOSFET*) que abre e fecha periodicamente. A figura 10 apresenta um esquema deste circuito chaveado básico.



Fonte: Retirado de Barbi (2011, p. 2)

Sendo assim, a tensão de saída V_o será igual à de entrada nos momentos em que a chave estiver fechada e igual a zero quando estiver aberta. Considera-se então que, neste caso, a tensão de saída total será o valor médio das tensões. Percebe-se então que a tensão média de saída se aproximará do valor de entrada quando mais tempo a chave permanecer fechada durante o ciclo. (BARBI; MARTINS, 2011)

Fazendo a análise de eficiência, verifica-se que, na prática ainda existirá uma perda de potência mínima na chave eletrônica (por não ser ideal), mas, ainda assim, o segundo método utilizando reguladores chaveados torna-se uma alternativa mais interessante que os reguladores lineares, pois aumenta este rendimento de potência para acima de 90%. (BARBI; MARTINS, 2011)

2.11 MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva se caracteriza pelo emprego de equipamentos capazes de fabricar objetos por meio da adição de material, camada por camada, a partir de um modelo digital tridimensional (3D), usualmente obtido por meio do emprego de um sistema CAD (*Computer Aided Design*). Assim, tem-se o conceito de produção por adição de material em contraste à produção por métodos convencionais, em que a peça é obtida pela retirada de material, como na usinagem.

A norma *ASTM (American Society for Testing and Materials 2012)* define manufatura aditiva como o “processo de construção de objetos tridimensionais sólidos a partir da deposição de camadas, sendo oposta à manufatura subtrativa”. Os autores (GIBSON et al., 2021) definiram oito etapas necessárias, em geral, para a produção utilizando a manufatura aditiva:

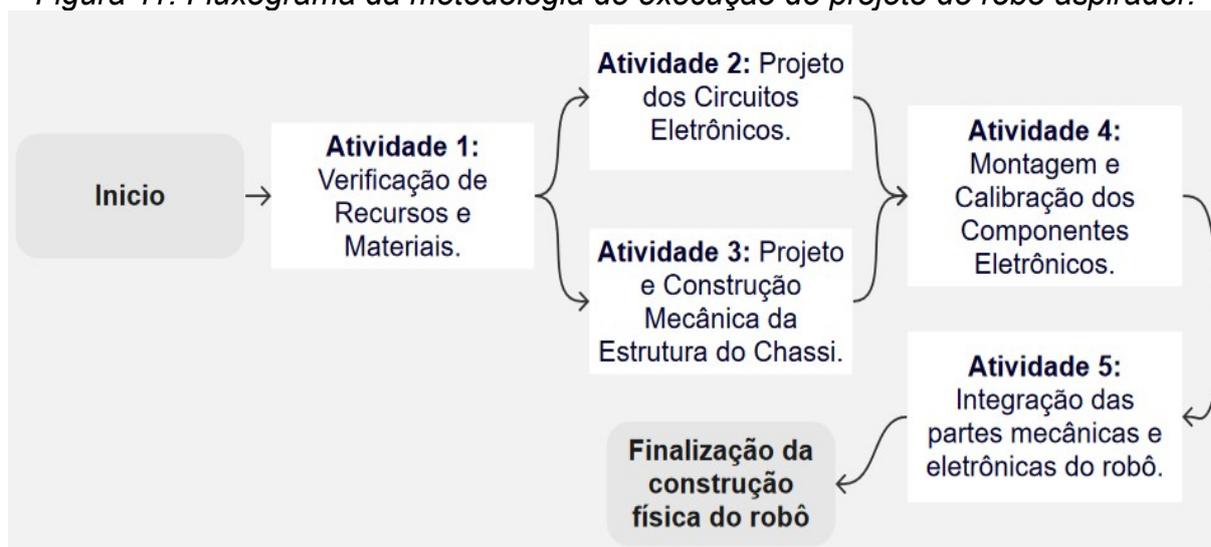
- **CAD (*Computer-aided design*):** toda peça a ser produzida por manufatura aditiva deve ter sua geometria definida por um modelo numérico (*software*). Para tanto, pode-se empregar praticamente qualquer *software* profissional de CAD ou *softwares* e equipamentos de engenharia reversa (*reverse engineering*), como *scanners*.
- **Conversão para *STL*:** o formato aceito em praticamente todos os equipamentos de manufatura aditiva é o *STL (surface tessellation language)*, que é o padrão da indústria no momento.
- **Transferência para a máquina de manufatura aditiva e manipulação do arquivo:** o arquivo representando a peça deve ser transferido para o equipamento em que será produzida. Eventuais manipulações para corrigir o posicionamento, tamanho ou orientação da peça no arquivo podem ser necessárias.
- **Configurar a máquina:** pode ser necessário definir alguns parâmetros na máquina, como a espessura das camadas, o padrão de preenchimento das camadas, a temperatura de extrusão do material e etc.
- **Produção:** a produção por manufatura aditiva é automatizada, com baixa necessidade de supervisão humana direta; esta serve para garantir o suprimento de materiais, a descarga da máquina e para prevenir/atuar em eventuais problemas.
- **Remoção:** após o fim da produção, a peça deve ser retirada da máquina.
- **Pós-processamento:** após a produção, podem ser requeridas atividades adicionais, como a retirada de estruturas de suporte e limpeza. Tratamentos adicionais podem ser necessários para garantir qualidades estéticas à peça, como pintura e tratamentos de superfícies, ou as características físicas desejadas, como resistência e dureza.
- **Aplicação:** a peça está pronta para ser usada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são expostas as metodologias e os materiais utilizados durante o projeto, a construção e os testes do robô aspirador. Podemos separar cada parte dos métodos em atividades, de forma a corresponder a cada um dos objetivos específicos listados no capítulo de introdução. Porém, devemos lembrar inicialmente do objetivo geral: “Modelar e desenvolver um protótipo de um robô móvel, de topologia de uniciclo e tração diferencial, para ser destinado a aspirar poeira do chão de ambientes domésticos. Busca-se um protótipo funcional, de baixo custo e com um determinado nível de autonomia.”

A figura 11 apresenta um fluxograma da metodologia de planejamento e execução cronológica do projeto do robô aspirador. Cada atividade foi definida com base em cada objetivo específico elencado na introdução.

Figura 11: Fluxograma da metodologia de execução do projeto do robô aspirador.



Fonte: Autor, 2021.

Conforme verifica-se no fluxograma da figura 11, definiu-se que as atividades 2 e 3 poderiam ser feitas simultaneamente, pois nos momentos em que os recursos e materiais eletrônicos irão sendo selecionados de acordo com os requisitos, os circuitos eletrônicos já podem ser projetados e simulados. A seguir está uma explicação de cada uma das atividades em ordem cronológica de execução:

3.1 ATIVIDADE 1: VERIFICAÇÃO DE RECURSOS E MATERIAIS.

Inicialmente foi realizado um estudo dos requisitos dos sistemas do robô. Dessa forma foi possível verificar a disponibilidade e selecionar os equipamentos mecânicos e eletrônicos. A seleção do material de construção mecânica do chassi do robô está explanada na seção 3.1.1 seguinte.

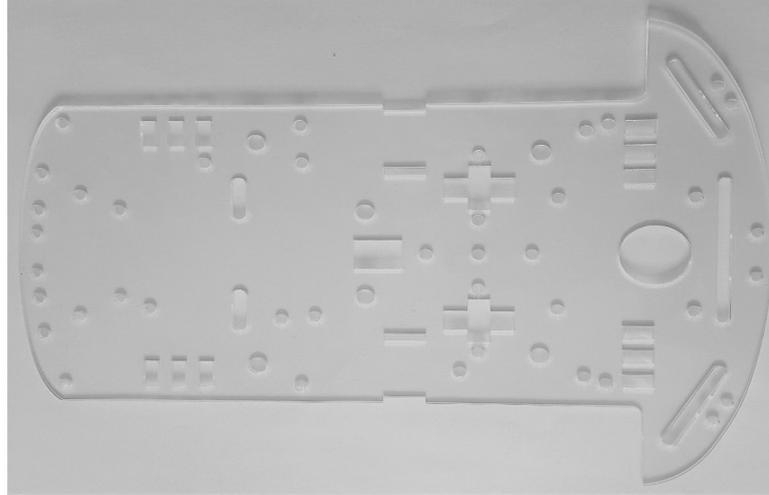
3.1.1 CHASSI DE ROBÔ 2WD

Pensando em um robô que manobrará e aspirará o chão por ambientes semiestruturados e, em algumas situações, em condições bastante limitadas de espaço, buscou-se uma estrutura mecânica compacta que possibilitasse o alcance dessas regiões. Foi realizado uma verificação das dimensões mecânicas e peso dos componentes e materiais, no intuito de otimizar o uso do espaço e minimizar o peso resultante do robô.

Para funcionar como a base estrutural mecânica de robô aspirador, utilizou-se de um modelo comercial comum de um kit de chassi para veículo de duas rodas (2WD – *Two Wheel Drive*). Este kit é bastante comum no mercado, de forma a possibilitar várias aplicações de robótica em ambientes educacionais e domésticos. Com este modelo adquirido no mercado, realizou-se a montagem dos seus componentes e se alcançou então a morfologia de uniciclo para o robô. Neste modelo, inclui-se os componentes:

- Uma chapa plataforma com furos passantes. Furos com a finalidade de realizar acoplamento das outras partes mecânicas e eletrônicas, como o rodízio, motores e sensores, assim também como a passagem do cabeamento eletrônico. A figura 12 apresenta uma foto da chapa plataforma de acrílico.
 - **Dimensões:** 212 mm de comprimento máximo, 160 mm de largura máxima e de 2 mm de espessura.
 - **Material:** Acrílico.

Figura 12: Foto da chapa base de acrílico.



Fonte: Autor, 2021.

- Duas rodas de tração independente com pneus. A figura 13 apresenta uma foto das rodas de tração.
 - **Dimensões:** de 68 mm de diâmetro e 26 mm de largura.
 - **Material do suporte da roda:** polietileno em cor amarela.
 - **Material do pneu:** borracha em cor preta para aumentar a aderência e evitar o deslizamento na tração.
 - **Massa aproximada:** 42 g.

Figura 13: Foto das rodas de tração independente com pneus.



Fonte: Autor, 2021.

- Uma roda castor com suporte de aço. A figura 14 apresenta uma foto da vista inferior da roda enquanto que a figura 15 apresenta a vista lateral esquerda.
- **Dimensões:** 34 mm de altura do conjunto roda/suporte, 25 mm de diâmetro da roda e 14 mm de largura da roda.
- **Material do corpo e suporte da roda:** Aço.
- **Material do pneu:** Nylon.
- **Massa aproximada:** 32 g.

Figura 14: Foto da vista inferior da roda castor.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 15: Foto da vista lateral esquerda da roda castor.



Fonte: Autor, 2021.

- Dois motores DC com caixa de redução e eixo duplo. A figura 16 apresenta uma foto dos motores DC.
- **Faixa da tensão de operação:** de 3 a 6 V.
- **Redução:** 48:1

- **Corrente máxima sem carga:** 200 mA para 6 V e 150 mA para 3 V.
- **Velocidade angular aproximada do eixo sem carga:** 200 RPM ($\approx 20,944$ rad/s) para 6 V e 90 RPM ($\approx 9,425$ rad/s) para 3 V.
- **Torque:** $34,324 \cdot 10^{-3}$ Nm para 3 V e $78,450 \cdot 10^{-3}$ Nm para 6 V.
- **Massa aproximada:** 29 g.
- **Dimensões máximas:** 70 mm de comprimento, 23 mm de largura e 37 mm de altura.

Figura 16: Foto do motor DC com caixa de redução e eixo duplo.



Fonte: Autor, 2021.

- Quatro fixadores de acrílico utilizados como junção entre o conjunto motor/roda e a chapa plataforma. A figura 17 apresenta uma foto de um destes fixadores.

Figura 17: Foto do fixador de acrílico.



Fonte: Autor, 2021.

- Um conjunto de parafusos, porcas e extensões para a junção e fixação mecânica das partes do chassi, motor e rodas. Estes parafusos e porcos são também utilizados para a fixação das peças manufaturadas aditivamente.

3.1.2 SENSORES

Esta seção diz respeito a seleção dos sensores de acordo com suas qualidades e particularidades, visando atender os requisitos, bem como a quantidade necessária e disponível de cada um.

3.1.2.1 Sensor ultrassônico HC-SR04

O módulo de sensor ultrassônico HC-SR04 foi utilizado para detectar obstáculos presentes no ambiente durante o deslocamento do robô. O módulo inclui emissores e receptores de ultrassom e um circuito de controle. A figura 18 apresenta uma foto do módulo HC-SR04 mostrando os quatro pinos elétricos: *VCC*, *Trigger*, *Echo* e *GND*. Um resumo das características elétricas e de funcionamento está expressado na tabela 1. Neste projeto foi utilizado uma unidade do HC-SR04 posicionado na parte frontal do robô.

Figura 18: Foto do módulo sensor ultrassônico HC-SR04.



Fonte: Autor, 2021.

A sigla *TTL* (acrônimo em inglês para *Transistor-Transistor Logic*) significa que os circuitos digitais foram construídos utilizando transistores de junção bipolar (TBJ) e resistores, ou seja, trabalha com uma lógica entre transistores. Os circuitos *TTL* constituem uma “família” ou “classe” muito utilizada e difundida na confecção e utilização de circuitos digitais e integrados. A designação *TTL* é às vezes usada para se referir à níveis lógicos compatíveis com *TTL*, mesmo quando não está associada diretamente com essa classe de circuitos integrados, sendo usada, por exemplo, como um rótulo nas entradas e saídas de instrumentos e circuitos eletrônicos.

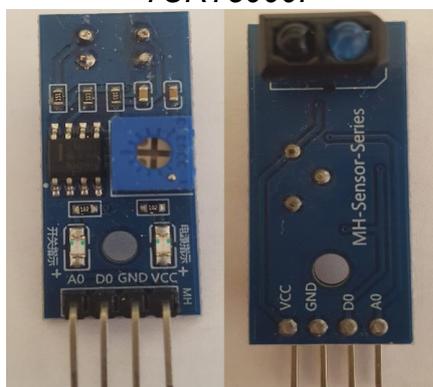
Tabela 1: Parâmetros de funcionamento do HC-SR04. Fonte: Retirado do datasheet, 2021.

Parâmetro	Valor ou definição
Tensão de operação	5 V DC no pino VCC e 0 V no pino GND
Corrente de operação	15 mA
Frequência de operação	40 Hz
Faixa de detecção	2 cm até 4 m
Faixa de precisão	3 mm
Ângulo de abertura de detecção	15 graus
Tipo de conexão	Conector macho de 4 pinos: VCC, Trigger, Echo e GND
Sinal de entrada Trigger	10 μ s pulso TTL
Sinal de saída Echo	Sinal de entrada de nível TTL e a faixa em proporção
Dimensões físicas aproximadas	45 mm x 20 mm x 15 mm

3.1.2.2 Sensor óptico refletivo TCRT5000

O TCRT5000 é um sensor refletivo que inclui um diodo emissor de luz infravermelho e um fototransistor integrado em um encapsulamento que bloqueia a luz visível. Este sensor foi utilizado para detectar os degraus e desníveis a serem evitados pelo robô. O módulo possui um ajuste de alcance de detecção através de um *trimpot* presente no módulo. O *Trimpot* (do inglês *Trimmer Potentiometer*) é um resistor ajustável que se diferencia do potenciômetro comum por oferecer ajustes mais precisos de resistência e possuir maior robustez a impedir que vibrações modifiquem sua resistência. A figura 19 apresenta duas fotos do módulo TCRT5000, a vista frontal à esquerda e a vista posterior à direita.

Figura 19: Fotos da vista frontal (à esquerda) e posterior (à direita) do módulo TCRT5000.



Fonte: Autor, 2021.

A tabela 2 apresenta um resumo de alguns parâmetros de funcionamento pertinentes do módulo TCRT5000. O módulo necessita ser instalado de tal forma

que os elementos sensores (diodo emissor e fototransistor) estejam posicionados na extremidade frontal e apontados para o chão, para que assim possam detectar os desníveis a serem evitados.

Este módulo apresenta a possibilidade do fornecimento do sinal de detecção tanto de forma analógica (pino “A0”) quanto de forma digital (pino D0). Dessa forma, o pino digital fornece um sinal lógico alto quando a distância detectada estiver em alcance. O pino analógico fornece um sinal que vai variando sua tensão numa faixa de 0 a 5 V, podendo ser codificada em 8 bits para o processamento, ou seja, um número que varia de 0 a 255.

Tabela 2: Parâmetros de funcionamento do módulo TCRT5000. Fonte: Retirado do datasheet, 2021.

Parâmetro	Valor ou Definição
Dimensões aproximadas da placa	14 x 32 mm
Faixa de tensão de trabalho	3,3 ~ 5 V
Faixa de consumo de corrente	10 ~ 20 mA
Faixa de temperatura de trabalho	0 ~ 50 °C
Tipo de saída	Digital do tipo <i>TTL</i> com 3,3 / 5 V DC
Tipo de conexão	Conector macho de 4 pinos: saída A0, saída D0, GND e VCC
Faixa de detecção de reflexão	1 ~ 25 mm

3.1.3 PLATAFORMAS DE PROCESSAMENTO E CONTROLE

Esta seção diz respeito a seleção de uma plataforma de controle capaz de processar todos os sinais provenientes dos sensores e enviar os comandos de ação a todos os atuadores, assim como também os circuitos de interface de atuação.

3.1.3.1 Arduino UNO R3

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto tanto em *hardware* quanto em *software*. O Arduino foi selecionado pois, além de sua facilidade de programar e implementar o *hardware*, ele possui um baixo custo de prototipagem, também apresenta facilidade de se integrar com outros dispositivos e componentes eletrônicos, como também possui um grande número de códigos e bibliotecas disponíveis e livres para o acesso da comunidade desenvolvedora.

O modelo comercial Arduino UNO REV3 é uma placa eletrônica que inclui o microcontrolador de 8 bits AVR ATmega328p da empresa ATMEL. Este microcontrolador fornece para o Arduino 14 pinos de entrada e saída digitais (denominados com uma numeração de “0” até “13”), dos quais 6 dos pinos podem

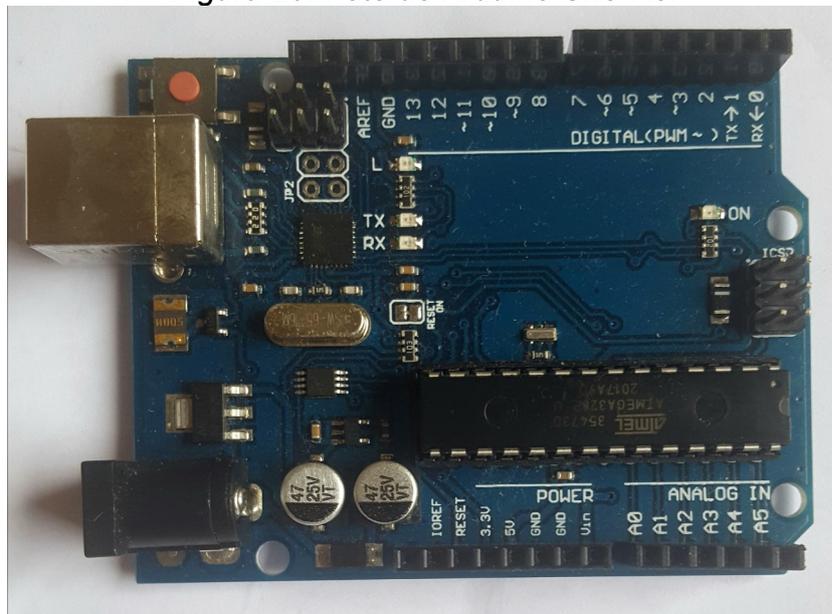
ser usados como saída de *PWM*. Os pinos que podem ser usados como *PWM* apresentam o sinal “~” na placa e são eles: pinos “3” “5” “6” “9” “10” e “11”. A placa Arduino UNO também possui 6 entradas de sinal analógico (denominadas de “An”, onde o N varia sua numeração de 0 até 5). Quando alimentado pela alimentação externa, o polo positivo da tensão de alimentação estará no pino “Vin”. A placa ainda possui dois pinos que fornecem 3,3 e 5 volts, seja quando alimentados externamente ou pelo cabo *USB*. A figura 20 apresenta uma foto do Arduino UNO R3. A tabela 3 apresenta um resumo das especificações técnicas básicas do microcontrolador de 8 bits ATmega328p.

Tabela 3: Especificações básicas do microcontrolador ATmega328p. Fonte: Retirado do site oficial do fabricante:

<https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328P>

Especificação	Valor ou Definição
Tipo e tamanho da memória de programa	32 kB de memória ISP flash
Velocidade da CPU	20 MIPS (Milhões de instruções por segundo)
Capacidade da <i>SRAM</i> (RAM do tipo estático)	2 kB
Capacidade da <i>EEPROM</i> (ROM apagável eletricamente)	1 kB
Faixa da Temperatura de Operação	-40 até 80 °C
Faixa da Tensão de Operação	1,8 até 5,5 V

Figura 20: Foto do Arduino Uno R3.



Fonte: Autor, 2021.

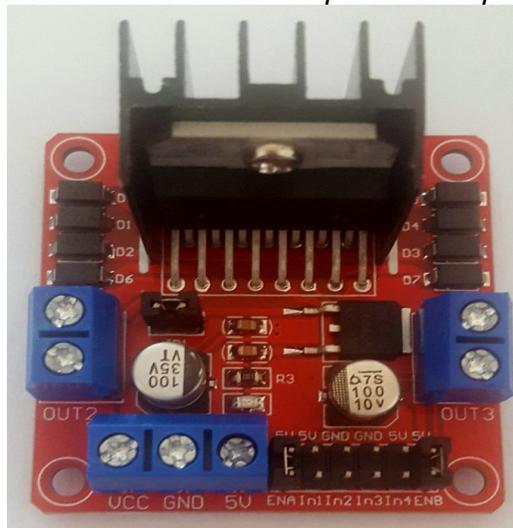
3.1.3.2 Ponte H L298n

O módulo de ponte h L298n possui a capacidade de controlar dois motores DC de forma independente em cada um de dois canais. A tabela 4 apresenta um resumo das especificações do módulo L298n. A figura 21 apresenta uma foto do módulo L298n onde é possível identificar sua pinagem elétrica. Na figura pode-se identificar e separar os terminais elétricos de alimentação do módulo e os terminais de controle dos motores.

Tabela 4: Especificações técnicas do módulo L298n. Fonte: Retirado do datasheet, 2021.

Especificação	Valor ou Definição
Faixa de Tensão DC de Alimentação no pino VCC	2,5 ~ 46 V
Faixa de tensão de alimentação lógica no pino de 5 V	4,5 ~ 7 V
Corrente de pico máxima DC fornecida para cada canal	2 A
Faixa de corrente DC de pico na saída	1,5 ~ 2A
Faixa de tensão DC nos terminais de controle	-0,32 ~ 1,5 V (nível lógico baixo) 2,3 ~ Vss (nível lógico alto)
Corrente máxima nos terminais de controle	100 μ A
Tipo de conexão	Compatível com TTL
Dimensões máximas da placa	43 x 44 x 21 mm

Figura 21: Foto do módulo de ponte H dupla L298n.



Fonte: Autor, 2021.

As conexões dos motores (nas laterais em cor azul na figura 21) estão nos pinos “OUT1” e “OUT2” para o motor “A” à esquerda e nos pinos “OUT3” e “OUT4” para o motor B à direita. As entradas de controle (na parte inferior em cor preta a

figura 21) “IN1” e “IN2” são para o motor “A” conectado à esquerda. As entradas de controle “IN3” e “IN4” são para o motor “B” conectado à direita. As conexões de alimentação do módulo é realizada pelos terminais em cor azul na parte inferior (VCC, GND e 5 V). A alimentação do módulo será realizada pela bateria externa nos pinos VCC e GND. O pino 5 V é utilizado quando a alimentação da ponte H é realizada pelo pino de 5 V do Arduino, e neste caso, faz-se necessário retirar o *jumper* “JP1” do módulo.

3.1.3.3 Módulo relé

Para o acionamento do motor de sucção, foi utilizado o modelo de relé JQC-3FF-S-Z. Este módulo já possui um circuito próprio para uma fácil aplicação direta. Um resumo dos dados técnicos deste modelo está apresentado na tabela 5. A figura 22 apresenta uma foto do módulo relé utilizado. Este relé atua utilizando o nível lógico baixo (0 V) no pino de entrada de controle “in” para o sinal de acionamento de comutação. Este sinal de acionamento é originário da plataforma de controle Arduino.

Figura 22: Foto do módulo relé JQC-3FF-S-Z.



Fonte: Autor, 2021.

3.1.4 EQUIPAMENTOS DE FORNECIMENTO E TRATAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA

Esta seção diz respeito aos equipamentos responsáveis a fornecer e condicionar a energia elétrica necessária para o bom funcionamento do robô aspirador. Estes equipamentos incluem a bateria Li-Ion, o carregador da bateria e os circuitos reguladores de tensão.

3.1.4.1 Bateria recarregável de íons de lítio

Faz-se necessário uma unidade portátil fornecedora de energia elétrica contínua para alimentação de todos os circuitos presentes no robô. Para isso, foi selecionada uma bateria recarregável de íons de lítio (Li-Ion) que forneça 12 V DC e possua uma capacidade de carga de alguns milhares de miliamperes-hora. A bateria utilizada possui um conjunto de seis células idênticas entre si de modelo UR18650A de marca da empresa Sanyo (Panasonic). A bateria utilizada possui uma placa *BMS* (*Battery Management System*). A tabela 5 possui um resumo das especificações da bateria e seu carregador. A figura 23 apresenta uma foto da bateria utilizada e a figura 24 apresenta uma foto do carregador dessa bateria.

Tabela 5: Resumo das especificações da bateria. Fonte: Retirado do datasheet, 2021.

Especificação	Valor
Tensão nominal	12 V DC
Capacidade de carga	4400 mAh
Corrente máxima no carregador	1 A
Faixa de tensão de entrada no carregador	90 a 240 V AC
Tensão nominal de uma célula	3,6 V DC
Dimensões da bateria	65 x 54 x 36 mm

Figura 23: Foto da bateria Li-Ion de 12 V e 4400 mAh.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 24: Foto do carregador da bateria.



Fonte: Retirado do site do vendedor:
<https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1734192645> Acessado em
15/07/2021 as 16:20

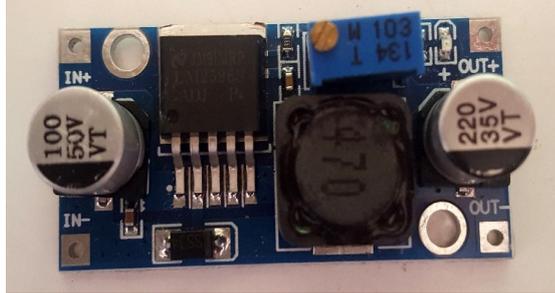
3.1.4.2 Módulo regulador de tensão DC-DC tipo buck

Como fundamentado teoricamente na seção 2.9, utilizou-se um módulo regulador de tensão para a diminuição e estabilização da tensão e da corrente proveniente da bateria. O modelo do regulador de tensão utilizado é denominado de LM2596. Como a bateria possui uma tensão nominal de 12 V, então esta é a tensão de entrada deste módulo. A tensão de saída do módulo foi regulada para 5 V para a alimentação dos módulos sensores, ponte h e o módulo relé. A tabela 6 apresenta um resumo das especificações deste módulo. A figura 25 apresenta uma foto do módulo regulador de tensão LM2596.

Tabela 6: Resumo das especificações do módulo LM2596. Fonte: Retirado do datasheet, 2021.

Especificação	Valor ou Definição
Faixa admissível da tensão de entrada	3,2 – 40 V DC
Faixa admissível da tensão de saída	1,5 – 35 V. (Tensão ajustável via trimpot)
Corrente fornecida na saída	2 A (nominal) e 3A (máxima).
Eficiência de conversão	Até 92%. Quanto mais a tensão de saída se aproxima da tensão de entrada, maior será esta eficiência.
Diferença mínima entre as tensões de entrada e saída	1,5 V
Frequência de comutação da chave eletrônica	Até 150 kHz
Dimensões aproximadas da placa	46 x 22 mm

Figura 25: Foto do módulo regulador de tensão LM2596.



Fonte: Autor, 2021.

3.1.5 MOTOR DE SUCÇÃO

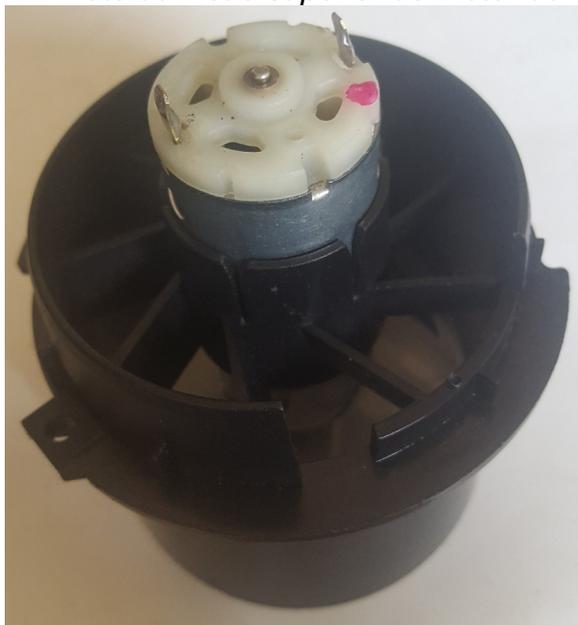
O atuador selecionado para realizar a sucção de poeira é um motor DC com uma hélice plástica acoplada em seu eixo. Este motor utiliza-se de sua alta rotação para constantemente retirar o ar presente no depósito de poeira, e dessa forma, forçar a poeira a entrar pelo funil de sucção. A força proveniente da sucção é originária da pressão atmosférica, que trabalha constantemente para manter a pressão interna ao depósito igual à externa. O motor para sucção selecionado utiliza uma alimentação máxima de 12 V. A figura 26 e 27 apresentam fotos do conjunto motor junto a hélice. A figura 26 mostra a visão inferior do conjunto e explicita a hélice. A figura 27 mostra a visão superior do conjunto e mostra os terminais elétricos do motor.

Figura 26: Foto da visão inferior do motor de sucção.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 27: Foto da visão superior do motor de sucção.



Fonte: Autor, 2021.

3.1.6 RELAÇÃO DE CUSTOS DE AQUISIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.

Relaciona-se os materiais de acordo com seu preço no mercado, para então contabilizar o custo de aquisição e possibilitar a avaliação do custo-benefício. A tabela 6 apresenta uma relação dos custos de aquisição dos equipamentos. Ressalta-se que o motor de sucção foi adquirido sem custos financeiros, por isso não está listado na tabela 6.

Tabela 6: Relação dos custos de aquisição dos equipamentos.

EQUIPAMENTO	PREÇO UNITÁRIO [R\$]	QUANTIDADE	PREÇO PARCIAL [R\$]
Arduino UNO R3 com cabo USB	68	1	68
Sensor ultrassônico HC-SR04	18	1	18
Modulo de ponte H dupla L298n	22	1	22
Kit cabo <i>jumper</i> macho-fêmea 40 com unidades – 20 cm	18	1	18
Kit cabo <i>jumper</i> macho-macho com 40 unidades – 20 cm	18	1	18

Módulo sensor infravermelho TCRT5000	15	1	15
Mini <i>Protoboard</i> 170 furos	7,8	1	7,8
Kit Chassi 2WD	70	1	70
Bateria Li-Ion 12 V – 4400 mAh com placa <i>BMS</i> e carregador	210,9	1	210,90 (Frete incluso)
Módulo regulador de tensão LM2596	20	1	20
Módulo relé de 1 canal – 5 V DC	15	1	15
500 gramas de filamento PLA	75	1	75
Total			557,7

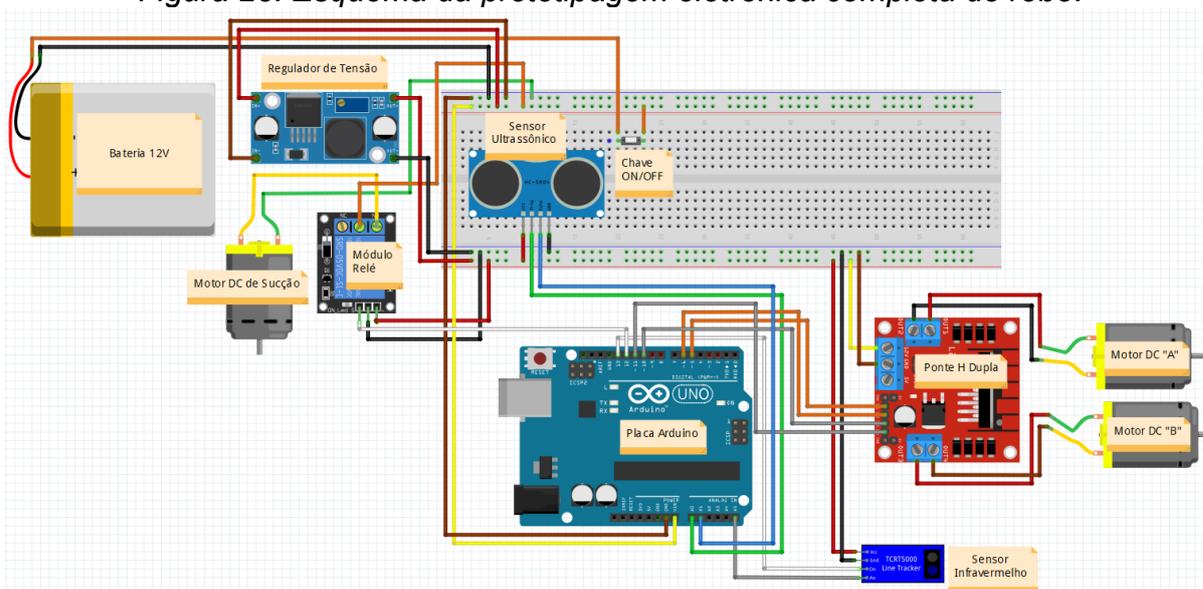
Analisando o valor total e comparando a modelos comerciais de robô aspirador, pode-se afirmar que o robô construído neste TCC é mais caro para aquilo que é capaz de realizar. É claro que, os valores dos modelos comerciais são reduzidos devido a grande escala de produção industrial que são submetidos em seu local de produção, como também devido a utilização de partes que foram desenvolvidas apenas para a aplicação no produto e que não possui nenhum nível de flexibilidade comparado a um dispositivo preparado para prototipagem.

3.2 ATIVIDADE 2: PROJETO DOS CIRCUITOS ELETRÔNICOS

Esta etapa corresponde a elaboração dos esquemas eletrônicos contendo os sensores, atuadores elétricos, controladores, interfaces de atuação elétrica e fontes de energia. A figura 28 apresenta uma ilustração do esquema da prototipagem eletrônica completa do robô, realizado no *software Fritzing*.

O *protoboard* foi utilizado simplesmente e apenas para auxiliar nas conexões de alimentação dos componentes (VCC e GND). O *protoboard* utilizado no projeto possui apenas 170 furos (diferentemente do ilustrado na figura 28), de tal forma que é considerado um ‘mini’ *protoboard* pensado para economizar espaço no robô.

Figura 28: Esquema da prototipagem eletrônica completa do robô.



Fonte: Autor, 2021.

A coloração dos fios elétricos no esquema foi definida de modo a facilitar o entendimento a montagem dos circuitos pensando também nas manutenções. A seguir será explicado as conexões eletrônicas de cada componente presente no esquema. Para cada componente será explicado a interligação com os outros componentes junto às cores da fiação e seus pinos e terminais.

3.2.1 CONEXÕES DO MÓDULO REGULADOR DE TENSÃO LM2596

O regulador de tensão diminui e estabiliza a tensão de 12 V vinda da bateria para 5 V para poder alimentar os sensores ultrassônicos, o sensor infravermelho, a ponte h e o módulo relé. Os terminais de entrada do regulador “IN+” e “IN-” estão diretamente conectados à bateria utilizando o *protoboard*. Os terminais de saída “OUT+” e “OUT-” estão também conectados no *protoboard* em outros pontos.

- Cores da fiação:
 - **Vermelho** para os terminais “IN+” e “OUT+”.
 - **Preto** para o terminal “OUT-”.
 - **Marrom** para o terminal “IN-”.

3.2.2 CONEXÕES DO ARDUINO UNO R3

O Arduino UNO é alimentado em 12 V pela bateria utilizando a possibilidade de alimentação externa no pino “Vin”. O pino “Vin” funciona como o terminal positivo, enquanto que o terminal negativo de alimentação conecta o pino “GND” do Arduino ao polo negativo da bateria. O *protoboard* auxilia nestas conexões.

- Cores da fiação:
 - **Amarelo** para o terminal “Vin”.
 - **Marrom** para o terminal “GND”.

3.2.3 CONEXÕES DO MOTOR DC DE SUÇÃO

O motor de sucção é ligado entre os terminais negativos da bateria e o terminal normalmente aberto (“NO”) do módulo relé. O terminal negativo da bateria está conectado no *protoboard*. Porém, ressalta-se que este módulo relé é acionado em nível lógico baixo (*low level triggered*).

- Cores da fiação:
 - **Amarelo** para o terminal que conecta o positivo do motor e o “NO” do módulo relé.
 - **Verde** para o terminal que conecta o negativo do motor e o terminal negativo da bateria.

3.2.4 CONEXÕES DO SENSOR ULTRASSÔNICO HC-SR04

Sobre o sensor ultrassônico: possui dois pinos de alimentação: “VCC” e “GND”. Esses pinos são ligados respectivamente nas saídas “OUT+” e “OUT-” do regulador de tensão que correspondem aos 5 volts definidos. Os pinos de sinal *trigger* e *echo* são conectados nos pinos de entrada analógica “A0” e “A1” do Arduino respectivamente.

- Cores da fiação:

- **Vermelho** para o fio que conecta o terminal “VCC” do sensor e a saída “OUT+” do regulador.
- **Preto** para o fio que conecta o terminal “GND” do sensor e a saída “OUT-” do regulador.
- **Verde** para o fio que conecta o pino de sinal *trigger* do sensor até o terminal de entrada analógica “A0” do Arduino.
- **Azul** para o fio que conecta o pino de sinal *echo* do sensor até o terminal de entrada analógica “A1” do Arduino.

3.2.5 CONEXÕES DO MÓDULO PONTE H DUPLA L298N

O módulo ponte H L298n utilizou-se da possibilidade de alimentação externa em seus pinos “VCC” e “GND”, e dessa forma, estão ligados na saída do regulador de tensão nos pinos “OUT+” e “OUT-” respectivamente. Para que a alimentação externa seja possível neste módulo, faz-se necessário a utilização de um *jumper* conectando os terminais “JP1”. Os pinos de controle dos motores “IN1”, “IN2”, “IN3” e “IN4” estão conectados no Arduino nos pinos de I/O digital “5”, “6”, “10” e “11” respectivamente. Esses pinos do Arduino foram escolhidos justamente por terem a capacidade de controle PWM e dessa forma, poder controlar a velocidade dos motores de tração do robô. Para a ligação com os motores de tração, a ponte H possui os terminais “OUT1” e “OUT2” para o motor “A” e “OUT3” e “OUT4” para o motor “B”.

- Cores da fiação:
 - **Vermelho** para os fios que conectam os terminais “OUT2” e “OUT4” da ponte H com um dos terminais dos motores “A” e “B” respectivamente.
 - **Preto** para os fio que conecta o terminal “OUT1” da ponte H com o outro terminal do motor A.
 - **Marrom** para o fio que conecta o terminal “OUT3” da ponte H com o outro terminal do motor B. Também é utilizado **marrom** para o fio que conecta o pino “GND” da ponte H até a saída “OUT-” do regulador de tensão.
 - **Amarelo** para o fio que conecta o pino “VCC” da ponte H até a saída “OUT+” do regulador de tensão.
 - **Laranja** para os fios que conectam os pinos de controle “IN1” e “IN2” da ponte H até os terminais digitais I/O “5” e “6” do Arduino respectivamente.
 - **Cinza** para os fios que conectam os pinos de controle “IN3” e “IN4” da ponte H até os terminais digitais I/O “10” e “11” do Arduino respectivamente.

3.2.6 CONEXÕES DO SENSOR INFRAVERMELHO TCRT5000

Sobre o sensor infravermelho TCRT5000: possui dois pinos de alimentação: “VCC” e “GND”. Esses pinos são ligados respectivamente nas saídas “OUT+” e “OUT-” do regulador de tensão que correspondem aos 5 volts definidos. O pino de sinal analógico “A0” do TCRT5000 está conectado ao pino de entrada analógica “A5” do Arduino enquanto que o pino de sinal digital “D0” está conectado no pino de I/O digital “13” do Arduino.

- Cores da fiação:
 - **Vermelho** para o fio que conecta o pino “VCC” do sensor até a saída “OUT+” do regulador de tensão.
 - **Preto** para o fio que conecta o pino “GND” do sensor até a saída “OUT-” do regulador de tensão.
 - **Branco** para o fio que conecta o pino “D0” do sensor até o pino de I/O digital “13” do Arduino.
 - **Cinza** para o fio que conecta o pino “A0” do sensor até o pino de entrada analógica “A5” do Arduino.

3.2.7 CONEXÕES DO MÓDULO RELÉ

- Sobre o módulo relé: possui dois pinos de alimentação: “VCC” e “GND”. Esses pinos são ligados respectivamente nas saídas “OUT+” e “OUT-” do regulador de tensão que correspondem aos 5 volts definidos. Esta ligação está auxiliada pelo *protoboard*. O pino de controle “IN” do módulo está conectado ao pino digital I/O “12” do Arduino.

- Cores da fiação:
 - **Vermelho** para o fio que conecta o pino “VCC” do módulo até a saída “OUT+” do regulador de tensão.
 - **Preto** para o fio que conecta o pino “GND” do módulo até a saída “OUT-” do regulador de tensão.
 - **Branco** para o fio que conecta o pino “IN” do módulo até o pino de I/O digital “12” do Arduino.
 - **Laranja** para o fio que conecta o terminal comum “COM” até o terminal positivo da bateria, que está disponível na *protoboard*.

3.2.8 CONEXÕES DA BATERIA DE LI-ION DE 12 V / 4400 MAH

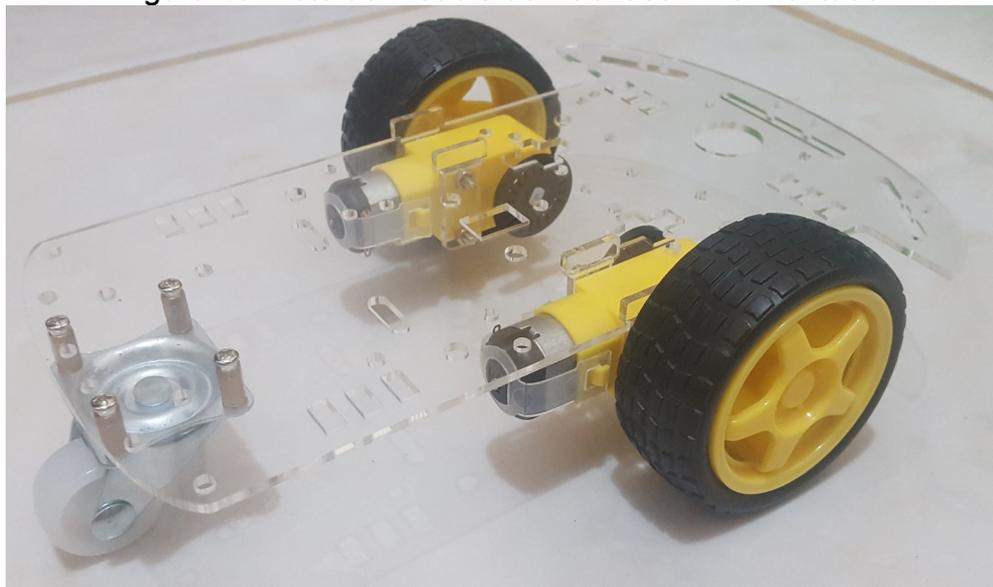
- Sobre a bateria: possui dois terminais para o fornecimento da energia. Estes terminais foram denominados como “VCC” e “GND”. Esses terminais são conectados na *protoboard* que distribui a tensão de 12 V para a entrada do regulador de tensão (pinos IN+ e IN- com VCC e GND respectivamente), a alimentação do Arduino (Vin e GND com VCC e GND respectivamente), o terminal negativo (em cor verde) do motor de sucção junto ao GND da bateria e o terminal comum “COM” do módulo relé junto ao terminal VCC da bateria.

3.3 ATIVIDADE 3: PROJETO E CONSTRUÇÃO MECÂNICA DA ESTRUTURA DO CHASSI.

Nesta atividade, fez-se a montagem da estrutura do chassi junto aos equipamentos mecânicos de locomoção do robô. Projetou-se, utilizando desenhos técnicos auxiliados por computador, as estruturas mecânicas com a finalidade de acomodar os equipamentos eletrônicos com segurança e o depósito de poeira. Procurou-se otimizar a estabilidade mecânica e a disposição dos espaços para possibilitar facilidade e praticidade em uma manutenção posterior. A figura 29 apresenta uma foto do modelo do kit chassi 2WD montado.

Para o projeto e construção das partes mecânicas que foram acopladas a seguir, foi necessário definir quais seriam as partes traseiras e frontais do robô. A chapa de acrílico, que faz parte do “kit chassi 2wd”, possui um furo em forma circular de diâmetro de aproximadamente 19 mm. Este furo localiza-se de forma centralizada entre as rodas de tração elétrica do robô, porém deslocado para o lado oposto de onde localiza a roda castor (ver figura 12). Avaliou-se que este furo possui uma capacidade de servir como o canal de aspiração da poeira. Dessa forma, este furo serviu de interligação de um funil de aspiração e do depósito de poeira. Por razões de praticidade de aspiração, definiu-se então que, o lado do robô que contem este furo (lado oposto ao da roda castor) deveria ser a parte frontal do robô. Consequentemente, a parte que leva a roda castor foi definida como a parte traseira.

Figura 29: Foto do modelo do kit chassi 2wd montado.



Fonte: Autor, 2021.

Após a construção do kit chassi, realizou-se o projeto e construção física dos modelos mecânicos utilizando métodos de manufatura aditiva (impressão de objetos em três dimensões). A modelagem e os projetos das peças foram possíveis utilizando o *software* de CAD 3D Solidworks. Utilizou-se o material PLA para todas as peças manufaturadas aditivamente. PLA é uma sigla para denominar o poliácido lático ou ácido polilático. É um polímero biodegradável constituído por moléculas de ácido lático, que é um ácido orgânico de origem biológica, obtido a partir de recursos renováveis.

Todas as peças produzidas em manufatura aditiva foi utilizando a impressora 3D modelo "Sethi3D S4X". A figura 30 apresenta uma foto da impressora Sethi3D S4X. Segundo a página da web do fabricante Sethi3D "<https://www.sethi3d.com.br/s4x>", pode-se citar algumas características dessa impressora:

- Volume de Impressão: 400x400x400 mm (64 litros).
- Mesa de impressão estática.
- Velocidade de impressão: até 150 mm/s.
- Velocidade de deslocamento (*travel*): até 300 mm/s.
- Nivelamento automático.

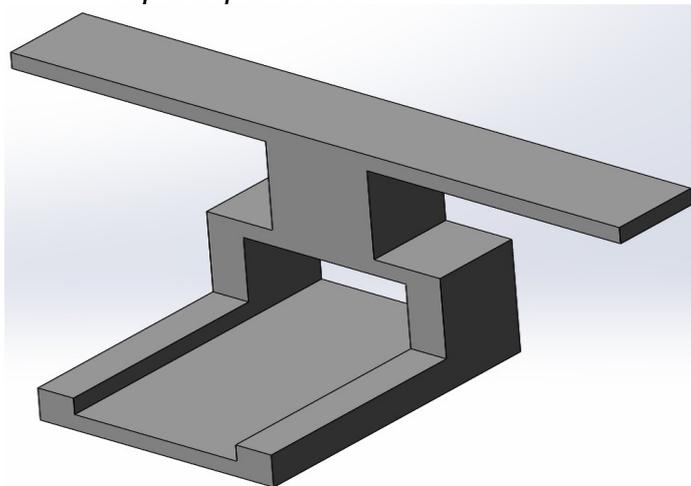
Figura 30: Foto da impressora 3d modelo Sethi3D S4X.



*Fonte: Retirado do site do fabricante:
<https://www.sethi3d.com.br/s4x>, Acessado em 23/11/2021 às 19:37.*

Para comportar e fixar o sensor infravermelho TCRT5000, faz-se necessário de uma peça mecânica que sirva como um suporte. Foi projetado e manufaturado aditivamente um suporte em forma de plataforma horizontal com 'asas' para realizar esta tarefa. A figura 31 apresenta uma ilustração em perspectiva do modelo mecânico do suporte para o sensor TCRT5000. O suporte é fixado na chapa de acrílico utilizando parafusos e porcas nas partes superiores das 'asas'. Para a fixação do sensor no suporte, também se utilizou de parafusos e porcas.

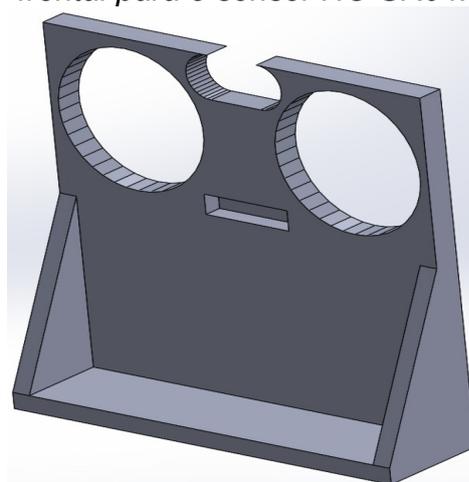
Figura 31: Ilustração em perspectiva do modelo mecânico do suporte para o sensor TCRT5000.



Fonte: Autor, 2021.

Para comportar e fixar o sensor ultrassônico HC-SR04, faz-se necessário de uma peça mecânica que sirva como um suporte. Foi projetado e manufaturado aditivamente um suporte compatível mecanicamente para realizar esta tarefa. A figura 32 apresenta uma ilustração em perspectiva do modelo mecânico do suporte frontal para o sensor HC-SR04.

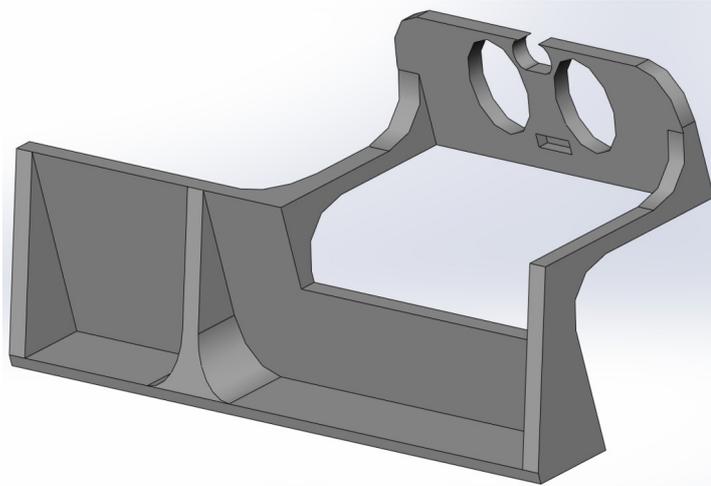
Figura 32: Ilustração em perspectiva do modelo mecânico do suporte frontal para o sensor HC-SR04.



Fonte: Autor, 2021.

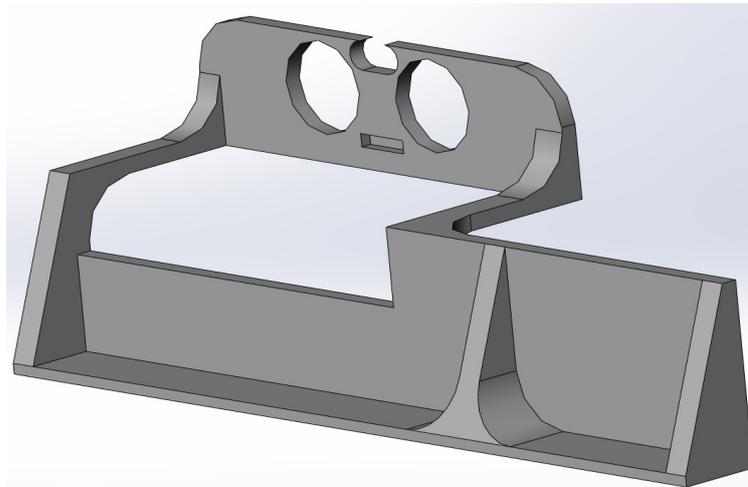
Para limitar as partes laterais do robô, faz-se necessário de umas peças mecânicas que sirvam como barreiras. Foi projetado e manufaturado aditivamente duas barreiras para realizar esta tarefa. A figura 33 apresenta uma ilustração em perspectiva do modelo mecânico da barreira esquerda do robô. A figura 34 apresenta uma ilustração em perspectiva do modelo mecânico da barreira direita do robô. Estas barreiras também têm a possibilidade de serem utilizadas como suporte com a inserção de um sensor ultrassônico HC-SR04 em cada uma delas.

Figura 33: Ilustração em perspectiva do modelo mecânico da barreira esquerda do robô.



Fonte: Autor, 2021.

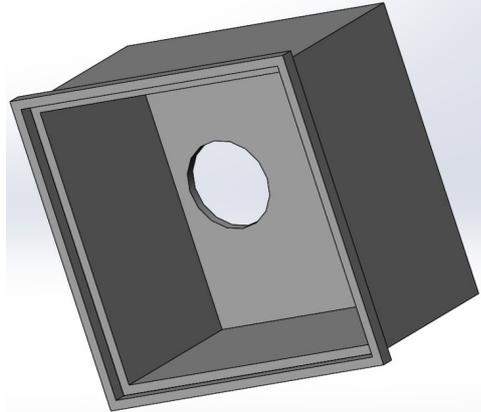
Figura 34: Ilustração em perspectiva do modelo mecânico da barreira direita do robô.



Fonte: Autor, 2021.

Para comportar a poeira aspirada, faz-se necessário de uma peça mecânica que sirva como um depósito. Foi projetado e manufaturado aditivamente um depósito em forma de caixa paralelepipedal para realizar esta tarefa. Esta peça necessita de duas partes separadas, pois dessa forma pode-se fazer a retirada da poeira aspirada quando necessário. Com isso, dividiu-se esta peça em uma parte inferior e superior. A figura 35 apresenta uma ilustração em perspectiva do modelo mecânico da peça inferior do depósito de poeira (visão superior). Esta peça encaixa-se com o funil (apresentado a seguir na figura 38) no furo da parte inferior.

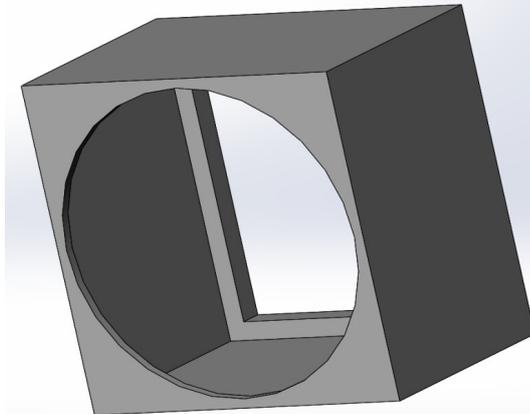
Figura 35: Ilustração em perspectiva do modelo mecânico da peça inferior do depósito de poeira (visão superior).



Fonte: Autor, 2021.

A figura 36 apresenta uma ilustração em perspectiva do modelo mecânico da peça superior do depósito de poeira (visão superior). O furo em círculo foi projetado para acomodar e encaixar com o conjunto do motor de sucção.

Figura 36: Ilustração em perspectiva do modelo mecânico da peça superior do depósito de poeira (visão superior).



Fonte: Autor, 2021.

Entre as duas peças do depósito, foi instalado um sistema de filtragem. Com o intuito de evitar o contato da poeira aspirada com as partes do motor de sucção e conseqüentemente o vazamento dessa poeira pela parte superior do motor, faz-se necessário a utilização desses sistemas de filtragem. Este filtro pode ser concebido utilizando tecidos vazados em microfuros para filtrar a poeira do ar aspirado. O tecido escolhido para realizar esta função de filtragem foi o tecido denominado “microtule” que também é conhecido como “filó”. O tecido é fixado na parte inferior

da peça superior do depósito. A figura 37 apresenta uma foto do tecido microtule fixado no depósito. O volume resultante do depósito de poeira (limitado superiormente pelo filtro) é de 122 ml.

Figura 37: Foto do tecido microtule fixado no depósito como filtro de poeira.



Fonte: Autor, 2021.

Para realizar a aspiração de poeira, faz-se necessário de uma peça mecânica rente ao solo que sirva de bico o sistema de sucção. Foi projetado e manufaturado aditivamente um funil para realizar esta tarefa.

A figura 38 apresenta uma ilustração em perspectiva do modelo mecânico do funil de sucção de poeira. O diâmetro externo da abertura maior (onde ocorre a sucção) é de 49 mm enquanto que o diâmetro interno é de 45 mm. Dessa forma, pode-se avaliar que a sucção da poeira se dará nestes 45 mm de diâmetro em cada passada do robô. Portanto, a área efetiva de aspiração resultante é de aproximadamente 15,9 cm². O funil é fixado de tal forma no depósito para que a 'boca' se posicione no máximo 2 mm acima do solo.

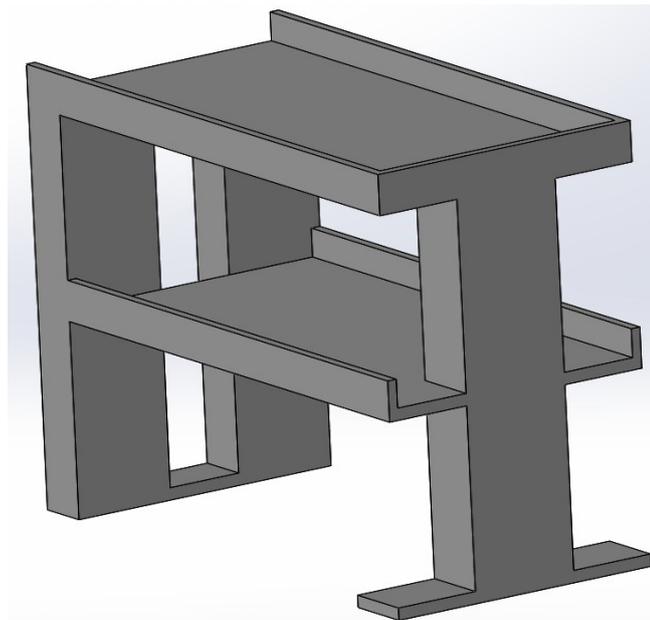
Figura 38: Ilustração em perspectiva do modelo mecânico do funil de sucção de poeira.



Fonte: Autor, 2021.

A figura 39 apresenta uma ilustração em perspectiva do modelo mecânico do suporte para os circuitos e módulos eletrônicos utilizados. Esta peça pode ser considerada como uma plataforma de dois andares, onde no primeiro andar está abrigado os módulos relé, ponte H e regulador de tensão. No segundo andar está abrigado o mini-*protoboard* e o Arduino UNO. A parte de baixo deste suporte é ocupada pela bateria. O suporte é fixado na chapa de acrílico utilizando parafusos e porcas nas partes inferiores.

Figura 39: Ilustração em perspectiva do modelo mecânico do suporte para os circuitos e módulos eletrônicos.



Fonte: Autor, 2021.

3.4 ATIVIDADE 4: MONTAGEM E CALIBRAÇÃO DOS COMPONENTES ELETRÔNICOS.

Já com posse dos componentes eletrônicos, realizou-se a montagem dos circuitos em placas e plataformas apropriadas e foi avaliado o funcionamento na prática de cada dispositivo para seguir as simulações realizadas. Avaliou-se também o espaço necessário para acomodação dos circuitos no robô.

Pensando na acomodação das partes elétricas e de controle, fez-se necessário a utilização de suportes mecânicos para os circuitos. A descrição desses suportes está melhor explicada na seção 3.4 seguinte. Pensando também na melhor organização da fiação elétrica e na praticidade de futuras manutenções e entendimentos do robô com um todo, foi utilizado abraçadeiras de plástico em cor preta, para então agrupar a fiação elétrico de cada componente.

A seguir será apresentada uma série de fotos da montagem de cada uma das partes eletrônicas. Toda a montagem eletrônica foi baseada no projeto desenvolvido na atividade 2 no *software Fritzing*, exposto na figura 28. Foram realizados testes de funcionamento de cada circuito, visando cumprir as necessidades de desempenho, as características de segurança de cada equipamento e a economia de energia. A figura 40 apresenta uma foto da montagem do sensor ultrassônico HC-SR04 junto ao seu suporte ilustrado na figura 32. A fixação do sensor ao suporte se deu através do uso de fita isolante em sua parte posterior.

Figura 40: Foto da montagem do sensor ultrassônico HCSR04.



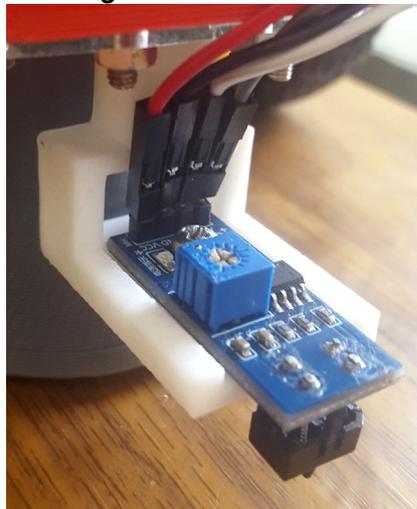
Fonte: Autor, 2021.

A figura 41 apresenta uma foto da montagem do sensor infravermelho TCRT5000 junto ao seu suporte ilustrado na figura 36.

O sensor foi fixado no suporte utilizando-se de um conjunto parafuso/porca. Este sensor necessita de uma calibração para perceber os desníveis e selecionar a faixa de detecção. Essa calibração é realizada ajustando o trimpot presente no módulo com o auxílio de uma chave de fenda cruzada (chave Phillips).

O módulo sensor possui dois *LEDs* de cor verde em sua parte superior, sendo que um deles acende quando o sensor está energizado (ligado) e o outro acende quando o sensor detecta um objeto (ou nesse caso o chão) em sua faixa calibrada. Se este segundo *LED* apagar significa dizer que o sensor detectou um desnível. Portanto, o TCRT5000 foi calibrado para perceber um desnível de aproximadamente a partir de 3 cm do conjunto emissor/receptor.

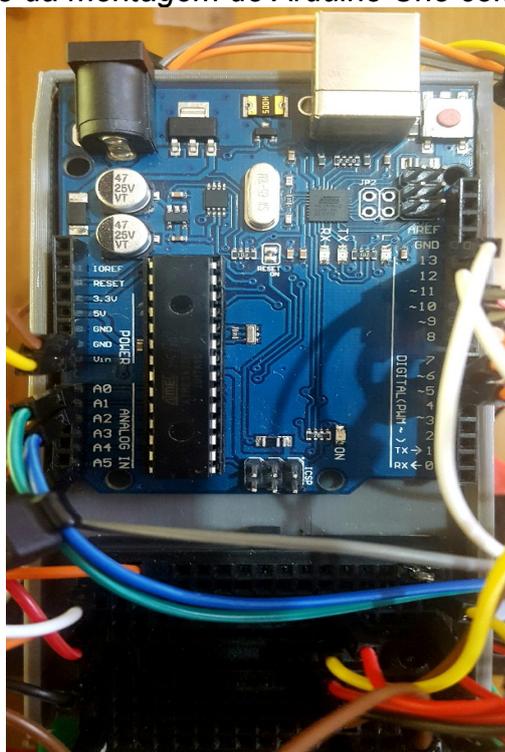
Figura 41: Foto da montagem do sensor infravermelho TCRT5000.



Fonte: Autor, 2021.

A figura 42 apresenta uma foto da montagem do Arduino Uno com o *protoboard* no segundo andar do suporte para os circuitos e módulos eletrônicos (modelo apresentado na figura 39). A placa Arduino possui *LEDs* para informar quando está ligado e quando está transmitindo ou recebendo dados pela comunicação serial, de modo a também informar o usuário de seu funcionamento. A parte do Arduino em que há a conexão USB foi posta faceando a parte de trás do robô, visando a praticidade de atualização e manutenção da programação.

Figura 42: Foto da montagem do Arduino Uno com o protoboard.



Fonte: Autor, 2021.

Como informado na atividade 2, o *protoboard* foi utilizado apenas para servir de distribuição dos pontos elétricos de 12 V e 5 V (VCC e GND para cada). A figura 43 apresenta uma foto do modelo de *protoboard* de 170 furos utilizado.

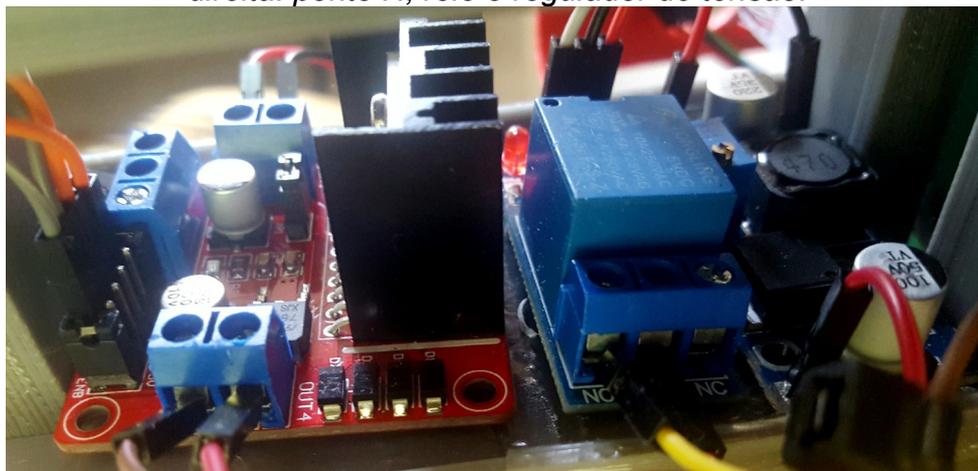
Figura 43: Foto do modelo de protoboard de 170 furos utilizado.



Fonte: Retirado de <https://www.casadarobotica.com/> Acessado em 10/12/2021 às 22:04

A figura 44 apresenta uma foto da montagem dos módulos ponte H, relé e regulador de tensão (da esquerda para a direita respectivamente na figura 44). Estes módulos foram alocados no primeiro andar do suporte para os circuitos e módulos eletrônicos (modelo apresentado na figura 39). A fixação dos módulos eletrônicos com o suporte se dá através de fita dupla face.

Figura 44: Foto da montagem dos módulos eletrônicos. Da esquerda para direita: ponte H, relé e regulador de tensão.

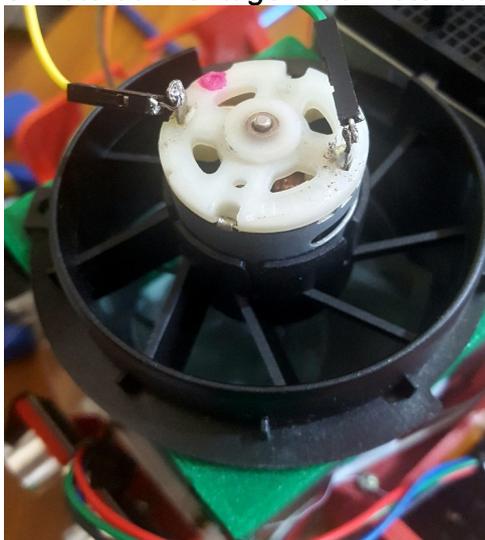


Fonte: Autor, 2021.

O regulador de tensão necessita de uma calibração da tensão de saída em 5 V DC. Essa calibração é realizada girando o trimpot presente no módulo com o auxílio de uma chave de fenda e medindo a tensão entre os terminais “OUT+” e “OUT-” com o auxílio de um voltímetro. O módulo relé possui dois LEDs em seu circuito. Um LED vermelho que acende quando o módulo está energizado e um LED verde que informa quando o contato normalmente aberto encontra-se conduzindo, ou seja, quando o motor de sucção está acionado.

A figura 45 apresenta uma foto da montagem do conjunto do motor de sucção. Este conjunto está encaixado acima da peça superior do depósito de poeira. Como a junção do conjunto motor e o depósito está conectada, através da fiação, com o módulo relé, faz-se necessário o desparafusamento deste terminal para separar as peças de forma completa. Este procedimento pode ser necessário de modo a facilitar a retirada da poeira acumulada dentro do depósito.

Figura 45: Foto da montagem do motor de sucção.



Fonte: Autor, 2021.

3.5 ATIVIDADE 5: INTEGRAÇÃO DAS PARTES MECÂNICAS E ELETRÔNICAS DO ROBÔ.

Nesta atividade, o objetivo foi de embarcar e fixar os circuitos eletrônicos na estrutura mecânica. Com isso, pode afirmar que houve a finalização da montagem física do robô, que possibilitou a realização de testes e correções de funcionamento de cada componente. Dessa forma, pode-se fazer a medições das dimensões totais do robô assim como também realizar a medição de sua massa. A figura 46 apresenta uma foto da montagem final do robô aspirador. Temos como resultado da construção que:

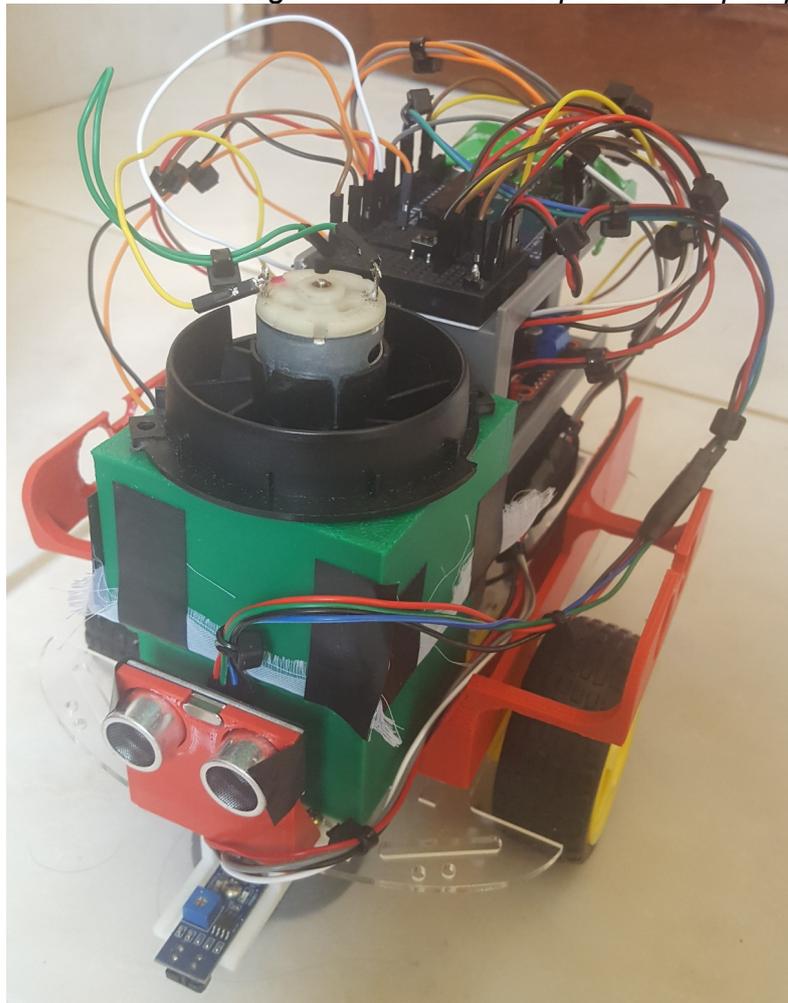
- **Dimensões máximas do robô (desconsiderando a fiação elétrica):** 247 mm de comprimento, 175 mm de largura e 200 mm de altura.
- **Massa total aproximada do robô:** 2,1 kg.

Sobre as questões energéticas, podemos fazer uma análise da autonomia da bateria de Li-ion, ou seja, fazer uma previsão de quanto tempo a bateria consegue fornecer a energia elétrica de forma eficiente para os sistemas do robô. Porém, necessitamos fazer uma consideração: considera-se que o consumo da bateria possui um valor constante durante a utilização da bateria. Essa admissão é válida para o robô aspirador, pois o motor de sucção e os motores de tração, enquanto o robô estiver ligado, estarão sempre acionados, não importando se o robô esteja recuando ou desviando. No entanto, enquanto a bateria se descarrega

durante o funcionamento do robô, a sua tensão instantânea diminui, fazendo com que o motor de sucção opere em uma tensão cada vez mais baixa, o que diminui sua capacidade de sucção.

Sabendo que a bateria possui uma tensão nominal de 12 V, que vai diminuindo lentamente conforme o uso, e possui uma capacidade de carga de 4400 mAh, precisamos medir a corrente total fornecida pela bateria durante o funcionamento. Utilizando-se de um amperímetro, pôde-se medir a corrente total máxima de 530 mA durante o funcionamento padrão do robô. Com esse valor temos que dividindo o valor de 4400 mAh por 530 mA temos um total aproximado de 8 horas e 20 minutos de funcionamento. Entretanto, na prática, existe uma perda de energia, por isso deve-se estimar uma redução na duração. Considerando que haja uma perda de 10% na energia (valor retirado do *datasheet*), o tempo de duração da bateria diminui para aproximadamente 7 horas e 24 minutos.

Figura 46: Foto da montagem final do robô aspirador em perspectiva.



Fonte: Autor, 2021.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Este capítulo diz respeito a apresentação dos resultados de desempenho do robô, avaliando o funcionamento de cada dispositivo. Para isso, foi aplicado dois testes de performance em condições de ambientes diferentes. Os testes avaliaram, entre outros quesitos, a capacidade de sucção da sujeira/poeira do chão do ambiente e o nível de autonomia na percepção do ambiente e de movimentação controlada apresentada.

4.1 APLICAÇÃO DO TESTE 1: ATUAÇÃO DO ROBÔ EM UM AMBIENTE IDEAL E RESTRITO.

Nesta parte do trabalho, foi realizado o primeiro teste de funcionamento do robô em sua aplicação, sendo então denominado de “teste 1”. O “teste 1” foi realizado em um ambiente ideal e restrito para o robô, ou seja, em um ambiente de configuração simples, onde os únicos obstáculos presentes são as suas próprias limitações. O ambiente denominado como “ideal” foi construído utilizando uma cerca de material papelão para restringir a área de atuação do robô. Neste teste, ainda não será avaliado a capacidade do robô de evitar degraus. Essa qualificação foi verificada no “teste 2” seguinte.

Após a limitação do ambiente ideal, fez-se a disposição da poeira a ser aspirada pelo robô no teste de forma a simular a poeira e sujeira do dia a dia. A sujeira que foi despejada é basicamente composta de pelos, fios de cabelo, poeira acumulada de móveis, entre outros detritos. Devido à quantidade de poeira despejada, considera-se, que nesta situação, estado do chão do ambiente antes do teste estava muito grave ou muito sujo. Portanto, pretende-se detectar e avaliar as limitações de sucção do robô em situações críticas. Uma foto deste ambiente antes da realização do “teste 1” está apresentada na figura 47. O robô foi, então, ligado dentro do ambiente.

Os objetivos deste teste foram de:

1. Observar o funcionamento do robô aspirador construído avaliando sua capacidade de se transladar no ambiente com chão empoeirado.
2. Avaliar a capacidade do robô de evitar a colisão com as limitações do ambiente. Caso houver uma colisão, avaliar a capacidade do robô de retornar e continuar o seu funcionamento.
3. Avaliar a capacidade de aspiração da sujeira do solo e seu acúmulo no depósito.

A duração deste teste foi definida para 15 minutos.

Figura 47: Foto do ambiente antes da realização do teste 1: Ambiente ideal e restrito com chão empoeirado.



Fonte: Autor, 2021.

A seguir, apresenta-se a explicação de alguns trechos importantes da programação que foi embarcada no Arduino UNO que corresponde a lógica de controle para o robô aspirador. A linguagem de programação do Arduino é muito parecida com *Wiring* e é baseada na linguagem C e C++. A programação foi realizada na IDE do Arduino e posteriormente embarcada no Arduino UNO. O código está todo comentado de forma a auxiliar o entendimento do leitor sobre cada uma de

suas partes. Os comentários são ignorados durante o processamento do código e podem ser identificados com um sinal de “//” antes da sua explicação. O código completo está presente no Apêndice A.

Por questões de praticidade e enxugamento da programação, decidiu-se utilizar uma biblioteca para a medição de distância do sensor ultrassônico HC-SR04. A biblioteca utilizada é a “Ultrasonic” criada por Erick Simões (github: @ErickSimoes / twitter: @AloErickSimoes). A versão 3.0.0 utilizada da biblioteca foi modificada por Otacilio Maia (github: @OtacilioN / linkedIn: in/otacilio). A figura 48 mostra a inclusão da biblioteca “Ultrasonic” no código principal.

Figura 48: Inclusão da biblioteca Ultrasonic no código de programação principal.

```
// Inclusão de uma biblioteca para o sensor ultrassônico  
#include <Ultrasonic.h>
```

Fonte: Autor, 2021.

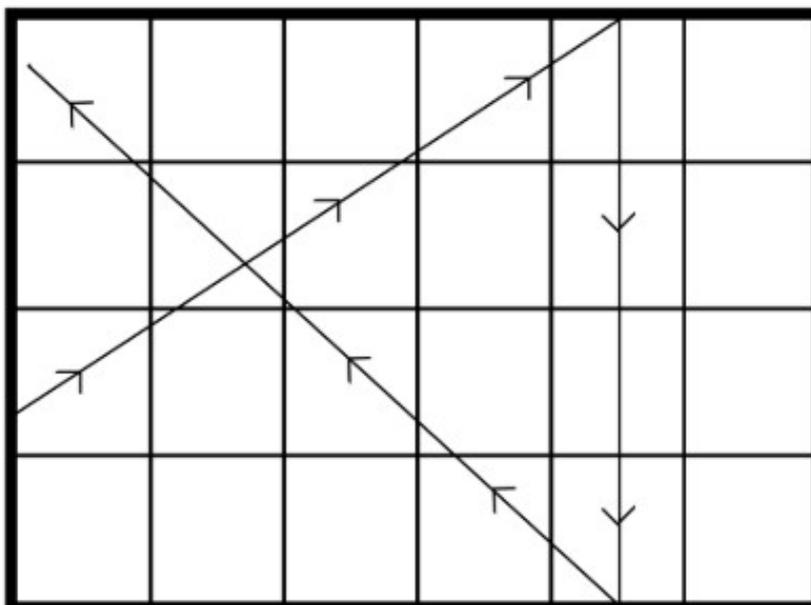
Esta biblioteca objetiva em deixar as medições com sensores ultrassônicos mais simples e minimalista. Os sensores compatíveis com esta biblioteca são os HC-SR04 (utilizado neste TCC), Ping))) e Seeed Studio SEN136B5B. O código completo da biblioteca está presente no Apêndice B.

4.2 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DO ROBÔ

Como estratégia de controle para o robô poder alcançar as diferentes partes do ambiente, utilizou-se os algoritmos de trajetórias retas aleatórias, analisado por autores como (GUNNING, 2018). Segundo Gunning (2018), esses algoritmos de caminhada aleatória (ou *randon walk* em inglês) são definidos como não-determinísticos e são utilizados nos modelos comerciais mais baratos de robô aspirador, que são aqueles que possuem o menor número de sistemas de sensoriamento (utilizando apenas sensores frontais) e trabalham com nenhum conhecimento armazenado do ambiente. O autor Gunning concluiu ao final de seu trabalho “*A performance comparison of coverage algorithms for simple robotic vacuum cleaners (2018)*” que, ao utilizar apenas de trajetórias pré-determinadas, como o *boustrophedon*, seguimento de paredes e espiral, o ponto de início do robô e a disposição dos obstáculos apresentava-se como um fator decisivo para o sucesso. Com isso, a adição dessa estratégia de trajetórias aleatórias junto a trajetórias pré-determinadas aumentava a capacidade do robô de poder cobrir porcentagens maiores do ambiente em que estava inserido. Pensando nisso, foi definido as trajetórias aleatórias como estratégia de controle para o robô deste trabalho.

O algoritmo de retas aleatórias pode ser entendido da seguinte forma: o robô constantemente mede a distância frontal com o HC-SR04 e a presença de degraus no chão. Caso não haja degrau e a distância frontal medida for maior que um valor máximo definido na programação então o robô apenas se movimenta para frente. Quando detectado um degrau ou a distância medida for menor que este valor máximo definido, o robô realiza um recuo e uma rotação para a direita. Dessa forma, pretende-se cobrir todo o ambiente inserido utilizando-se dessas trajetórias retas aleatórias. A figura 49 apresenta uma ilustração das trajetórias de controle aleatório.

Figura 49: Ilustração das trajetórias de controle aleatório.



Fonte: Adaptado de Gunning (2018, p. 8).

Na linha de programação que diz respeito a “Verificação da medição dos sensores”, definiu-se que a distância máxima frontal permitida pelo sensor ultrassônico seria de 5 centímetros. Ou seja, o Arduino verifica se o valor armazenado na variável “dist” é menor que 5. Nesta linha também é verificada a medição digital do sensor infravermelho, ou seja, verifica se o valor da variável “IvalorD” é igual a 1 ou “true”. Se este valor está igual a true, significa dizer que o sensor detectou um desnível a evitar e que deve recuar e girar.

A figura 50 mostra um trecho da programação que diz respeito a definição dos tempos em que o robô recua e gira. Esses valores de tempo (700 ms para o recuo e 400 ms para a rotação/giro) foram definidos de forma experimental durante os testes quando produziam um resultado satisfatório. A figura 51 mostra o trecho de programação da verificação dos sensores e de atuação para o recuo e giro do robô para o teste 1.

Figura 50: Trecho da programação de definição dos tempos de recuo e giro do robô.

```
// Declaração das variáveis de tempo de recuo e de giro
int tempoRecuo = 700, tempoGiro = 400;
```

Fonte: Autor, 2021.

Figura 51: Código de verificação dos sensores e atuação para o recuo e giro do robô para o teste 1.

```
if ((dist < 5) || (valorIR == true)) // Verificação da medição dos sensores
{
    // Início do bloco de recuo do robô e desvio de obstáculos

    // Bloco de acionamento do robô para trás
    digitalWrite(in1, LOW);
    digitalWrite(in2, HIGH);
    digitalWrite(in3, LOW);
    digitalWrite(in4, HIGH);
    delay(tempoRecuo);

    // Bloco de acionamento do robô para direita
    digitalWrite(in1, HIGH);
    digitalWrite(in2, LOW);
    digitalWrite(in3, LOW);
    digitalWrite(in4, HIGH);
    delay(tempoGiro);

    // Fim do bloco de recuo do robô e desvio de obstáculos
}
```

Fonte: Autor, 2021.

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO TESTE 1

Após o encerramento dos 15 minutos e conseqüentemente do teste 1, o robô foi desligado e retirado do ambiente. Portanto, neste teste foi possível observar que:

- O robô tendeu a realizar curvas para o lado direito, revelando que o motor esquerdo está aplicando um valor de torque maior que o motor direito mesmo que estejam recebendo o mesmo nível de tensão. A correção pode ser realizada diminuindo a velocidade do motor esquerdo até que o robô realize trajetórias que sejam mais retas possíveis.

- O robô apresentou um determinado nível de dificuldade de tração em suas rodas. Essa dificuldade ocorreu sobretudo nas partes do ambiente com mais sujeira acumulada no solo. Essa sujeira acumulada prejudicou a tração de todas as três rodas, entretanto a roda mais afetada foi a roda traseira castor que apenas serve de apoio estrutural da configuração de unicycle. Essa sujeira acumulada no solo se depositou nas rodas. A roda castor também apresentou alguns travamentos em situações onde havia um pequeno relevo no solo. Portanto, avalia-se que poderia ter sido utilizado um equipamento com possibilidade de atuação mais direta no lugar da roda castor, como por exemplo, combinar um motor DC junto a um servomotor para a mudança de direção.
- O sensor ultrassônico HC-SR04 conseguiu detectar com precisão a maioria dos objetos e obstáculos quando necessário. Percebeu-se também que, dependendo do ângulo em que o robô se aproximava do limite do ambiente, o sensor ultrassônico não era capaz de medir uma distância igual ou abaixo do limite determinado de 5 cm, e com isso, havia uma colisão e o robô travava e necessitava de intervenção. Vale lembrar que o sensor ultrassônico está posicionado na frente do robô.
- As rotinas de *delays* na programação, que correspondem aos tempos de recuo e giro do robô, fazem com que o intervalo de medição dos sensores entre duas leituras, durante o recuo e o giro do robô, seja atrasada na soma dos *delays*. O *delay* total entre as medições fica em 1,1 segundo (700 ms + 400 ms). Esse atraso prejudica a autonomia do robô em situações extremas, onde os sensores não conseguem realizar suas medições e informar ao sistema de controle a tempo de evitar uma colisão ou queda. Por outro lado, a diminuição desses valores de *delay* também pode prejudicar a autonomia. Valores muito pequenos de *delay* fazem com que o robô não recue e rotacione por tempo o suficiente para mudar sua angulação de forma eficiente a evitar o obstáculo.
- O sistema de controle, centrado no Arduino UNO, foi capaz de receber os sinais dos sensores, processar de acordo com a programação embarcada e acionar os dispositivos de atuação do robô junto a ponte H e o módulo relé. Uma limitação encontrada no Arduino UNO faz relação com o fato da placa utilizar um microcontrolador com processador *single-core*, ou seja, o Arduino UNO utilizado não é capaz de realizar mais de uma operação de forma simultânea. Essa limitação causou os problemas já explicados com a adição dos *delays* na programação para o recuo e rotação do robô, que causou um atraso de 1,1 segundo nas medições dos sensores.

- Alguns tipos de sujeira foram aspiradas de forma mais fácil pelo robô. Enquanto que o robô foi incapaz de aspirar certos outros tipos de sujeira. Fios de cabelos foram os mais facilmente aspirados devido sua leveza e não adesão ao solo. Outros tipos de sujeira mais pesada ou concentrada, como grandes aglomerações de pó foram mais difíceis de serem aspiradas, e precisaram de mais de uma 'passada' do robô. Apesar disso, conclui-se que o sistema de sucção, que engloba o módulo relé e o motor de sucção, mostrou-se capaz de realizar os trabalhos de aspirar a poeira do solo de forma relativamente efetiva. Também faz-se necessário lembrar que o robô aspirador propõe a servir como auxílio na limpeza do chão de forma a atuar periodicamente e evitar grandes acumulações de poeira no chão.
- A bateria de Li-ion selecionada atendeu as necessidades quanto a alimentação elétrica do robô, fornecendo autonomia energética por um tempo bem alto (mais de 7 horas). Porém, essa grande capacidade de carga tem a desvantagem de fazer com que a bateria seja um equipamento pesado e que ocupa grandes dimensões no robô, de tal forma a prejudicar um pouco a tração e aumentar o volume ocupado. Conclui-se que a bateria foi superdimensionada no sentido que poderia se utilizar um modelo mais leve mesmo que ofereça uma capacidade de carga menor, pois não prejudicaria muito a autonomia.
- O sistema de tração e locomoção, que engloba os motores DC com a ponte H e a roda castor, sofreu devido ao peso elevado resultante do robô. Durante os testes, a roda castor ficou travada em alguns relevos da lajota no solo, e os motores de tração não apresentaram torque suficiente para superar esses relevos. Uma possível solução para este problema é utilizar uma roda castor com uma largura maior. Em situações onde não havia relevo no solo, este problema foi inexistente. Conclui-se então que os motores de tração e a roda castor, pertencentes ao "kit chassi 2wd", foram subdimensionados no resultante do robô finalizado.
- Os suportes para os sensores ultrassônicos e infravermelho serviram com êxito suas funções de proporcionar uma fixação estável para os dispositivos realizarem suas medições com precisão.
- O funil de aspiração cumpriu seu papel de servir de ponto de aquisição para o sistema de sucção. Porém, avalia-se que houve limitações dimensionais correspondentes a área de sucção efetiva do funil, ou seja, a 'boca' do funil, que possui uma área de 15,9 cm², é relativamente pequena. Essa limitação faz com que o robô demore mais tempo para cobrir a área de um ambiente.

No entanto, valores de área de sucção muito altos poderiam diminuir a velocidade do ar de sucção a ponto de prejudicar a efetividade de aspiração. Pensando nisso, preferiu-se por uma solução que garantisse a eficiência de sucção.

- Sobre o depósito de poeira: um problema existente no sistema mecânico do depósito de poeira é que, para retirar a sujeira acumulada, faz-se necessário retirar a peça superior do depósito que é fixada com o motor de sucção. Ou seja, a retirada da poeira interfere nos componentes elétricos. Esse problema causa uma certa inconveniência todas as vezes quando se faz necessário despejar a sujeira do depósito.

Algumas fotos foram feitas para avaliar o estado final do ambiente e do próprio robô após os trabalhos. A figura 52 apresenta uma foto do ambiente após a realização do “teste 1” de 15 minutos.

Figura 52: Foto do ambiente após a realização do teste 1: Ambiente ideal e restrito com chão parcialmente aspirado.



Fonte: Autor, 2021.

A figura 52 mostra que, após o teste 1, ainda sobrou uma certa quantidade de poeira que não foi aspirada. Considerando que:

1. O robô aspirador serve principalmente para auxiliar em uma limpeza mais leve do chão, ou seja, não recomendado para limpezas mais profundas que então necessitariam de trabalhos manuais mais dedicados.
2. O robô aspirador foi projetado de forma a atuar com uma periodicidade alta, pensando em sempre desbastar a sujeira dos ambientes.
3. O estado do chão ambiente antes do teste estava muito sujo. Este estado foi aplicado de forma proposital, com o intuito de avaliar os limites da capacidade de aspiração do robô.

A seguir, inicia-se a apresentação do estado do robô após a finalização do teste 1 com discussões sobre os problemas encontrados. A figura 53 apresenta uma foto do estado do depósito de poeira após a realização do teste 1. Nesta foto pode-se perceber que o depósito de 122 ml encontra-se quase que totalmente cheio.

Figura 53: Foto do estado do depósito de poeira após a realização do teste 1: Depósito quase cheio.



Fonte: Autor, 2021.

A figura 54 apresenta uma foto do estado do filtro de poeira após a realização do teste 1. Percebe-se que houve um determinado acúmulo de poeira em sua superfície, porém sua função prevista de evitar a passagem da sujeira para o motor de sucção foi cumprida com sucesso.

Figura 54: Foto do estado do filtro de poeira após a realização do teste.



Fonte: Autor, 2021.

A figura 55 apresenta uma foto do estado da roda direita de tração motorizada após a realização do teste 1. Percebe-se que houve um determinado acúmulo de poeira na superfície do pneu. Como citado na seção 2.6, este acúmulo causa situações prejudiciais à tração do robô. São situações onde há atrito variável do terreno como, por exemplo, em carpetes, pisos de vinil, pisos de madeira e no chão sujo. O estado da roda esquerda apresentou as mesmas condições da roda direita.

Esse acúmulo de sujeira nas rodas causou o deslizamento das rodas ao tentar realizar a movimentação em partes muito sujas do ambiente de teste. Esta causa contribui ao fato atual, de que este robô aspirador muitas vezes não será capaz de realizar a limpeza em situações onde a sujeira do chão é muito grave.

Figura 55: Foto do estado da roda direita de tração motorizada após a realização do teste 1.



Fonte: Autor, 2021.

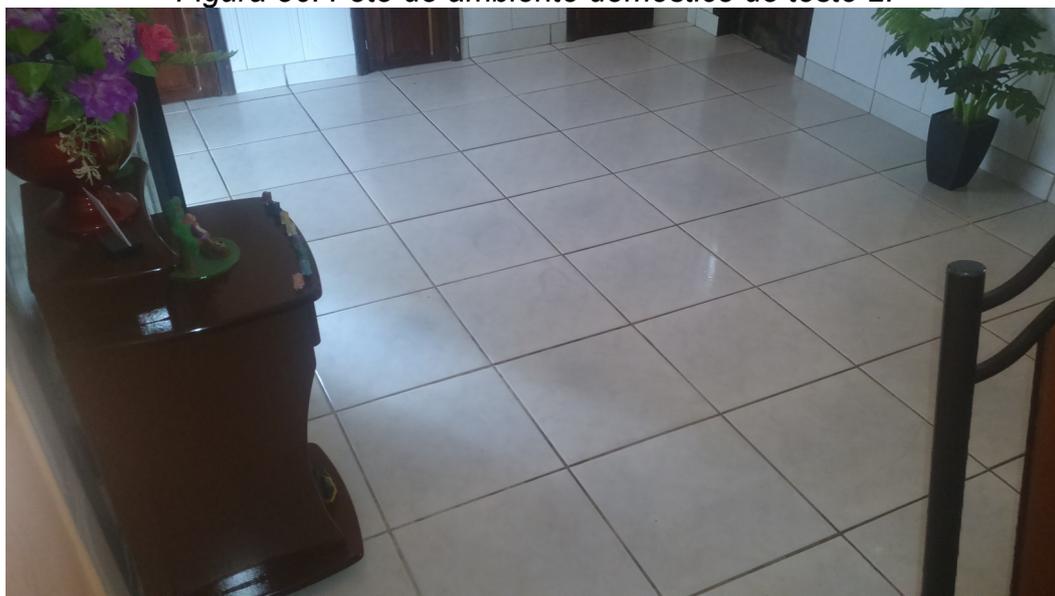
4.4 APLICAÇÃO DO TESTE 2: ATUAÇÃO DO ROBÔ EM AMBIENTES DOMÉSTICOS REAIS.

Esta atividade visou a realização testes de desempenho nos ambientes domésticos com condições reais de disposição de obstáculos e poeira. Este teste foi denominado como “teste 2”. Após a realização do teste 1, buscou-se realizar uma otimização da lógica de programação, visando aumentar o nível de autonomia e velocidade de operação do robô para o teste 2. Este foi o momento de ajustes finais do funcionamento do robô objetivando resolver as dificuldades encontradas no teste 1. Um dos ajustes realizados após o “teste 1” foi de aumentar o valor da distância máxima para o recuo do robô na programação. O antigo valor de 5 cm foi substituído para 10 cm. Essa troca visa atenuar as possibilidades de colisão do robô visto que o ambiente do “teste 2” é muito mais complexo em seus obstáculos.

Neste teste 2 também foi verificado a capacidade do robô de evitar quedas em degraus utilizando-se do sensor infravermelho TCRT5000.

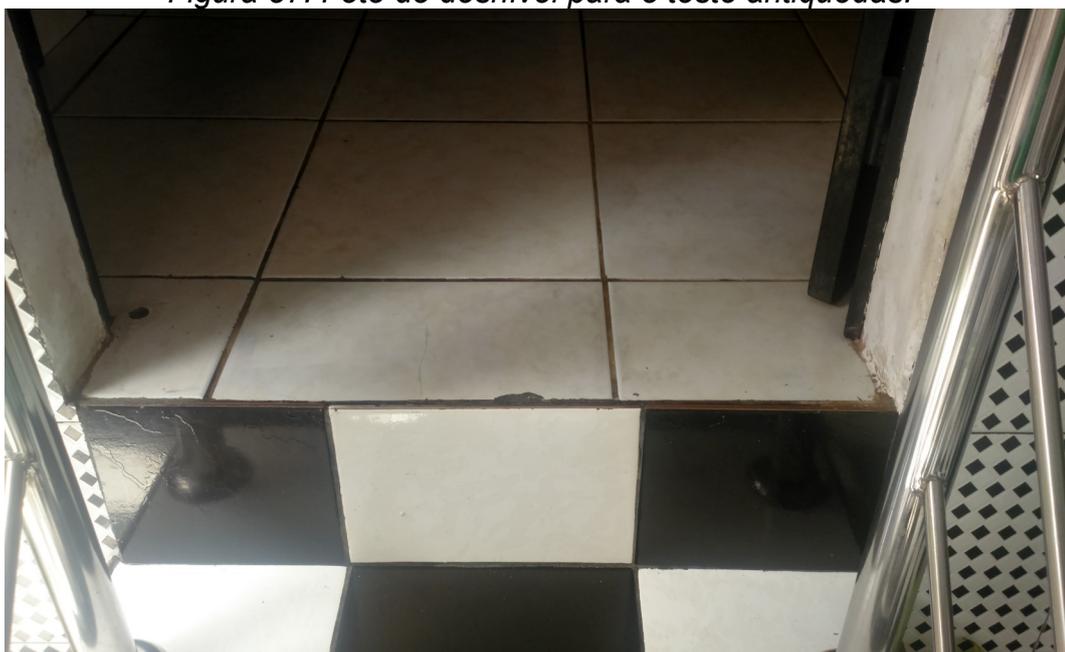
Diferentemente do teste 1, não houve nenhuma disposição de poeira a ser aspirada pelo robô, ou seja, o ambiente está em condições reais no que diz respeito ao estado de limpeza do chão. O ambiente doméstico escolhido foi uma sala de estar de uma residência. A figura 56 apresenta uma foto deste ambiente. A figura 57 apresenta uma foto do desnível para o teste antiquedas.

Figura 56: Foto do ambiente doméstico do teste 2.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 57: Foto do desnível para o teste antiquedas.



Fonte: Autor, 2021.

Os objetivos deste teste foram de:

1. Observar o funcionamento do robô aspirador construído avaliando sua capacidade de se transladar em um ambiente doméstico real com configurações de obstáculos complexa.
2. Avaliar a capacidade do robô de evitar quedas em degraus.
3. Avaliar a capacidade de aspiração da sujeira do solo e seu acúmulo no depósito.

Assim como no teste 1, a duração deste “teste 2” foi definida para 15 minutos.

4.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO TESTE 2

Após o encerramento dos 15 minutos e conseqüentemente do teste 2, o robô foi desligado e retirado do ambiente. Portanto, neste teste foi possível observar que:

- Diferentemente do teste 1, o robô não apresentou tantas dificuldades de tração em suas rodas. Essa dificuldade diminuiu devido ao fato de que, no ambiente doméstico selecionado, o estado de limpeza do chão não apresentava a graveza existente no teste 1. Com isso, houve uma diminuição na sujeira acumulada em todas as três rodas.
- Comparado ao teste 1, ocorreu um número maior de colisões do robô com os obstáculos do ambiente. O sensor HC-SR04 deixou de perceber certos tipos de objetos, principalmente por causa de suas limitações derivadas da utilização do ultrassom, que pode ser absorvido dependendo do tipo de material do obstáculo. Além disso, o sensor não foi capaz de perceber certos obstáculos dependendo da posição do objeto em relação ao sensor. É necessário lembrar que o sensor envia ondas de ultrassom em formato de cone. Durante os testes, se um obstáculo estava em uma posição mais baixa ou mais alta do alcance deste cone, então o sensor não conseguia detectar e o robô sofria a colisão. Algumas dessas colisões acarretaram na necessidade de intervenção no robô, de forma a restaurá-lo a condições de trabalho.
- Como o ambiente possui dimensões muito maiores e uma configuração muito mais complexa do que o ambiente ‘ideal’ do teste 1, Algumas partes do ambiente não foram alcançadas durante os 15 minutos de teste. Porém,

considera-se que este problema é atenuado, conforme o tempo de utilização do robô aumenta.

- Os atrasos de medição dos sensores devidos aos *delays* presentes na programação prejudicaram ainda mais a autonomia do robô que no teste 1.
- Não houve diferença perceptível na capacidade do robô de aspiração de poeira entre os dois testes.
- O sensor infravermelho TCRT5000 possui a capacidade de detectar a presença de obstáculos e neste projeto possuiu a tarefa de detectar um desnível para evitar uma queda do robô. Porém, como este sensor se baseia na capacidade de reflexão da luz infravermelha do objeto, é possível que o sensor não tenha a capacidade de detectar um desnível dependendo se o material absorver a luz emitida pelo fotodiodo.
- Nas situações apresentadas no “teste 2”, o TCRT5000 foi capaz de perceber o desnível, porém com êxito condicional. Quando o robô alcançava o degrau pela parte frontal (onde está presente o sensor infravermelho responsável pela detecção), o robô conseguiu detectar o desnível e, portanto, recuou e rotacionou. Entretanto, houve uma situação onde o robô alcançou o desnível pela parte traseira. Esta situação ocorreu devido à presença de um obstáculo vizinho ao desnível que forçou o recuo e a rotação do robô perto do desnível. Consequentemente, o robô não foi capaz de detectar o desnível e evitar a iminente queda.

5 CONCLUSÃO

Podemos, finalmente, organizar e realizar as análises dos resultados do projeto, da construção e do desempenho do robô, informando as principais dificuldades encontradas. Considerando os objetivos específicos citados na introdução, podemos analisar quais podem ser considerados como cumpridos, quais foram parcialmente cumpridos e quais não foram cumpridos. Inicialmente realizou-se um levantamento bibliográfico das áreas de conhecimento envolvidas. Estas áreas estão explicitadas e explicadas resumidamente durante o capítulo 2. Considera-se então que o 1º objetivo específico foi concluído.

Conforme apresentado na atividade 1 do capítulo 3, realizou-se um estudo dos requisitos dos sistemas do robô. Dessa forma foi possível verificar a disponibilidade e selecionar os equipamentos mecânicos e eletrônicos. Após os testes, os equipamentos selecionados quando interligados de forma sistemática, foram capazes de realizar as principais tarefas demandadas do robô aspirador proposto apesar das dificuldades encontradas. Conclui-se então que o 2º objetivo foi parcialmente alcançado, visto que alguns componentes do robô não foram dimensionados de forma precisa ou precisavam de um componente/tratamento extra.

Na atividade 2 do capítulo 3 foi realizado o projeto dos componentes elétricos esclarecendo a interconexão entre os sistemas de alimentação, sensoramento, controle e atuação no ambiente. Pode-se considerar que o 3º objetivo foi completamente alcançado, visto que ao final da montagem e integração dos dispositivos, os circuitos eletrônicos do robô apresentaram-se como um sistema coeso capaz de realizar o sensoramento, o processamento dos dados e a atuação no ambiente utilizando os componentes selecionados, cada um com sua limitação.

Na atividade 3 do capítulo 3 foi realizado a modelagem e a manufatura dos suportes mecânicos assim como as montagens da estrutura do chassi junto aos equipamentos de atuação do robô. Apesar das inconveniências, procurou-se otimizar a estabilidade mecânica ao posicionar os equipamentos mais pesados em partes mais inferiores do robô (como no caso da bateria de Li-ion). Buscou-se também otimizar a disposição dos espaços para possibilitar facilidade e praticidade em uma manutenção posterior. Portanto, pode-se considerar que o 4º objetivo foi apenas parcialmente alcançado devido ao problema existente do depósito de poeira.

Após a integração completa das partes mecânicas e eletrônicas do robô na atividade 5 do capítulo 3, iniciou-se o desenvolvimento das lógicas e algoritmos para o controle de atuação do robô. O Arduino presente no robô foi programado com o pensamento de fornecer uma lógica de controle que percebe o ambiente na frente do robô e o faz reagir a obstáculos recuando e rotacionando. Analisando essa lógica e verificando os resultados dos testes, o nível de inteligência da movimentação do robô é limitada no sentido em que não há um planejamento de rotas ou trajetórias. Com a lógica de programação aplicada, a movimentação do robô se manifesta de

forma praticamente aleatória (como definido na seção 4.2), reagindo ao próprio ambiente em que está inserido, ou seja, de forma passiva. Considera-se então o 5º objetivo como concluído

Conforme apresentado e explanado na seção 4.1, realizou-se um teste inicial em um ambiente determinado como “ideal” e “restrito”. É possível concluir que o 6º objetivo foi alcançado, pois este teste, denominado de “teste 1”, serviu para revelar muitas das dificuldades ou limitações do funcionamento do robô aspirador em uma situação de chão muito sujo. Com isso foi possível aprimorar o desempenho do robô para o teste seguinte.

Conforme apresentado e explanado na seção 4.4, realizou-se um teste de desempenho nos ambientes domésticos com condições reais de disposição de obstáculos e poeira. É possível concluir que o 7º objetivo foi parcialmente alcançado, pois este teste, denominado de “teste 2”, foi realizado com sucesso mas revelou que, mesmo após as correções no *software*, os ambientes domésticos reais causam grandes dificuldades para o robô aspirador construído devido suas configurações complexas de espaçamento e disposição de obstáculos e desníveis.

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Ao final da realização deste TCC, considera-se que, apesar dos erros cometidos e dificuldades encontradas, foi possível alcançar parcialmente o objetivo geral de “modelar e desenvolver um protótipo de um robô móvel, de topologia de uniciclo e tração diferencial, para ser destinado a aspirar a sujeira do chão de ambientes domésticos.” Alcançou-se um protótipo funcional, porém o nível de autonomia alcançado foi limitado para ambientes domésticos reais, além do custo resultante ser considerado alto (ver seção 3.1.6 sobre a relação de custos de aquisição dos equipamentos). Para trabalhos futuros, além de corrigir os erros e superar as dificuldades encontradas, recomenda-se:

1. Trabalhar na questão de compactar os sistemas do robô diminuindo as dimensões resultantes, de tal forma a possibilitar o acesso do robô a cantos mais difíceis de alcançar.
2. Implementar uma conexão com monitoramento remoto, utilizando aplicativos na *internet wi-fi*, ou por conexão *bluetooth*.
3. Implementar um sistema que agenda as limpezas no dia de forma automática.
4. Implantar sistemas que supervisionam o estado de descarga da bateria com possibilidade de recarga automática em uma estação.

5. Adicionar outras funcionalidades na limpeza, como passar panos após a aspiração.
6. Implementar sistemas de mapeamento e aprendizagem do ambiente.

6 REFERÊNCIAS

- AMORIM, A. E. A. et al. ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO DOS SONARES LV-EZ, US100 E HC-SR04. 2019.
- ASAFA, T. B. et al. Development of a vacuum cleaner robot. **Alexandria Engineering Journal**, 2018.
- BARBI, I.; MARTINS, D. C. **Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**. 4ª Ed. Florianópolis: Edição dos Autores, 2011.
- BARBOSA, E. N. DE F. et al. BARCO AUTÔNOMO. **Mostra Nacional de Robótica**, 2019.
- BIM, E. **Máquinas Elétricas E Acionamento**. 2ª Edição ed. Rio de Janeiro: Elsevier B.V., 2012.
- BISCEGLI, C. I. Conceitos da Física do Ultra-Som. **Instrumentação Agropecuária**, p. 19, 2003.
- BRAGA, N. C. **Relés – Conceitos e Aplicações**. 1. ed. São Paulo: Instituto Newton C. Braga, 2012.
- FERREIRA, R. T. Análise da viabilidade econômica da substituição de banco de baterias: chumbo-ácido x Ni-Cd, considerando diferentes temperaturas ambiente. **SEPOC 2021**, 2021.
- FREIRE, E. O. **Desenvolvimento de um Sistema de Sensoriamento Ultra-Sônico para um Robô Móvel Com Controle Baseado em Agentes**. [s.l.] Universidade Federal do Espírito Santo, 1997.
- GIBSON, I. et al. **Additive manufacturing technologies**. 3ª ed. [s.l.] Springer, 2021. v. 17
- GOON, L. H. et al. Development of Simple Automatic Floor Polisher Robot using Arduino. **International Journal of Engineering Creativity and Innovation**, v. 1, n. 1, p. 17–23, 2019.
- GUNNING, R. A performance comparison of coverage algorithms for simple robotic vacuum cleaners. 2018.
- HART, D. W. **Eletrônica de Potência: Análise e Projetos de Circuitos**. 1ª ed. Porto Alegre: McGraw Hill Brasil, 2016.
- LEITE, D. DE O.; PRADO, R. J. Espectroscopia no infravermelho: uma apresentação para o Ensino Médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 34, 2012.

MORAES, C. C. DE; CASTRUCCI, P. DE L. **Engenharia de Automação Industrial**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

NETO, C. S. C. **Modelagem de um drive do tipo ponte H não ideal utilizando a linguagem Modélica** Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

NICOLLI, N. B. **Carregador rápido de bateria para bateria de íon lítio aplicações automotivas**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

PATEL, D. C.; PATIL, H. S. Development of Arduino Programme Code for Autonomous Smart Vacuum Robot. **International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research (IJETER)**, v. 5, n. 11, p. 120–126, 2017.

PEDRO, B. L. **Sistema de domótica para melhoria da eficiência energética em edifícios**. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2021.

PINTO, D. S. S.; MAZZOCCANTE, G. S.; DA SILVA, K. R. G. Estudo do sensor de proximidade infravermelho para pequenas distâncias e descontinuidades em superfícies planas. **Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia-MG**, p. 4, 2015.

PRUDENTE, F. **Automação Industrial PLC: teoria e aplicações: curso básico**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

PRUDENTE, F. **Automação Predial e Residencial: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

ROSÁRIO, J. M. **Automação industrial**. São Paulo: Baraúna, 2009.

SECCHI, H. A. **Uma introdução aos Robôs Móveis**. San Juan: Traduzido por Núcleo de Estudos em Robótica e Automação – IFES – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, 2012.

SIEGWART, R.; NOURBAKHSI, I. R.; SCARAMUZZA, D. **Introduction to Autonomous Mobile Robots**. 2ª ed. Cambridge: The MIT Press, 2011.

STRIPPOLI, B.; SERNAGLIA, L.; EMMANUEL, J. Automação De Casas E Estabelecimentos Comerciais Através De Microcontroladores: Uma Revisão Da Aplicabilidade Do Arduino. **Revista Tecnológica da Fatec Americana**, v. 08, n. 02, p. 70–80, 2020.

7 APÊNDICES

APÊNDICE A – CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO COMPLETO EMBARCADO NO ARDUINO

```
// Inclusão de uma biblioteca para o sensor ultrassônico
#include <Ultrasonic.h>

// Definição dos pinos trigger e echo do sensor ultrassônico
#define pino_trigger 3
#define pino_echo 2

// Definição dos pinos de controle da ponte H
#define in1 5
#define in2 6
#define in3 10
#define in4 11

// Definição dos pinos de leitura digitais e analógicos do sensor infravermelho
#define pinIRd 13
#define pinIRa A5

// Definição do pino de controle do relé para acionamento do motor de sucção
#define aspirador 12

// Declaração de uma função da biblioteca HCSR04.h que mede a distância lida pelo
sensor ultrassônico
Ultrasonic ultrasonic(pino_trigger, pino_echo);

// Declaração da variável de ponto flutuante que armazena o valor da distância lida
pelo sensor ultrassônico
float dist;

// Declaração da variável inteira digital que armazena o valor lido pelo sensor
infravermelho
bool valorIR = false;

// Declaração das variáveis de tempo de recuo e de giro
int tempoRecuo = 700, tempoGiro = 400;

// Início da rotina de setup de configuração
void setup()
```

```

{
// Definição dos pinos do sensor infravermelho como entrada do Arduino
pinMode(pinIRd, INPUT);
pinMode(pinIRa, INPUT);

// Definição dos pinos da ponte H como saída do Arduino
pinMode(in1, OUTPUT);
pinMode(in2, OUTPUT);
pinMode(in3, OUTPUT);
pinMode(in4, OUTPUT);

// Definição do pino de controle do relé como saída do Arduino
pinMode(aspirador, OUTPUT);

// Motores de tração inicializam desligados
digitalWrite(in1, LOW);
digitalWrite(in2, LOW);
digitalWrite(in3, LOW);
digitalWrite(in4, LOW);

// Motor de Sucção inicializa desligado
digitalWrite(aspirador, HIGH);

delay(3000); //Delay de inicialização
}
// Fim da rotina de setup de configuração

// Início da rotina de loop de funcionamento
void loop()
{
digitalWrite(aspirador, LOW); // Liga o aspirador

// Medição da distância do ultrassônico
dist = ultrasonic.read();

// Medição do valor digital do infravermelho
valorIR = digitalRead(pinIRd);

if ((dist < 10) || (valorIR == true)) // Verificação da medição dos sensores
{
// Início do bloco de recuo do robô e desvio de obstáculos

```

```

// Bloco de acionamento do robô para trás
digitalWrite(in1, LOW);
digitalWrite(in2, HIGH);
digitalWrite(in3, LOW);
digitalWrite(in4, HIGH);
delay(tempoRecuo);

// Bloco de acionamento do robô para esquerda
digitalWrite(in1, LOW);
digitalWrite(in2, HIGH);
digitalWrite(in3, HIGH);
digitalWrite(in4, LOW);
delay(tempoGiro);

// Fim do bloco de recuo do robô e desvio de obstáculos
}
else
{
// Bloco de acionamento do robô para frente
digitalWrite(in1, HIGH);
digitalWrite(in2, LOW);
digitalWrite(in3, HIGH);
digitalWrite(in4, LOW);
}
}
// Fim da rotina de loop de funcionamento
// Fim do programa

```

APÊNDICE B – CÓDIGO DE PROGRAMAÇÃO DA BIBLIOTECA ULTRASONIC.H

```
/*
 * Ultrasonic.cpp
 *
 * Library for Ultrasonic Ranging Module in a minimalist way
 *
 * created 3 Apr 2014
 * by Erick Simões (github: @ErickSimoese | twitter: @AloErickSimoese)
 * modified 23 Jan 2017
 * by Erick Simões (github: @ErickSimoese | twitter: @AloErickSimoese)
 * modified 04 Mar 2017
 * by Erick Simões (github: @ErickSimoese | twitter: @AloErickSimoese)
 * modified 15 May 2017
 * by Eliot Lim (github: @eliotlim)
 * modified 10 Jun 2018
 * by Erick Simões (github: @ErickSimoese | twitter: @AloErickSimoese)
 * modified 14 Jun 2018
 * by Otacilio Maia (github: @OtacilioN | linkedIn: in/otacilio)
 *
 * Released into the MIT License.
 */

#if ARDUINO >= 100
  #include <Arduino.h>
#else
  #include <WProgram.h>
#endif

#include "Ultrasonic.h"

Ultrasonic::Ultrasonic(uint8_t trigPin, uint8_t echoPin, unsigned long timeOut) {
  trig = trigPin;
  echo = echoPin;
  threePins = trig == echo ? true : false;
  pinMode(trig, OUTPUT);
  pinMode(echo, INPUT);
  timeout = timeOut;
}

unsigned int Ultrasonic::timing() {
```

```

if (threePins)
    pinMode(trig, OUTPUT);

digitalWrite(trig, LOW);
delayMicroseconds(2);
digitalWrite(trig, HIGH);
delayMicroseconds(10);
digitalWrite(trig, LOW);

if (threePins)
    pinMode(trig, INPUT);

previousMicros = micros();
while(!digitalRead(echo) && (micros() - previousMicros) <= timeout); // wait for the
echo pin HIGH or timeout
previousMicros = micros();
while(digitalRead(echo) && (micros() - previousMicros) <= timeout); // wait for the
echo pin LOW or timeout

return micros() - previousMicros; // duration
}

/*
 * If the unit of measure is not passed as a parameter,
 * sby default, it will return the distance in centimeters.
 * To change the default, replace CM by INC.
 */
unsigned int Ultrasonic::read(uint8_t und) {
    return timing() / und / 2; //distance by divisor
}

/*
 * This method is too verbal, so, it's deprecated.
 * Use read() instead.
 */
unsigned int Ultrasonic::distanceRead(uint8_t und) {
    return read(und);
}

```