

**UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS DE ERECHIM
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

LUIS AUGUSTO DEBASTIANI

ROBÔ CORTADOR DE GRAMA DE USO RESIDENCIAL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ERECHIM - RS
2022**

LUIS AUGUSTO DEBASTIANI

ROBÔ CORTADOR DE GRAMA DE USO RESIDENCIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.

Orientador: Prof. Cássio Luciano Baratieri

ERECHIM - RS

2022

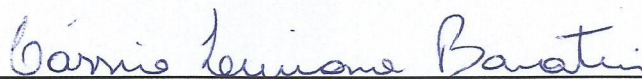
LUIS AUGUSTO DEBASTIANI

ROBÔ CORTADOR DE GRAMA DE USO RESIDENCIAL

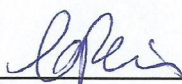
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.

Erechim, 13 de dezembro de 2022.

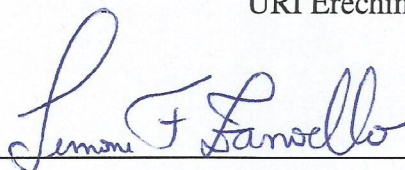
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Cássio Luciano Baratieri (Orientador)
URI Erechim



Prof.^a Ma. Camila Sampaio dos Reis (Examinadora)
URI Erechim



Prof.^a Dra. Simone Fátima Zanoello (Examinadora)
URI Erechim

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Darcisio Debastiani e Rosilene Debastiani e minha irmã Emili Laís Debastiani, por investirem na minha educação, pelo apoio que sempre me deram em toda minha vida, sem vocês eu nunca chegaria aonde cheguei, nem seria quem eu sou. Dedico todo meu esforço e trabalho a vocês.

Agradeço ao professor Dr. Cássio Luciano Baratieri pela orientação neste trabalho e também ao longo de toda minha caminhada acadêmica, por ter acreditado no meu potencial, pelos desafios e oportunidades proporcionados e por todo conhecimento transmitido.

Agradeço ao professor Cláudio Augusto Zakrzewski pela amizade, conversas e conselhos.

Aos funcionários do laboratório, Marciele Schwanke e Mateus Santin pelo apoio com sugestões, críticas construtivas e otimismo ao longo de todo o curso.

À Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim por propiciar um curso com laboratórios de qualidade altamente equipados à disposição dos alunos e também a todos os professores do corpo docente da universidade que contribuíram para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Por fim, agradeço aos amigos e colegas de graduação pelas conversas e ajuda em trabalhos ao longo do curso, as trocas de experiência enriqueceram ainda mais esta jornada.

A incerteza é a mola propulsora da criatividade.

(Marcelo Gleiser)

RESUMO

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um robô cortador de grama de uso residencial. Para isso realizou-se uma revisão de literatura sobre topologias utilizadas na robótica móvel e o desenvolvimento das máquinas automáticas, abrangendo o surgimento dos robôs até os principais cortadores de grama disponíveis no mercado hoje. A partir disso foram encontrados parâmetros de tamanho, peso, largura de corte e autonomia e então foi feita a seleção dos motores, baterias e microcontrolador (ESP32) utilizados na construção do protótipo. Em seguida foi realizado o projeto de controladores PI para o ajuste da velocidade dos motores CC. Nesta etapa adotou-se a ferramenta *PID Tool* do *software* MATLAB à sintonia dos ganhos. Para a alimentação da malha de controle de velocidade, foi desenvolvido um tacômetro do tipo *resolver* para cada motor, utilizando impressora 3D. Em seguida os circuitos foram projetados e simulados no *software* PSIM e partir disso foram desenvolvidas placas eletrônicas para a aquisição de dados dos sensores, controle e acionamento do robô. Por fim foi feita a implementação prática, onde foram conduzidos testes controlando-o por meio de celular via Bluetooth, validando a sua estrutura mecânica, conforme os procedimentos metodológicos. Seu comportamento ao ser controlado remotamente mostrou-se satisfatório, permitindo que diferentes técnicas de controle sejam implementadas em trabalhos futuros.

Palavras-chave: Controlador PI. Motor CC. ESP32. Robótica móvel.

ABSTRACT

This work proposes the development of a robotic lawn mower for residential use. Initially a literature review was carried out on topologies used in mobile robotics and the development of autonomous machines, covering the emergence of robots to the main lawn mowers available in the market today. From this, parameters were found of size, weight, cutting width and autonomy and then the selection of motors, batteries and microcontroller (ESP32) used in the construction of the prototype. Afterwards, the PI controllers for adjusting the speed of DC motors were designed. At this stage, it was adopted the PID Tool of the MATLAB software to tune the gains. To feedback the speed control loop, a resolver type tachometer was developed for each DC motor using a 3D printer. Then the circuits were designed and simulated in the PSIM software and from this electronic boards were developed for data acquisition of the sensors, control and drive of the robot. Finally, the practical implementation was made, where tests were conducted controlling it through a smartphone via Bluetooth, validating its mechanical structure, according to the methodological procedures. Your behavior when remotely controlled proved to be satisfactory, allowing different control techniques to be implemented in future work.

Keywords: PI Controller. DC Motor. ESP32. Mobile Robotics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Topologias de robôs móveis.	18
Figura 2 – Arquiteturas de robôs móveis.	22
Figura 3 – Diagrama de Blocos de um sistema de controle com realimentação.	23
Figura 4 – Circuito motor CC.	29
Figura 5 – Diagrama de Blocos da FT do Motor CC.	30
Figura 6 – Circuito elétrico equivalente do MCCIP.	32
Figura 7 – Circuito elétrico simulado.	33
Figura 8 – Código C utilizado para simulação.	33
Figura 9 – Circuito elétrico projetado.	34
Figura 10 – Módulo Microcontrolador ESP32.	35
Figura 11 – Motor do sistema de tração e movimentação.	36
Figura 12 – Simulação do Resolver.	37
Figura 13 – Driver Ponte H BTS-7960.	38
Figura 14 – Arranjo das células que compõem a bateria.	39
Figura 15 – Sensor Ultrassônico HC-SR04.	40
Figura 16 – Aplicação do Sensor Ultrassônico HC-SR04.	41
Figura 17 – Placa de acionamento e controle.	42
Figura 18 – Placa de aquisição de sinais dos resolvers.	43
Figura 19 – Referenciais inerciais.	44
Figura 20 – Transformação dos referenciais.	45
Figura 21 – Circuito elétrico simulado.	49
Figura 22 – Resposta do motor 1.	49
Figura 23 – Resposta do motor 2.	50
Figura 24 – Controle de velocidade do motor 1.	51
Figura 25 – Controle de velocidade do motor 2.	51
Figura 26 – <i>Resolver</i> desenvolvido.	52
Figura 27 – Placa de aquisição de sinais dos <i>resolvers</i>	53
Figura 28 – Sinais gerados pelo <i>resolver</i>	54
Figura 29 – Sinais do com ruído e filtrados.	54
Figura 30 – Placa de acionamento e controle do robô.	55
Figura 31 – Aplicativo utilizado para os testes.	55
Figura 32 – Primeira versão do protótipo.	57
Figura 33 – Versão final do protótipo.	57
Figura 34 – Versão final do protótipo.	58
Figura 35 – Versão final do protótipo.	58
Figura 36 – Obstáculos em meio a grama.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do robô autônomo a ser construído.....	35
Tabela 2 – Parâmetros dos motores obtidos experimentalmente.....	48
Tabela 3 – Ganhos dos Controladores PI de Velocidade.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	Conversor Analógico/Digital
API	Interface de Programação de Aplicativos
DR	<i>Dead Reckoning</i>
FCEM	Força Contra Eletromotriz
FT	Função de Transferência
IA	Inteligência Artificial
IR	Infravermelho
MCCIP	Motor de Corrente Contínua de Imãs Permanentes
ML	<i>Machine Learning</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PCC	Planejamento de Caminho de Cobertura
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RMR	Robô Móvel com Rodas
RPM	Rotações por Minuto
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i>
US	Ultrassônico

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Coefficiente de Atrito [$N.m.s$]
T_i	Constante de Tempo de Integração
T	Constante de Tempo do Controlador
K	Ganho do Controlador
K_i	Ganho Integral
K_p	Ganho Proporcional
L_a	Indutância de Armadura [H]
J	Momento de inércia [$kg.m^2$]
τ	Período de Amostragem [s]
R_a	Resistência de Armadura [Ω]
E_a	Tensão Contra-eletromotriz de Armadura [V]
ω	Velocidade angular [rad/s]
v_s	Velocidade do Som [m/s]
v	Velocidade linear [m/s]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos	15
1.1.1 Objetivos Específicos	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 Primeiras máquinas automáticas	16
2.2 Definição e Classificação dos Robôs	17
2.3 Topologia de Robôs Móveis	18
2.3.1 Veículos tipo carro	18
2.3.2 Veículos duas rodas	18
2.3.3 Veículos de esteira	19
2.3.4 Veículos omnidirecionais	19
2.3.5 Veículos tipo Hilaré	19
2.4 Robôs cortadores de grama autônomos no mercado hoje	20
2.5 Navegação, Locomoção e Arquiteturas de Controle	20
2.6 Sistemas de Controle	22
2.6.1 Controladores PID	23
2.6.2 Controle Digital	25
2.7 Sensoriamento	27
3 METODOLOGIA	28
3.1 Modelagem matemática do motor CC	28
3.1.1 Função de Transferência do MCCIP	30
3.1.2 Obtenção experimental dos parâmetros	30
3.2 Projeto dos controladores de velocidade	32
3.3 Projeto da placa de acionamento	33
3.4 Materiais	34
3.4.1 Microcontrolador	35
3.4.2 Motor CC	36
3.4.3 Resolver	36
3.4.4 Ponte H	38
3.4.5 Bateria e controlador de carga	39
3.4.6 Sensor Ultrassônico	40
3.4.7 Sensor Infravermelho	41

3.4.8 Sensor de presença	42
3.5 Placas de acionamento e controle	42
3.6 Aplicativo	43
3.7 Modelagem matemática do robô	44
3.7.1 Posição do robô	45
3.7.2 Velocidade do veículo	46
4 RESULTADOS	48
4.1 Ensaios Experimentais	48
4.2 Validação computacional do modelo matemático do MCCIP	48
4.3 Controlador de Velocidade	50
4.3.1 Resolver	52
4.4 Placas de aquisição de sinais e Controle	54
4.5 Aplicativo	55
4.6 Implementação Experimental	56
4.6.1 Sistema de corte	56
4.6.2 Protótipo	56
5 CONCLUSÕES	60
5.1 Perspectivas de continuação do trabalho	60
REFERÊNCIAS	61
APÊNDICES	64

1 INTRODUÇÃO

Robôs são de grande interesse aos humanos devido a diversidade de tarefas que eles são capazes de realizar, seja de forma autônoma ou supervisionada, garantido segurança em atividades de risco e comodidade em tarefas repetitivas. Este é o verdadeiro motivo de produzir robôs: a reprodução de tarefas humanas através de máquinas.

Conforme Martins (2007), a robótica trata-se do estudo multidisciplinar dos sistemas que interagem com o mundo real, seja esta interação com pouca ou mesmo nenhuma intervenção humana.

Apesar de ser um assunto completamente relacionado com as Ciências Exatas, a etimologia da palavra *robótica* está relacionada a uma obra de ficção científica do século XX: a peça teatral "Os Robôs Universais de Rossum", escrita pelo tcheco Karel Čapek em 1920 traz a palavra "robota" descrevendo trabalho forçado. Nesta obra, a palavra é atribuída a máquinas criadas para servir obedientemente a humanidade (SICILIANO; KHATIB, 2016; MATARIC, 2007).

Este assunto é muito abrangente e não se limita às Engenharias Elétrica e Mecânica, mas abrange também a Ciência da Computação, com o uso de Inteligência Artificial e *Machine Learning* para o reconhecimento de pessoas e objetos a sua volta.

O estudo da robótica requer o conhecimento das áreas de microeletrônica, engenharia mecânica e da física (cinemática). Mas outros conhecimentos também são necessários, como a matemática, inteligência artificial e disciplinas informáticas, das quais é possível viabilizar a inteligência dos robôs (MARTINS, 2007).

O crescente surgimento de robôs autônomos que realizam tarefas domésticas, como aspirar pó e cortar grama nos mostra o futuro da tecnologia. Tais máquinas propiciam praticidade nas tarefas que devem ser realizadas com periodicidade, principalmente quando o tempo para realiza-las é tão escasso como nos dias atuais.

Por serem de grande interesse aos humanos devido a diversidade de tarefas que eles são capazes de realizar, estão em constante pesquisa e aprimoramento. É o que comprovam An e Zhang (2022), John et al. (2022), Hazem et al. (2021), Abdi et al. (2021) em suas recentes publicações sobre o tema.

Inserida neste contexto, a presente monografia tem a finalidade de apresentar o desenvolvimento de um robô cortador de grama autônomo para uso residencial, contribuindo para outras pesquisas nas áreas de robótica e controle.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo projetar um robô cortador de grama de uso residencial para a automatização do processo de corte de grama, abrangendo desde o modelo matemático cinemático e dinâmico do sistema até o projeto dos circuitos de controle e potência do robô e desenvolvimento de um protótipo.

1.1.1 Objetivos Específicos

Dos objetivos específicos a serem cumpridos, destacam-se:

- Determinar o modelo dinâmico de um robô móvel;
- Projetar os circuitos de controle e acionamento;
- Desenvolver um protótipo;
- Simular e validar a proposta.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica sobre as primeiras máquinas automáticas e robôs móveis autônomos, bem como sua definição, classificação e diferentes topologias, onde é feita uma comparação entre os modelos cortadores de grama autônomos disponíveis no mercado hoje, obtendo assim as principais características para o desenvolvimento deste trabalho. Ainda, são listados os sensores utilizados e principais arquiteturas de controle.

2.1 Primeiras máquinas automáticas

Os primeiros relatos de máquinas automáticas remetem ao Pombo de Arquitas, mecanismo voador de autopropulsão construído em madeira, acionado por um fluxo de água, criado no século IV a.C. pelo matemático grego Arquitas de Tarento (KAGAN et al., 2020).

No decorrer dos séculos seguintes foram desenvolvidas máquinas automáticas capazes de tocar músicas, apresentar teatro, máquinas de elevação de água e humanoides movidas a energia hidrelétrica por Al-Jazari em meados de 1200, além dos projetos de Leonardo da Vinci (1500). No século XVIII o desenvolvimento de autômatos tomou conta na Europa e na Ásia (SICILIANO; KHATIB, 2016).

A substituição de máquinas mecânicas por máquinas elétricas (motores) e eletrificação dos processos permitiu o controle remoto de máquinas, como demonstrou Nikola Tesla (1856 – 1943), inventor sérvio-americano muito conhecido pelo grande número de patentes registradas na área da energia elétrica e corrente alternada (responsável pela invenção do motor de indução trifásico, presente em todas as fábricas do mundo hoje) (KAGAN et al., 2020).

De acordo com Tzafestas (2014), o desenvolvimento e patente do primeiro braço robótico multi juntas por George Devol Jr. em 1954 deu início ao período da robótica industrial. Em 1956, juntamente com Joseph Engelberger fundaram a primeira companhia de robôs do mundo, a Unimation (junção das palavras “universal” e “automation”). Foi também neste período que iniciaram as pesquisas sobre Inteligência Artificial, conectando a inteligência humana às máquinas (SICILIANO; KHATIB, 2016).

A partir do século XXI a robótica passou por grandes transformações, devido ao amadurecimento das tecnologias utilizadas.

Evoluindo do meio industrial, a robótica passou a se expandir também para as tarefas humanas simples, onde inicia-se o desenvolvimento de uma geração de robôs domésticos Siciliano e Khatib (2016), o qual é o foco deste trabalho.

2.2 Definição e Classificação dos Robôs

A Enciclopédia Britânica apresenta a seguinte definição para a palavra "robô": "Qualquer máquina operada automaticamente que substitua o esforço humano, embora pode não se assemelhar a seres humanos em aparência ou funções pré-formadas em uma maneira humana". Já Cicolani (2018), define um robô como "uma tecnologia que aplica lógica para realizar uma tarefa de maneira automatizada".

Ambas definições são muito amplas, dando a idéia de que até mesmo um eletrodoméstico pode ser um robô, já que ele executa tarefas de forma automática a fim de substituir o esforço humano.

Desta forma, será utilizada neste trabalho a definição de Mataric (2007, p. 2): "Um robô é um sistema autônomo que existe no mundo físico, pode sentir o ambiente ao seu redor, e pode agir sobre ele para atingir alguns objetivos."

A partir desta definição mais restrita é possível fazer uma classificação dos tipos de robôs.

Conforme Riascos (2010) esta classificação está relacionada com a autonomia do seu sistema de controle, mobilidade da base, estrutura cinemática, forma de acionamento, graus de liberdade, geometria do espaço de trabalho, entre outros.

- De acordo com o sistema de controle: um robô autônomo possui um sistema de controle com certo grau de autonomia para comandar os diversos graus de liberdade, para que possa cumprir uma determinada tarefa que lhe foi conferida (MUNHOZ, 2017).
- De acordo com a mobilidade da base: quanto a sua base, os robôs podem ser móveis ou fixos. Os robôs fixos estão muito presentes no meio industrial. Os robôs móveis costumam ser utilizados no auxílio de tarefas domésticas, e podem ser aéreos, terrestres ou aquáticos.
- De acordo com a sua estrutura cinemática: podem ser paralelos, operando entre 3 a 6 graus de liberdade ou seriais, apresentando movimento em coordenadas cartesianas, cilíndricas, esféricas, ou ainda movimento articulado e do tipo SCARA (RIASCOS, 2010).
- De acordo com seus graus de liberdade: robôs que articulam braços possuem graus de liberdade que classificam a forma como podem se movimentar. Para que um robô possa posicionar uma ferramenta no espaço, ele precisa de 6 graus de liberdade, 3 para definir a posição e 3 ângulos de rotação para definir a orientação (MUNHOZ, 2017).

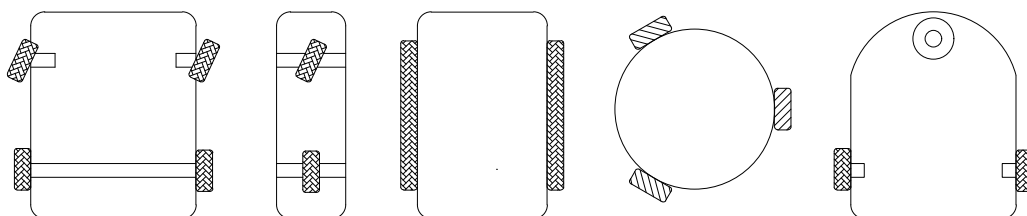
Robôs móveis costumam ser utilizados na realização de tarefas do dia a dia, auxiliando o ser humano a fim de poupar tempo, como ocorre com aspiradores de pó e cortadores de grama,

ou no auxílio em atividades complexas, como na agricultura, tratamento de materiais tóxicos e exploração espacial (MOREIRA, 2021). Robôs que desempenham tarefas domésticas são chamados de robôs de serviço e podem ser utilizados para cortar a grama, limpar a casa e até mesmo locomoção de pessoas deficientes (cadeira de rodas) (BARBOZA, 2017).

2.3 Topologia de Robôs Móveis

A seguir são apresentadas cinco topologias de robôs móveis (figura 1), que relacionam a posição das rodas de tração e direção do veículo com suas diferentes aplicações.

Figura 1 – Topologias de robôs móveis.



Fonte: Adaptado de Kagan et al. (2020)

2.3.1 Veículos tipo carro

Conforme o próprio nome sugere, estes robôs apresentam uma configuração similar aos carros, onde apresentam quatro rodas dispostas em dois eixos, sendo as duas rodas frontais responsáveis pela direção e as duas rodas traseiras responsáveis apenas pela sustentação do veículo, podendo ou não apresentar tração (KAGAN et al., 2020).

Para esta direção funcionar corretamente, é preciso que o ângulo das rodas esteja em consonância a Geometria de Ackermann, arranjo geométrico patenteado por Rudolph Ackermann em 1817. É proposto que, para que o veículo gire sem escorregar, o ângulo entre a roda interna em relação ao eixo traseiro deve ser maior que o ângulo da roda externa com o eixo traseiro.

2.3.2 Veículos duas rodas

Estes veículos são semelhantes a bicicletas, apresentando apenas duas rodas dispostas sobre um mesmo eixo. São úteis para aplicações que requerem boa manobrabilidade devido a sua pequena seção transversal. Porém, para que se equilibrem sobre as duas rodas, é necessário um

sistema de controle contínuo, que exige maior processamento do sistema embarcado e também maior consumo de energia (KAGAN et al., 2020).

2.3.3 Veículos de esteira

Veículos com esteiras (popularmente conhecidas como “lagartas”) são ideais para terrenos acidentados, o que faz com que sejam usados em tanques de guerra e máquinas de terraplanagem, ambos veículos que trafegam por terrenos irregulares. Sua vantagem é que o sistema de tração tem muito contato com o solo, o que faz com que o veículo mesmo sendo muito pesado não afunde (já que a força é distribuída pela área das lagartas), além de garantir bastante atrito com o chão, evitando ao máximo o escorregamento (KAGAN et al., 2020).

No entanto, estas vantagens acabam consumindo mais energia para o deslocamento e a modelagem deste tipo de veículo não é simples.

2.3.4 Veículos omnidirecionais

O prefixo “omni” define estes veículos como sendo capazes de se deslocarem em todas as direções de um plano. Mais do que isso, pelo seu formato circular, conseguem rotacionar em torno do seu próprio eixo. Apresentam rodas especiais (*Mecanum* ou *suecas*) que possuem roletes inclinados a 45° (KAGAN et al., 2020).

Apesar da alta flexibilidade para locomoção, este sistema exige um controle mais aprimorado, além do custo deste tipo de rodas ser superior a rodas comuns.

2.3.5 Veículos tipo Hilare

A configuração do tipo Hilare (também conhecida como direção diferencial) costuma ser bastante usada em robôs móveis, principalmente pela sua simplicidade. Esta topologia utiliza dois motores independentes, um para cada roda traseira. Ambos são responsáveis pela tração e direção do robô. A terceira roda tem a única finalidade de equilibrar o sistema, muitas vezes chamada de “roda boba”, já que ela não tem controle (KAGAN et al., 2020).

A família Hilare trouxe um avanço revolucionário na robótica móvel. Foi desenvolvida no LAAS (Laboratoire d’Automatique et d’Analyse des Systèmes) de 1977 a 1992 (KAROL, 2016).

Os robôs diferenciais apresentam uma estrutura formada por duas rodas sobre um mesmo

eixo que são controladas de maneira independente, apresentando uma terceira roda que lhes confere estabilidade. O Robô Diferencial é, em geral, o mais utilizado pelos pesquisadores a fim experimentar novas estratégias de controle por possuir uma cinemática simples (MOREIRA, 2021).

2.4 Robôs cortadores de grama autônomos no mercado hoje

A fim de contextualizar este trabalho com modelos já existentes no mercado, foi realizada uma pesquisa dos principais cortadores de grama autônomos presentes no mercado mundial hoje.

Foram selecionados modelos vendidos no Brasil e modelos vendidos no exterior. A pesquisa foi realizada no decorrer do mês de abril de 2022 e portanto os valores foram convertidos de Euro para Real conforme a cotação na data. Os parâmetros levantados são apresentados na tabela A.1 do Apêndice A.

2.5 Navegação, Locomoção e Arquiteturas de Controle

A movimentação autônoma de um robô se dá através de um algoritmo dentro do microcontrolador, que foi anteriormente pensado por um ser humano. Assim, o robô segue uma sequência de passos para cumprir a tarefa que lhe foi determinada. Um algoritmo mais complexo permite que o robô faça tarefas de forma tão autônoma quanto um ser humano, enquanto um nível menor de complexidade faz com que o robô autônomo necessite de acompanhamento humano em suas tarefas.

O algoritmo do microcontrolador, que é executado muitas vezes em um único segundo segue um modelo genérico, composto pelas etapas de percepção, planejamento e atuação, conforme proposto por Romero et al. (2014). Assim, a todo momento o robô coleta dados do ambiente através dos sensores, decide o que fazer com estas informações e então atua conforme o algoritmo estabelecido.

Karol (2016, p. 35) define um Robô Móvel com Rodas (RMR) "um veículo autônomo com rodas que pode operar sem assistência humana". Para tal funcionalidade, apresentam sensores e atuadores, para que possam ter uma percepção do ambiente e ação sobre o mesmo.

Assim, a locomoção de um RMR pode ser feita de muitas maneiras pelo espaço: de forma aleatória, com rotas planejadas, guiado por um sistema de GPS, controlado remotamente, guiado por Inteligência Artificial, entre outras técnicas. A ação de fazer o robô percorrer uma trajetória a fim de alcançar um objetivo é conhecida na literatura através do termo "*navigation*"

(do inglês, "navegação"), de forma a estabelecer o controle exercido sobre o robô para que ele execute a sua tarefa sem colidir com obstáculos ou ferir pessoas e animais. Junto a ela está a ação de "*tracking*", ou seja, o rastreamento da trajetória a ser percorrida.

Conforme Pandey (2017), a tarefa de navegação é essencial na área da robótica móvel e pode ser classificada em dois tipos: Navegação Global e Navegação Local.

A navegação Local é baseada em dados adquiridos de sensores e sobre estes dados é aplicado um método de controle. Esta técnica é utilizada quando são necessárias respostas rápidas, como por exemplo quando o robô encontra um obstáculo. No entanto, este método apresenta falhas quando existem obstáculos móveis no sistema. São utilizados métodos de Controle Moderno muitas vezes combinados com Inteligência Artificial (IBRAHIM; FERNANDES, 2004; PANDEY, 2017).

Romero et al. (2014) atribui à navegação local o conceito de reatividade, que está associada com a reação a estímulos do ambiente ao seu redor (estímulos locais). Os sensores informam como é o mundo externo e o robô obedece uma sequência de condições (que foram previamente programadas). Por exemplo, "se" não há obstáculos "então" avançar. "Se" detectar presença humana "então" parar o movimento, sempre agindo de maneira condicional.

Principais Algoritmos de Navegação Local:

- *Vector Field Histogram* (Histograma de campo vetorial);
- *Dynamic Window Approach* (Abordagem de Janela Dinâmica - DWA);
- *Agoraphilic Algorithm* (Algoritmo Agoraphilic);
- *Rule-Based Methods* (Métodos Baseados em Regras);
- *Rules Learning Techinques* (Técnicas de Aprendizagem de Regras);
- *Neural Networks* (Redes Neurais);
- Lógica Fuzzy e Neuro Fuzzy;
- *Particle Swarm Optimization* (Otimização por Enxame de Partículas);
- *Genetic Algorithm* (Algoritmo Genético - GA);
- *Ant Colony Optimization* (Otimização de Colônia de Formigas).

Já a navegação global analisa o objetivo do robô de forma ampla e identifica caminhos para o robô seguir (IBRAHIM; FERNANDES, 2004). Para Gul, Rahiman e Alhady (2019), a Navegação Global exige conhecimento prévio do ambiente a ser percorrido. Esta técnica também é conhecida como "planejamento de rota *offline*".

Conforme Romero et al. (2014), que chama este processo de "deliberativo", a tomada de decisões do robô é baseada num modelo interno do mundo, ou seja, o "mapa" do ambiente foi

posteriormente inserido em sua programação e assim ele segue uma sequência de passos para cumprir seu objetivo. Se acontecer algo no meio do percurso que não havia sido previamente informado (como por exemplo uma pessoa surgir na frente do robô) ele precisa parar e recalcular os seus passos.

No planejamento de rota *offline*, o robô tem informações completas do ambiente sem o auxílio de sensores (GUL; RAHIMAN; ALHADY, 2019).

Principais Algoritmos de Navegação Global:

- Algoritmo de Dijkstra;
- Algoritmo A*;
- Gráfico de Visibilidade;
- *Artificial Potencial Field* (Campo Potencial Artificial - APF);
- *Cell Decomposition Method* (Método de Decomposição Celular);
- *Search Trees* (Árvores de Busca);
- Técnicas Probabilísticas.

Entre os extremos da deliberação e reatividade existem ainda as arquiteturas híbridas, que apresentam uma mistura das características, o que proporciona uma maior liberdade ao robô (e portanto maior complexidade no algoritmo).

Na figura 2 é possível ver um resumo das arquiteturas.

Figura 2 – Arquiteturas de robôs móveis.



Fonte: Adaptado de Romero et al. (2014)

2.6 Sistemas de Controle

Conforme Kim (2017), controladores PID são muito utilizados no controle de velocidade de motores CC. Assim, para obter domínio total sobre o comportamento dos motores é projetado

um sistema de controle de velocidade em malha fechada. Isto quer dizer que a todo momento o controlador é realimentado com informação sobre a posição e velocidade das rodas, a fim de estabelecer um controle preciso sobre o sistema. Para Ogata (2012), um sistema em malha aberta pode sofrer alterações, e dependendo das condições em que a planta estiver, acaba inviabilizando a aplicação deste tipo de controle.

O controle clássico baseia-se em funções de transferência de sistemas lineares e invariantes no tempo, com uma entrada e uma saída (Sistemas SISO). A função de transferência (FT) é convertida para o domínio da frequência através da Transformada de Laplace.

Conforme Bampi (2019), uma função de transferência de um sistema em malha fechada é expressa por:

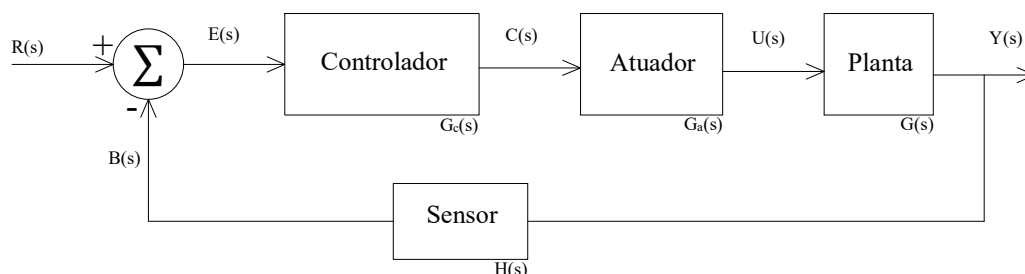
$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (2.1)$$

onde a relação *saída/entrada* apresenta $G(s)$ como a FT direta da planta a ser controlada (neste caso o MCCIP) e $H(s)$ é a realimentação do sistema.

2.6.1 Controladores PID

Um sistema de controle clássico muito utilizado é o Proporcional Integral Derivativo (PID). Um controlador PID compara o valor da saída da planta com a referência (bloco somador da figura 3), resultando no chamado "erro", e então o corrige multiplicando, integrando e/ou derivando de forma suave, aproximando o erro a zero e, portanto, levando a saída a um valor igual ou muito próximo da referência desejada.

Figura 3 – Diagrama de Blocos de um sistema de controle com realimentação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como o desempenho do controlador depende dos ganhos, é muito importante seleccionar os valores apropriados para obter um desempenho satisfatório no sistema (KIM, 2017).

Este processo de escolha dos parâmetros para o controlador atuar com o desempenho projetado é chamado de "sintonia do controlador" (OGATA, 2012).

A sigla PID pode remeter a formas reduzidas desta topologia de controlador, como por exemplo Proporcional Integral (PI) ou Proporcional Derivativo (PD), ou ainda, apenas Proporcional (P). Isso porque cada caso requer um controlador específico, não necessariamente utilizando o termo derivativo ou integral, por exemplo.

Conforme Nise (2017), Nicholas Minorsky, russo nascido em 1885 é responsável pela maior parte da teoria geral utilizada atualmente para melhorar o desempenho dos sistemas de controle automático. A partir do seu desenvolvimento teórico sobre a condução automática de navios é que foram desenvolvidos os controladores PID, também chamados de controladores de três modos.

Uma das maiores vantagens na utilização de controladores PID é que é possível ajustar os ganhos empiricamente através de simulações, escolhendo os melhores valores para a aplicação conforme a resposta do sistema (OGATA, 2012). Devido a grande utilização deste tipo de controlador a teoria sobre o assunto hoje já está bastante difundida, o que o torna fácil e seguro de ser aplicado. Eles podem ser implementados na forma digital, que utiliza um espaço de processamento muito pequeno do *hardware*, ou pode ainda ser implementando analogicamente, por meio de circuitos integrados, amplificadores, resistores e capacitores.

A função de transferência de um controlador PID pode ser expressa na forma ideal/não interativa (equação (2.2)) ou na forma paralela (equação (2.3)).

$$C_i(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right). \quad (2.2)$$

Na forma ideal, K_p representa o ganho proporcional, T_i representa a constante de tempo de integração e T_d é a constante de tempo de derivação.

$$C_p(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s. \quad (2.3)$$

Na forma paralela, K_i e K_d representam os ganhos de integração e derivação, respectivamente.

De acordo com Franklin, Powell e Emami-Naeini (2013), "quando o sinal de controle realimentado é linearmente proporcional ao erro do sistema, chamamos o resultado de realimentação proporcional". Isto quer dizer que o termo Proporcional (P) multiplica o sinal de erro por um ganho constante, fazendo com que o controlador PID produza uma resposta de controle proporcional a amplitude do erro. Como o sinal de erro aumenta, o controlador aplica um sinal maior para corrigir o erro.

Embora o efeito do termo P reduza o valor do erro com o passar do tempo, seu efeito

também tende a diminuir. Na maioria dos casos, o controlador P aproxima o erro de um valor próximo de zero, no entanto, não consegue extingui-lo (não converge).

Este erro de estado estacionário remanescente, que precisa ser zerado de alguma forma, fica dependente do controlador Integral (I). Ele é utilizado para eliminar este tipo de erro remanescente no regime permanente. O integrador calcula a soma total do sinal de erro dentro de um determinado período. Desta forma, um pequeno erro de regime permanente se torna um grande valor no decorrer do tempo. Este grande erro é multiplicado por um ganho I (sempre menor que 1) e esta é a saída do controlador.

O terceiro termo, diferencial (D), é incluído para aumentar a velocidade do controlador. Ele responde a taxa de variação do sinal de erro. É calculado subtraindo-se o valor do erro presente por um valor anterior. Este valor obtido é multiplicado por um ganho D, resultando na saída do controlador. Assim, o termo D aumenta a precisão do controlador para alterações rápidas no sistema. Para Franklin, Powell e Emami-Naeini (2013), a importância deste termo está na suavização que ele produz na resposta, devido a sinais instantâneos. No entanto, a maioria dos controladores PID apresenta apenas a estrutura PI, como é o caso utilizado neste trabalho, já que será estabelecido o controle sobre uma máquina que por conta de sua característica dinâmica, apresenta uma característica de dinâmica lenta.

2.6.2 Controle Digital

Um sinal em tempo contínuo pode ser processado, a partir de suas amostras, por um sistema que opere em tempo discreto. Para isso, é importante manter a taxa de amostragem do sinal suficientemente alta para permitir a reconstrução sem erro (ou com um erro dentro de uma dada tolerância) do sinal original (LATHI, 2007).

O surgimento do cálculo integral e diferencial no século XVII possibilitou que os cientistas e engenheiros representassem fenômenos físicos por meio de equações diferenciais, com funções de variáveis contínuas.

No entanto, a representação de tais sistemas contínuos em sistemas digitais ocorre de uma forma diferente. Isso porque todo sistema digital opera em níveis distintos de tensão, chamado de binário, ou seja, existem apenas dois modos de operação: ligado ou desligado. Além disso, os microcontroladores (e todo sistema digital que apresente processamento de dados) trabalha de forma amostrada: cada operação ocorre de forma proporcional aos ciclos de *clock*. Em um microcontrolador com um cristal de 40 MHz, por exemplo, isso representa um pulso a cada 25 nano segundos.

Conforme Oppenheim e Schafer (2013), até o início da década de 1950, o processamento de sinais era feito com sistemas analógicos implementados com circuitos eletrônicos ou ainda com dispositivos mecânicos.

Neste trabalho é utilizado o processamento digital, portanto, é necessário transformar os controladores PI para a forma discretizada, a fim de implementar em código dentro do microcontrolador, para que ele opere conforme simulado.

Bampi (2019) apresenta métodos de discretização comumente utilizados. São eles: método de Euler (*forward difference*), Diferencial (*backward difference*), Retentor de Ordem Zero (*Zero Order Hold (ZOH)*) e Tustin (bilinear). Para a implementação em sistemas digitais, o método de Tustin apresenta boa estabilidade do sistema e é feito conforme:

$$s = \frac{2(z-1)}{\tau(z+1)} \quad (2.4)$$

Assim, aplicando a Transformada Bilinear de Tustin (2.4) no controlador PI na forma paralela (2.3), obtém-se:

$$C(z) = \frac{K \left(1 + \frac{2}{\tau} \left(\frac{z-1}{z+1} \right) T \right)}{\frac{2}{\tau} \left(\frac{z-1}{z+1} \right) T} \quad (2.5)$$

A partir disso é obtida a equação de diferenças (equação (2.6)) e a recursividade (equações (2.7) e (2.8)) a serem implementadas no microcontrolador:

$$y[n] = y[n-1] + \alpha x[n] + \beta x[n-1] \quad (2.6)$$

$$y[n-1] = y[n] \quad (2.7)$$

$$x[n-1] = x[n] \quad (2.8)$$

onde α e β são valores constantes, calculados a partir dos ganhos K e T, além do período de amostragem, τ , sendo

$$\alpha = \frac{K(\tau s + 2T)}{2T} \quad (2.9)$$

e

$$\beta = \frac{K(-2T + \tau s)}{2T} \quad (2.10)$$

2.7 Sensoriamento

Para que um robô possa se movimentar de forma autônoma em um ambiente, é necessário que ele receba informações do mundo ao seu redor e também de si mesmo. Esta é a função dos sensores, comumente chamados de "transdutores", que de acordo com Murphy (2000) transformam a energia associada com uma dada medida em outra forma de energia. Isso porque um sensor recebe energia que pode ser nas formas de som, pressão, luz, e a transforma em um sinal analógico ou digital a ser utilizado pelo microcontrolador.

Os sensores são classificados de diferentes maneiras: de acordo com o método de medição, eles podem ser classificados como passivos ou ativos (ROMERO et al., 2014). De acordo com a origem das medidas Siegwart e Nourbakhsh (2004) dividem os sensores em apenas duas classes: proprioceptivos e exteroceptivos.

Sensores ativos emitem pulsos de energia no ambiente e realizam estimativas a partir da energia retornada. Exemplos desses sensores são os sonares e o sensor a *laser*. Já os sensores passivos realizam medidas a partir das informações do ambiente, como temperatura e luminosidade. Exemplos desse tipo de sensor são câmeras e sensores de temperatura. Os sensores proprioceptivos realizam medidas dos parâmetros internos do robô, como a sua carga de bateria, giro das rodas, enquanto os sensores exteroceptivos (ou extraceptivos), obtêm informações sobre o ambiente onde o robô está inserido (ROMERO et al., 2014).

3 METODOLOGIA

O presente trabalho classifica-se, visto sua natureza, como pesquisa aplicada de caráter teórico e prático. Nele, os procedimentos metodológicos obedecem às seguintes etapas: modelagem matemática de um MCCIP, Função de Transferência, obtenção experimental de parâmetros, modelagem da planta e malhas de controle, projeto do controlador PI e materiais para controle e acionamento dos motores.

3.1 Modelagem matemática do motor CC

Um motor elétrico é um dispositivo eletromecânico que converte energia elétrica em torque mecânico (KIM, 2017). Neste processo, absorve potência elétrica entregando torque e velocidade. Por este motivo a modelagem matemática do motor elétrico resulta em duas equações, elétrica e mecânica.

De acordo com Bim (2012), as máquinas de corrente contínua já apresentavam bom desempenho desde final do século XIX. Entre 1831 e 1851 foram desenvolvidas as primeiras máquinas com utilização de ímãs permanentes.

Neste trabalho, optou-se pelo uso de motores de corrente contínua de ímãs permanentes devido a facilidade de controle de velocidade e posição. Além disso, o torque que estes motores são capazes de entregar é o suficiente para sua aplicação.

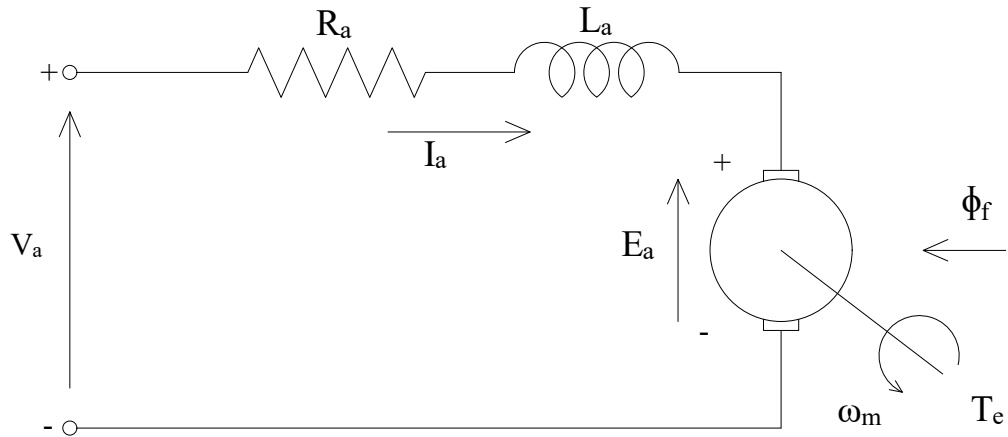
O funcionamento de todo motor elétrico é baseado nas forças eletromagnéticas que surgem quando uma corrente circula por suas bobinas. Os motores utilizados neste trabalho apresentam apenas bobinas de armadura (rotor) enquanto o enrolamento de campo é substituído por ímãs que fornecem um fluxo magnético constante, não sendo necessário uma fonte de excitação para o enrolamento do estator, como ocorre em máquinas CC de maior potência.

Conforme Kim (2017), este tipo de motor só pode ser controlado de duas formas: através da variação da sua tensão de armadura ou da corrente de fluxo magnético. É citada ainda a variação da resistência da armadura (R_a), no entanto este método é ineficiente e obsoleto.

A tensão de armadura é proporcional a velocidade no eixo, enquanto a corrente é proporcional ao torque que o motor é capaz de proporcionar. Como os motores adquiridos para este trabalho apresentam torque suficiente e não estarão deslocando uma carga elevada, apenas o controle de velocidade será exercido sobre eles.

A figura 4 representa o circuito elétrico equivalente de um MCCIP. A partir deste circuito é possível determinar a equação que modela o circuito elétrico.

Figura 4 – Circuito motor CC.



Fonte: Adaptado de Kim (2017).

Conforme a Lei de Kirchhoff das Tensões, o somatório das quedas de tensão sobre cada componente de um circuito elétrico é igual ao valor de tensão aplicada a ele:

$$V_a(t) = R_a \cdot I_a(t) + L_a \cdot \frac{d}{dt} I_a(t) + E_a(t) \quad (3.1)$$

onde V_a é a tensão aplicada, I_a a corrente de armadura, R_a a resistência de armadura, L_a a indutância de armadura e E_a é a força contra-eletromotriz induzida (FCEM).

Para fins práticos, a queda de tensão nas escovas (da ordem de 1 V para estas máquinas) será desprezada, já que a sua compensação pode ser feita através do controlador PI a ser implementando, ao inserir um distúrbio na malha de controle.

A FCEM pode ser calculada através da velocidade do motor (ω_m):

$$E_a = k_e \cdot \phi \cdot \omega_m \quad (3.2)$$

onde k_e é a constante da FCEM, ϕ é o fluxo magnético proveniente dos ímãs (portanto constante) e ω_m a velocidade mecânica do rotor. O torque obtido do motor está diretamente relacionado com o fluxo magnético ϕ e a corrente I_a . A constante construtiva k_t apresenta valor igual a k_e .

$$T_e = k_t \cdot \phi \cdot I_a \quad (3.3)$$

Conforme (KIM, 2017), para uma condição de regime permanente é possível calcular a velocidade da seguinte forma:

$$\omega_m = \frac{V_a}{k \cdot \phi_f} - \frac{R_a \cdot T_L}{(k \cdot \phi_f)^2} \quad (3.4)$$

3.1.1 Função de Transferência do MCCIP

Aplicando a Transformada de Laplace na equação (3.1), temos o comportamento do motor no domínio da frequência:

$$V_a(s) = R_a \cdot I_a(s) + L_a \cdot s \cdot I_a(s) + E_a(s) \quad (3.5)$$

substituindo E_a pela equação (3.2), obtém-se:

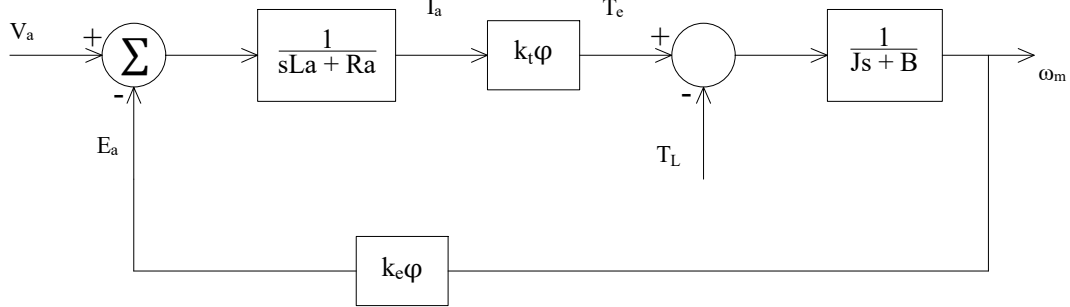
$$V_a(s) = (R_a + s \cdot L_a) I_a(s) + k_e \cdot \phi \cdot \omega_m(s) \quad (3.6)$$

Assim é possível obter a Função de Transferência do MCCIP onde é feita a relação entre a entrada do sistema (V_a) e a saída do sistema (ω_m):

$$\frac{\omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{\frac{k}{J \cdot L_a}}{s^2 + \left(\frac{R_a}{L_a} + \frac{B}{J}\right)s + \left(\frac{R_a \cdot B}{L_a \cdot J} + \frac{k^2}{J \cdot L_a}\right)} \quad (3.7)$$

O Diagrama de Blocos da Função de Transferência pode ser observado na figura 5.

Figura 5 – Diagrama de Blocos da FT do Motor CC.



Fonte: Adaptado de Kim (2017).

3.1.2 Obtenção experimental dos parâmetros

Para a simulação da função de transferência em *software* matemático, faz-se necessário conhecer os parâmetros dos motores: R_a , L_a , J , B e K . Para isto foram utilizados medidor RLC Minipa MC-155, multímetro digital Fluke 117, tacômetro digital Minipa MDT-2238B e fonte de tensão 32 V Minipa.

O valor de R_a pode ser obtido de diversas maneiras: de acordo com Bampi (2019),

aplicando uma tensão no motor (abaixo do seu valor nominal) com o rotor bloqueado por alguns segundos (para não queimar o enrolamento por aquecimento). Medindo a corrente e aplicando a Lei de Ohm, temos $R_a = \frac{V_a}{i_a}$. No entanto, existe uma diferença entre a tensão aplicada no terminais do motor e a tensão recebida pela armadura, já que ocorre uma queda de tensão no contato entre as escovas de carvão e o comutador. Para mitigar este problema, o motor foi desmontado, sendo assim possível acessar os terminais do comutador e verificar a resistência com um multímetro.

A indutância de armadura L_a pode ser obtida da mesma forma que a resistência de armadura, desta vez com auxílio de um medidor LCR.

Com o rotor a vazio, é possível calcular a constante de força contra-eletromotriz (K_e), com base na equação (3.8).

$$K_e = \frac{V_a - I_a R_a}{\omega_m} \quad (3.8)$$

A velocidade do eixo foi medida com tacômetro óptico, que apresenta os valores em RPM. Assim, é necessário a multiplicação deste valor por $\frac{2\pi}{60}$ para obter o valor de *rad/s*.

O coeficiente de atrito (B), por sua vez, é calculado na equação (3.9) utilizando a equação (3.8). O motor acionado o vazio requer um torque mínimo para suprir o atrito existente nos rolamentos e mancais. Assim, o torque a vazio está diretamente relacionado com o atrito.

$$B = \frac{K_e \cdot I_a}{\omega_m} \quad (3.9)$$

A relação entre o momento de inércia e o coeficiente de atrito é igual ao circuito RL. Assim, encontrando a constante de tempo mecânica τ_m , é possível calcular o valor de J .

$$\tau_m = \frac{J}{B} \quad (3.10)$$

O momento de inércia (J) da máquina representa a força necessária para tirar o rotor de um estado inercial e colocá-lo em movimento. Para um motor sem carga mecânica associada ao seu eixo, basta calcular a relação entre a massa e dimensões do rotor, já que de acordo com Halliday, Resnick e Walker (2016), o momento de inércia de um corpo em rotação não envolve apenas a massa do corpo, mas também a forma como a massa está distribuída.

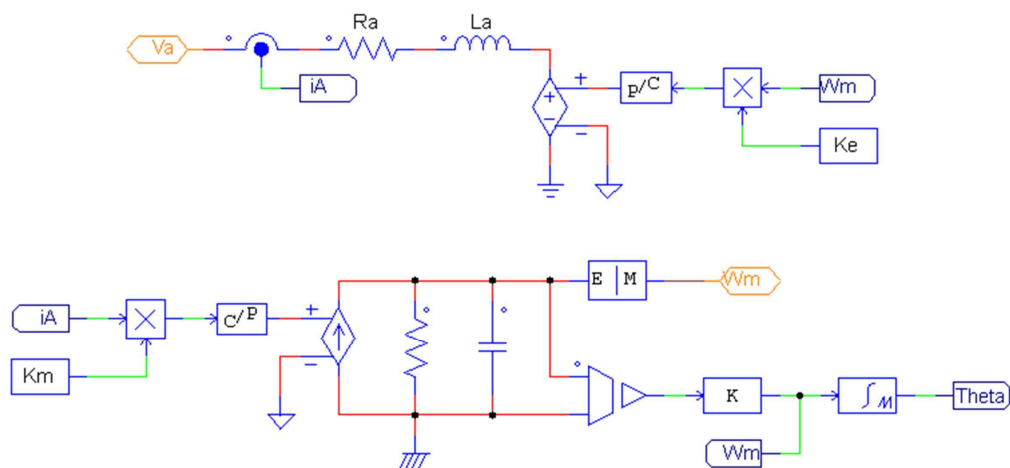
Assim, o momento de inércia pode ser obtido alimentando o motor a vazio por alguns segundos. Ao remover a sua alimentação e ler a corrente com o osciloscópio é possível encontrar o valor aproximado da constante de tempo mecânica, ou seja, o tempo que o motor leva para parar de girar depois que for desenergizado.

3.2 Projeto dos controladores de velocidade

Com a Função de Transferência e os parâmetros dos motores é possível projetar o circuito elétrico no *software* PSIM para simular o comportamento dos motores e projetar os controladores de velocidade.

Assim, de acordo com Bampi (2019), a modelagem da planta será válida se, e somente se, o comportamento obtido nos ensaios for reobtido na simulação do modelo. Para isto, foi projetado um circuito elétrico equivalente do MCCIP (figura 6), contendo suas características elétricas e mecânicas. Em seguida este circuito foi simulado juntamente com um diagrama de blocos obtido a partir da FT.

Figura 6 – Circuito elétrico equivalente do MCCIP.



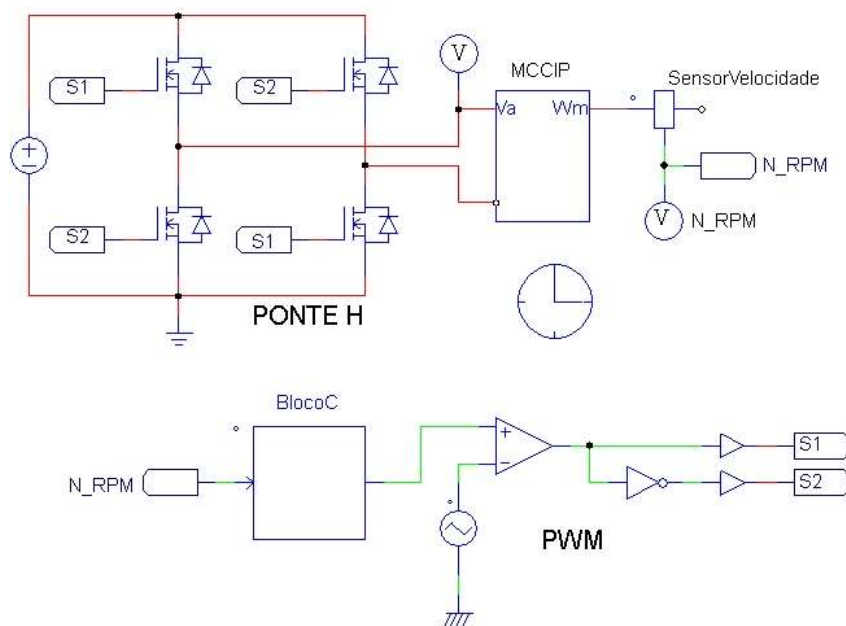
Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o objetivo de controlar a velocidade do motores, dois controladores PI foram projetados. O ajuste dos ganhos do controlador PI foi feito através da ferramenta *PID Tuner*, disponível no *software* MATLAB, de modo a sintonizar os ganhos para uma banda passante de 2 Hz.

Por se tratar de um controle digital, conforme tratado na seção 2.5.2, os controladores foram discretizados através do método de Tustin a uma frequência de 5 kHz também utilizando o MATLAB, a fim de implementar as equações de diferenças em microcontrolador.

Desta forma, foi possível simular o circuito da figura 7, a fim de validar o controlador de cada motor antes da implementação experimental.

Figura 7 – Circuito elétrico simulado.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A implementação do código discretizado no Bloco C pode ser vista na figura 8 a seguir, onde é apresentada a equação de diferenças utilizada no motor 1.

Figura 8 – Código C utilizado para simulação.

```
static double timer = 0.0002;
static double u = 0, u_nm1 = 0, e = 0;
static double e_nm1 = 0, saida = 0;
static double N_ref = 50, N_in = 0;
if(timer >= 0.0002){
    N_in = in[0];
    e = Nref - N_in;
    u = 0.01899*e_nm1 - 0.01846*e + u_nm1;
    u_nm1 = u;
    e_nm1 = e;
    saida = u/12;
    timer = 0;
}
timer = timer + delt;
out[0] = saida;
```

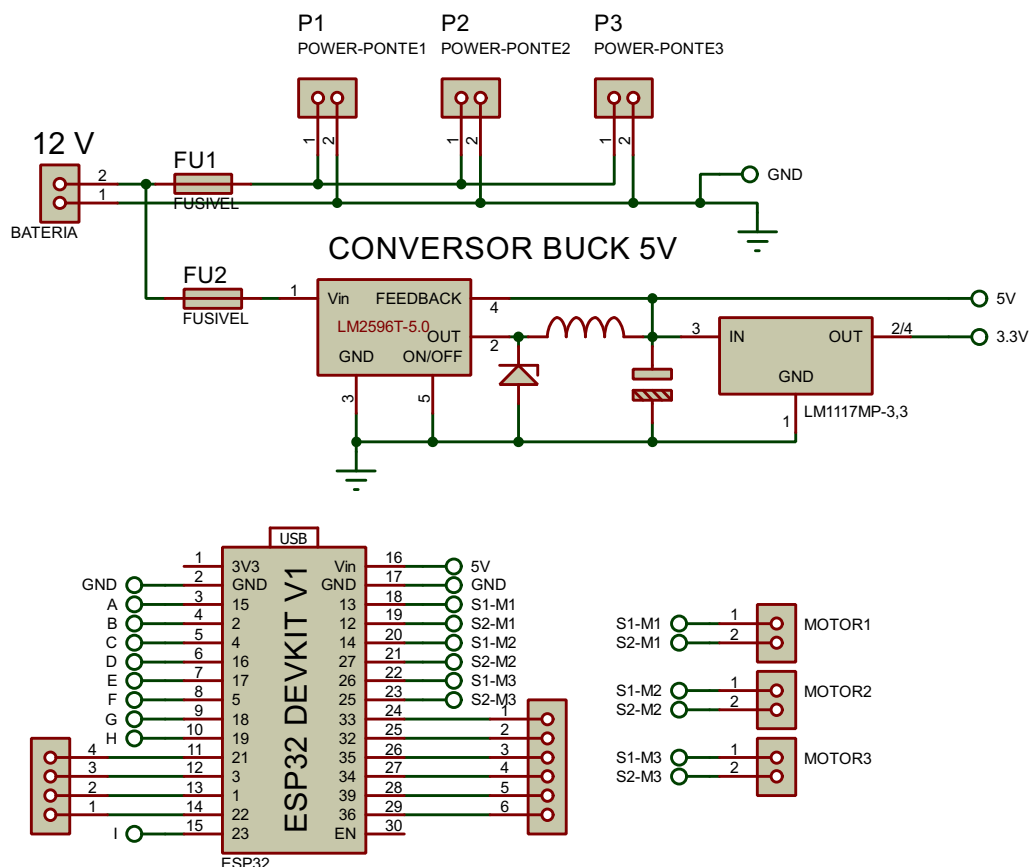
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

3.3 Projeto da placa de acionamento

O projeto da PCB (dos inglês, *Printed Circuit Board*, Placa de Circuito Impresso) foi desenvolvido através do *software* Proteus 8.6, que permite a simulação e elaboração de circuitos eletrônicos. Após a simulação do circuito, a localização dos componentes na placa foi projetada.

Na figura 9 é possível ver o circuito elétrico simplificado projetado.

Figura 9 – Circuito elétrico projetado.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Em seguida, foi feita a impressão das trilhas em impressora a *laser*, transferência para a placa através de calor e por fim a gravação no cobre com ácido (percloroeto de ferro).

Por fim, a placa foi perfurada e os componentes foram soldados com estanho. Antes de energizar a placa, são feitas várias revisões e testes, em uma abordagem *down/up*, a fim de garantir as devidas alimentações e evitar curtos-circuitos.

3.4 Materiais

Nesta seção são descritos os materiais utilizados: microcontrolador, MCCIP, bateria e sensores, todos definidos com base em seu desempenho para a aplicação deste trabalho. A escolha dos materiais foi baseada no padrão construtivo encontrado através da comparação entre os dados da tabela A.1 do Apêndice A, resumidos na tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Parâmetros do robô autônomo a ser construído

Largura do corte	250 mm
Altura do corte	20 mm a 50 mm
Dimensões	360 mm (L) x 400 mm (C) x 350 mm (A)
Peso	8 kg
Bateria	10,0 Ah
Autonomia	60 min

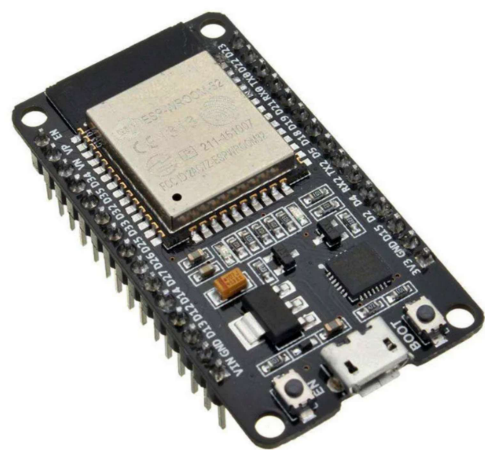
Fonte: o autor.

3.4.1 Microcontrolador

Para o desenvolvimento do sistema embarcado do robô optou-se pelo módulo microcontrolador ESP32 (figura 10) devido a sua facilidade de programação e versatilidade em conexões Wi-Fi e Bluetooth. De suas principais características destacam-se:

- CPU Tensilica Xtensa LX6 de 2 núcleos 240 MHz;
- Co-processador de ultra baixa potência;
- 520 KB de memória SRAM;
- Wi-Fi 802.11 b/g/n;
- Bluetooth v4.2 BR/EDR e BLE;
- 18 ADCs de 12 bits e 2 DACs de 8 bits;
- 4 módulos SPI, 3 módulos UART, 2 interfaces I2C e Controlador PWM;
- 10 sensores de toque e sensor de efeito Hall.

Figura 10 – Módulo Microcontrolador ESP32.



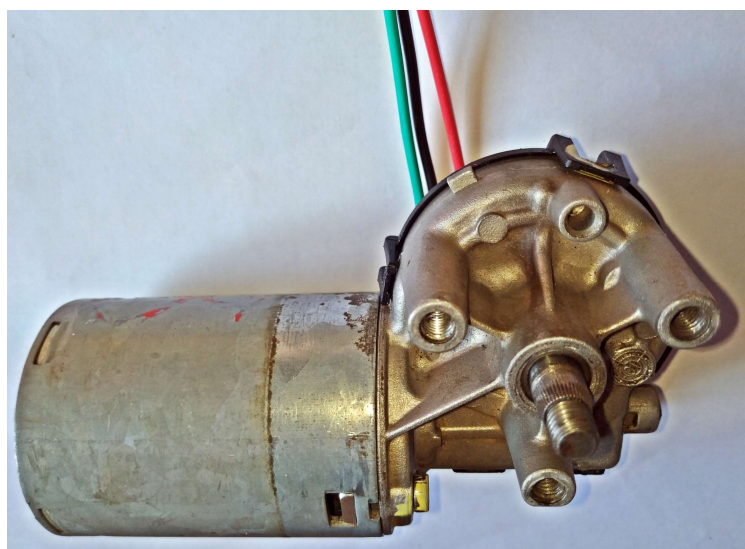
Fonte: ESPRESSIF SYSTEMS (2021).

3.4.2 Motor CC

Para as tarefas de tração e movimentação, foram escolhidos motores de uso automotivo, utilizados nos sistemas de limpador de para-brisa de veículos. Foram adquiridos dois motores usados, da marca BOSCH modelo *F00B20053*, e neles foram feitas algumas modificações. Para o sistema de corte, optou-se por um MCCIP utilizado em vidros elétricos de carros.

Os três motores são acionados com 12 V, apresentam boa velocidade e alto torque para esta aplicação, além da possibilidade de inversão de sentido de rotação do rotor, muito importante para permitir a boa manobrabilidade do robô.

Figura 11 – Motor do sistema de tração e movimentação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.3 Resolver

A odometria é muito importante na robótica móvel. Através de sensores proprioceptivos (que obtêm informações internas do robô) é possível controlar a posição e a velocidade das rodas, sendo possível obter uma estimativa da distância relativa navegada. Esta estimativa é chamada de reconhecimento passivo (do inglês *dead reckoning*). Trata-se de uma técnica utilizada na aviação, que consiste em determinar a posição da aeronave, usando uma bússola, a velocidade e o tempo de deslocamento. Apesar da distância estimada neste método ser precisa a curtos deslocamentos, ela pode ser comprometida por erros como derrapagens e modelagem errada do robô (ROMERO et al., 2014).

Para determinar a posição do rotor e a velocidade do motor a fim de realimentar o sistema

de controle foi desenvolvido um odômetro do tipo *resolver*.

Trata-se de um sensor de posição capaz de gerar sinais senoidais em quadratura. A partir dos sinais gerados, a posição é estimada através da razão entre a parte imaginária de y ($\cos(\theta)$) e a parte real de x ($\sin(\theta)$) através da fórmula trigonométrica do arcotangente, onde os valores em radianos variam entre $(-\pi, \pi)$.

Na linguagem de programação C, a qual será utilizada na implementação em microcontrolador e também nas simulações do PSIM, este cálculo é realizado através da função *atan2* descrita pela equação (3.11).

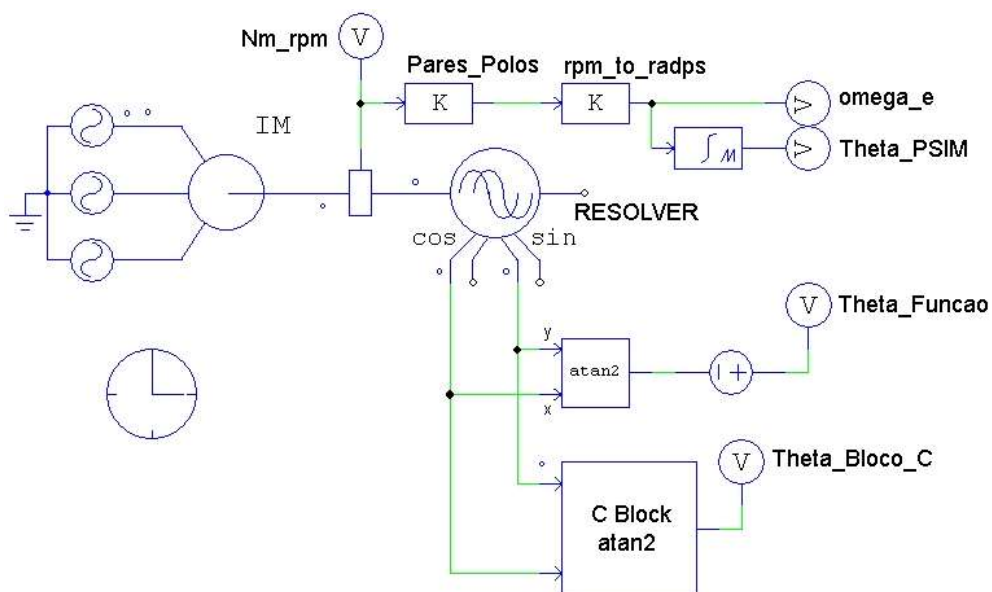
$$\text{atan2} = \arctan\left(\frac{\sin(\theta)}{\cos(\theta)}\right) \quad (3.11)$$

A função *atan2* retorna o ângulo em radianos.

O funcionamento de um *resolver* é análogo a um gerador de ímãs permanentes onde os ímãs alocados no rotor variam o campo magnético que concatena as espirras do estator, gerando uma diferença de potencial em seus terminais. Neste trabalho o rotor possui 4 ímãs, o que equivale a 8 polos. No estator, existem apenas duas bobinas, cada uma com 200 espirras de cobre esmaltado 30 AWG. As espirras geram sinais defasados no tempo em 90° , como ocorre com os sinais $\sin(\theta)$ e $\cos(\theta)$. Para isto, a defasagem no espaço ocorre a 45° , já que os 4 ímãs do rotor geram 2 campos magnéticos equivalentes.

Para a validação do *resolver* projetado foi simulado o circuito da figura 12, onde são comparados três valores: posição obtida por integração da velocidade, posição obtida pelo bloco "atan2" e a posição obtida através de código C.

Figura 12 – Simulação do Resolver.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os três sinais gerados ficaram sobrepostos, evidenciando o correto funcionamento do código.

Os sinais gerados pelo *resolver* são senoidais em quadratura, ou seja, a tensão altera entre valores positivos e negativos, na ordem de 100 mV. No entanto, o microcontrolador que irá interpretar estes sinais trabalha apenas com tensão positiva, de zero a 3,3 V. Assim, foi projetado um circuito com a finalidade de dar um *offset* na tensão e também um ganho, para que o conversor ADC seja capaz de ler os valores com a melhor precisão possível. Este circuito consiste em um divisor de tensão resistivo, responsável por alterar a tensão de referência dos sinais do *resolver* e junto a ele um amplificador operacional modelo LM324.

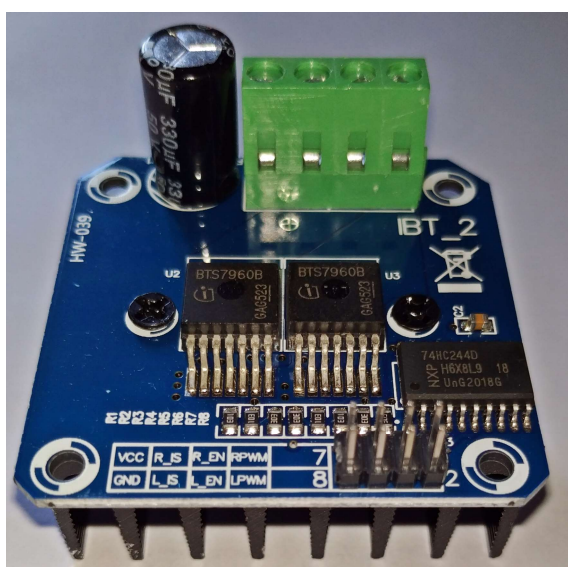
3.4.4 Ponte H

O acionamento dos motores requer mais corrente do que o microcontrolador é capaz de fornecer. Por este motivo é utilizado um módulo "ponte H" que apresenta quatro componentes semicondutores responsáveis pelo chaveamento da tensão a partir dos sinais recebido do microcontrolador.

Dos diversos modelos disponíveis no mercado, optou-se pelo Driver Ponte H BTS-7960, capaz de trabalhar com até 27 V e 43 A (figura 13).

Este módulo apresenta 8 terminais para conexão de controle, sendo dois terminais de alimentação, dois para sentido de giro, dois para acionar o módulo e os outros dois para indicação de falta. Ainda há 4 terminais para as conexões de potência (entrada da bateria e saída para o motor).

Figura 13 – Driver Ponte H BTS-7960.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.5 Bateria e controlador de carga

Uma bateria fornece tensão contínua através de reações químicas que ocorrem em seu interior. Para aplicações que requerem alta densidade de energia, as baterias de Lítio são as mais utilizadas, porém, seu custo é mais elevado. No meio automotivo, as baterias de chumbo ácido dominam o setor. Custam menos que as baterias de Lítio, no entanto, o seu peso é muito mais elevado, para entregar a mesma quantidade de potência de uma bateria de Lítio.

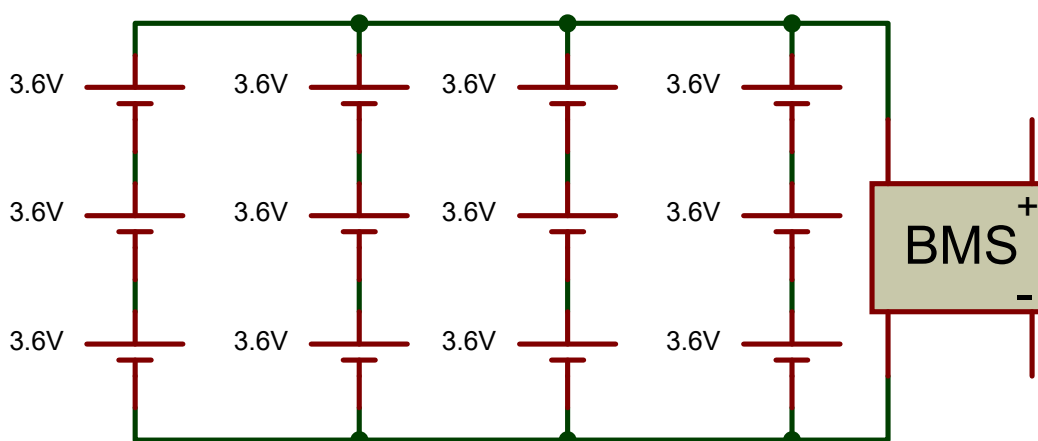
Conforme Schultz (2019) existe atualmente no mercado uma grande gama de baterias sendo vendidas para os mais diversos tipos de uso, entre elas podem-se citar as de chumbo ácido, níquel cádmio, níquel-metal hidreto, Lí-ion, Lypo, entre outras.

Baterias de Lítio são formadas por um conjunto de células associadas em série ou em paralelo. Neste trabalho, 6 células modelo 18650 22FM - 2200 mAh (SAMSUNG, 2008) e 6 células modelo CGR18650C - 2250 mAh (PANASONIC, 2005) estão associadas em 4 séries de 3 células cada, totalizando 12 células (figura 14).

Cada célula tem um formato cilíndrico e é capaz de fornecer 3,6 V. Sua associação totaliza um *pack* de 26,7 Ah - 10,8 V. É importante ressaltar que a capacidade da bateria não significa a corrente máxima que ela é capaz de entregar em curto-circuito, mas sim a corrente que ela consegue fornecer no período de uma hora.

As baterias de lítio requerem um cuidado especial quando recarregadas. Além de não suportarem altas temperaturas, a recarga não permite valores de tensão muito acima da nominal. Para isto, foi adquirido um controlador de carga 18650 3S 40A 12V. Além disso, serão utilizados fusíveis na placa de acionamento, que abrem o circuito instantaneamente ao receberem uma corrente elevada, garantindo assim a segurança da bateria em caso de curto-circuito.

Figura 14 – Arranjo das células que compõem a bateria.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.6 Sensor Ultrassônico

Este sensor emite pulsos a uma frequência de 40 kHz e capta o sinal refletido por obstáculos, calculando assim a distância através do tempo entre a emissão e o retorno do eco.

Como ouvido humano só consegue identificar ondas mecânicas (sonoras) entre 200 Hz e 20 kHz, os sinais emitidos pelo sensor Ultrassônico não podem ser escutados pelos humanos (VIDAL, 2022).

Este sensor é composto por 3 componentes principais:

- Transmissor: responsável pela emissão do sinal ultrassônico;
- Receptor: responsável por captar o sinal refletido;
- Circuito de controle: calcula o tempo entre a emissão e recepção do sinal;

Na figura 15 é possível ver o sensor ultrassônico utilizado. Ele apresenta 4 terminais:

Figura 15 – Sensor Ultrassônico HC-SR04.



Fonte: (VIDAL, 2022)

- Vcc: alimentação 5 V;
- Trigger: recebe sinal do ESP32 para envio dos pulsos ultrassônicos;
- Echo: retorna ao ESP32 os pulsos com o tempo de duração do sinal de retorno.
- GND: referência 0 V.

A distância D obtida em metros é calculada através da equação (3.12).

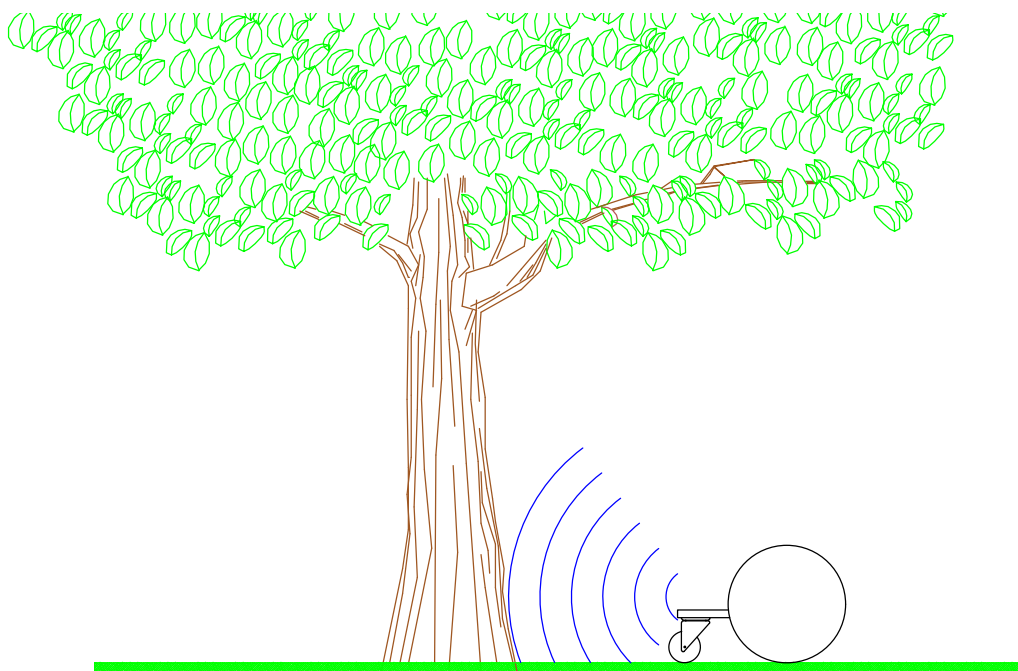
$$D = \frac{T \cdot v_s}{2} \quad (3.12)$$

Onde T é a duração do sinal de saída em segundos e v_s é a velocidade do som, constante equivalente a 340 m/s.

O sensor ultrassônico HC-SR04 utilizado neste trabalho é capaz de trabalhar com distâncias entre 2 cm e 4 m, sendo assim ideal para a aplicação no robô cortador de grama, onde deve evitar obstáculos que estejam a sua frente. Ainda, possui a vantagem de não ser interferido pela cor ou material do objeto a ser detectado.

Na figura 16 é possível ver uma aplicação do sensor ultrassônico utilizado.

Figura 16 – Aplicação do Sensor Ultrassônico HC-SR04.



Fonte: desenvolvido pelo autor

No entanto, para detectar objetos que estejam mais próximos é possível utilizar o sensor de obstáculos infravermelho, conforme descrito a seguir.

3.4.7 Sensor Infravermelho

Como seu nome sugere, este sensor trabalha com a emissão de ondas abaixo do espectro de luz visível, conhecido como infravermelho. Este sensor trabalha com distâncias entre 2 cm e 30 cm, com um ângulo de detecção de 35°. A distância é ajustada através de um potenciômetro e a sua saída é do tipo digital.

Pelo seu funcionamento simples, a cor ou o tamanho do objeto detectado podem afetar diretamente na detecção. No entanto, para aplicações simples, como por exemplo a altura da grama ou objetos próximos este sensor é muito útil.

3.4.8 Sensor de presença

Para garantir a segurança de pessoas e animais que possam se aproximar do robô cortador de grama, será utilizado um sensor de presença do tipo infravermelho passivo (do inglês *Passive Infrared*, PIR). Seu funcionamento é baseado na detecção de variação de ondas infravermelho. Como todo corpo emite radiação infravermelha, este sensor é ideal para a detecção de pessoas e animais em movimento. Este sensor é capaz de detectar movimentos em uma faixa ajustável que varia entre 3 e 7 metros.

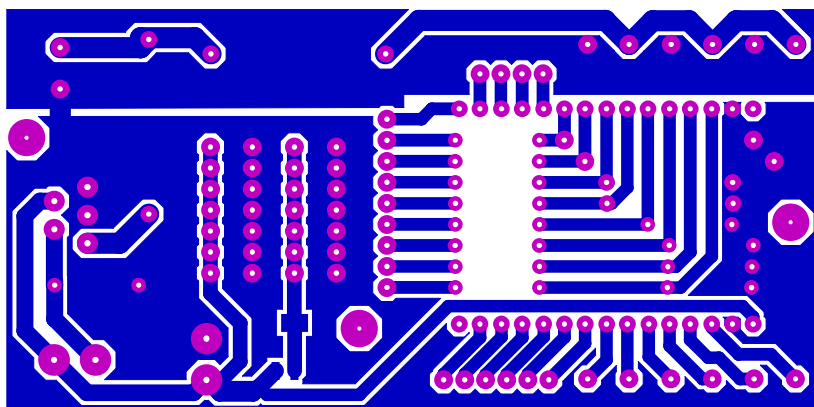
3.5 Placas de acionamento e controle

Para alocar os componentes elétricos responsáveis pelo controle e acionamento dos motores, foi projetada uma placa de circuito impresso (PCB) através do *software Proteus 8.6*, onde é possível fazer a melhor disposição dos componentes e trilhas antes da confecção. Na figura 17 é possível ver a disposição das trilhas, onde fica evidente a diferença de espessura entre as trilhas de controle e de potência, de forma que a última apresenta maior espessura devido a maior corrente que irá circular.

A placa consiste de conectores para a bateria e ponte H, circuito conversor *Buck*, microcontrolador ESP32, fusíveis e saídas de alimentação para os sensores.

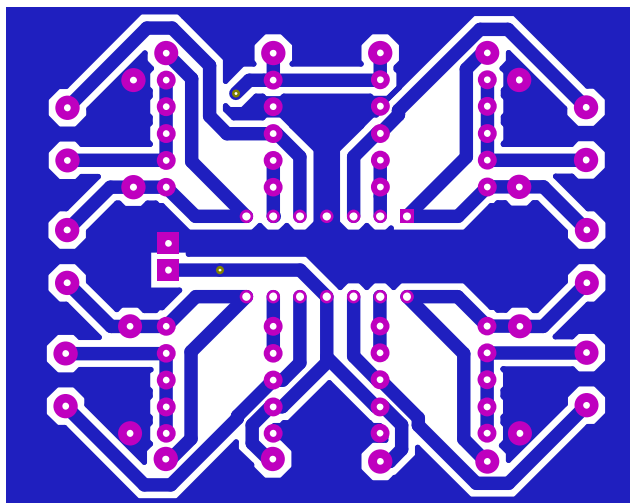
Além disso, uma segunda placa foi projetada, para comportar os componentes do circuito responsável pela aquisição dos sinais dos *resolvers*. Esta placa consiste em resistores e um amplificador operacional. Na figura 18 é possível ver a placa projetada.

Figura 17 – Placa de acionamento e controle.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 – Placa de aquisição de sinais dos resolvers.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6 Aplicativo

Para movimentar o robô, é utilizado um aplicativo de celular que se conecta via Bluetooth com o microcontrolador. Sua função é enviar comandos para o robô através de *bits*. No microcontrolador é atribuída uma função a cada tipo de dado recebido.

Inicialmente foi desenvolvido um aplicativo por meio da plataforma "MIT App Inventor". Trata-se de uma aplicação de código aberto desenvolvida pela Google, hoje mantida pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT). Através dele é possível criar a interface do aplicativo e através de blocos de código desenvolver a lógica da programação.

No entanto, foi constatado que o ESP32 não se conecta com dispositivos com sistema operacional iOS (iPhone) por questões de segurança limitando assim a sua utilização por parte de muitos usuários.

Como alternativa, passou a ser utilizado o aplicativo *Bluefruit Connect*, da empresa americana de *hardware* de código aberto "Adafruit Industries", ou popularmente conhecida por "Adafruit". Ele é a melhor alternativa para conexão Bluetooth entre ESP32 e iPhone, disponível para *download* gratuitamente para sistemas iOS e também Android.

De todas as ferramentas presentes nele apenas a *control pad* é utilizada, onde estão presentes quatro setas e quatro números, cada qual com uma função atribuída:

- Botão 1: Parar (Emergência);
- Botão 2: Acionar/desligar motor de corte;
- Botão 3: Iniciar modo autônomo.

3.7 Modelagem matemática do robô

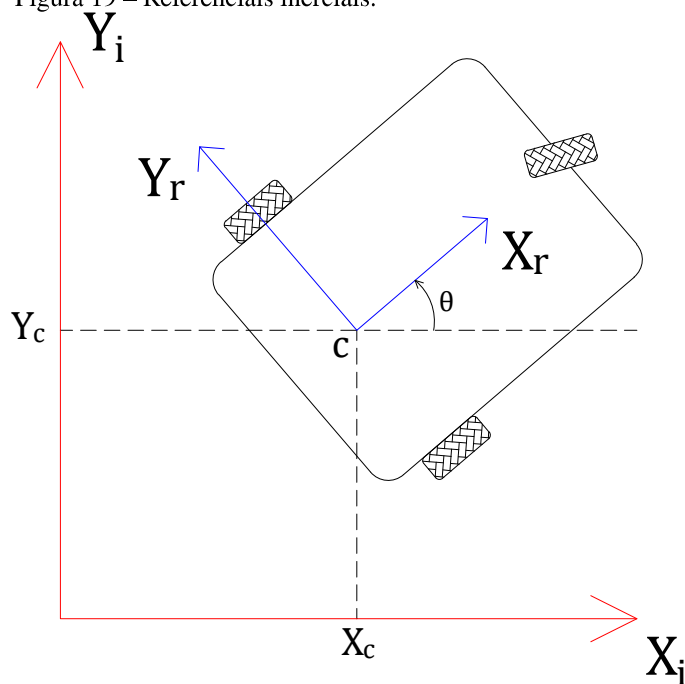
A modelagem matemática do robô consiste em descrever o seu comportamento mecânico no espaço. Para isso, são utilizados dois sistemas referenciais: inercial e dinâmico.

No sistema inercial, a origem do sistema é a origem do plano, ou seja, a origem do ambiente a ser percorrido. No sistema dinâmico, a origem está localizada no centro do robô, portanto, se movimenta junto com ele. Letras e números acompanhados do subscrito “r” estão relacionados ao referencial dinâmico, enquanto o referencial inercial apresenta o subscrito “i”.

É importante ressaltar que a modelagem matemática a seguir só pode ser utilizada para robôs/veículos com tração diferencial, ou seja, quando as rodas de um lado são controladas de forma independente das rodas do outro lado, portanto, não interligadas por um eixo. Controlando cada roda com diferentes velocidades é possível fazer o robô girar sob seu próprio eixo, se locomover em linha reta ou em um círculo, ou seja, seguir qualquer trajetória desejada (COOK, 2011).

Para iniciar a modelagem faz-se necessário algumas definições: o robô é construído sobre um chassi rígido e apresenta rodas rígidas (que não se deformam), não há escorregamento entre o solo e as rodas e o robô se desloca em um plano horizontal (portanto, sem inclinações). Ainda, todos ângulos são crescentes quando orientados no sentido anti-horário. Sua posição sobre o plano segue as referências estabelecidas na figura 19.

Figura 19 – Referenciais inerciais.



Fonte: o autor.

3.7.1 Posição do robô

A figura 19 apresenta uma base inercial ortonormal bi-dimensional, $\{\vec{X}_i, \vec{Y}_i\}$, relacionada com o plano onde será feito o deslocamento. Sobre o robô existe uma segunda base, $\{\vec{X}_r, \vec{Y}_r\}$, fixada no ponto c, que representa o centro do eixo de tração. Desta forma, a posição do robô pode ser encontrada quando temos o conhecimento das 3 variáveis: $\{\vec{X}_c, \vec{Y}_c, \theta\}$. Ao se observar a figura 19, fica claro que θ é o ângulo de $\vec{X}_r$ em relação a $\vec{X}_i$.

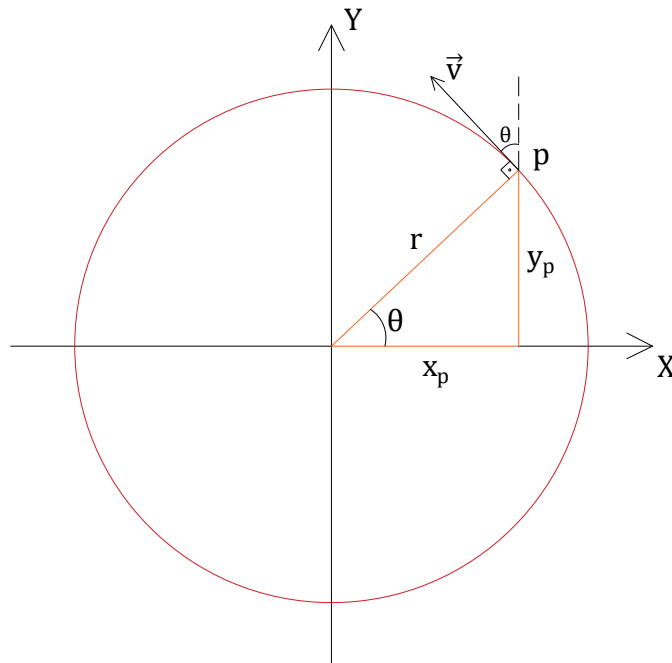
Com estas especificações, declaramos um vetor γ com as 3 variáveis da sua posição, definido pela equação 3.13:

$$\gamma \triangleq \begin{pmatrix} \vec{X}_c \\ \vec{Y}_c \\ \theta \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

A transformação entre os referenciais inercial e do robô pode ser feita através da matriz de transformação (equação 3.14), obtida com base na figura 20.

$$R(\theta) \triangleq \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

Figura 20 – Transformação dos referenciais.



Fonte: o autor.

3.7.2 Velocidade do veículo

Conforme Halliday, Resnick e Walker (2016), a velocidade instantânea (ou simplesmente velocidade) de uma partícula é a taxa com que a sua posição varia com o tempo em um determinado instante. Assim, esta taxa de variação pode ser expressa como a derivada da posição em função do tempo:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{d}{dt}x(t) = \dot{x}(t) \quad (3.15)$$

Partindo do mesmo raciocínio, a fórmula pode ser utilizada para calcular a velocidade das rodas em função da sua taxa de rotação, conforme equação 3.16:

$$\omega = \frac{d}{dt}\phi(t) = \dot{\phi}(t) \quad (3.16)$$

A velocidade do robô sobre o plano pode ser determinada em função das grandezas de suas rodas. Seja r o raio das rodas, W metade da distância entre elas e $\dot{\phi}$ a velocidade angular, é possível expressar a velocidade do robô através do vetor $\vec{V}_r$:

$$\vec{V}_r \triangleq \begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{y}_r \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

A velocidade da componente x é a média da velocidade das rodas. Conforme (BRACHT, 2015), um deslocamento angular pode ser convertido em linear multiplicando-o pelo raio que descreve o movimento:

$$\dot{x}_r \triangleq r \frac{\dot{\phi}_L + \dot{\phi}_R}{2} \quad (3.18)$$

Assumindo que o veículo não ira escorregar no sentido normal às rodas, a velocidade na componente y será nula:

$$\dot{y}_r \triangleq 0 \quad (3.19)$$

A componente de rotação $\dot{\phi}_r$ também consiste da média da velocidade angular das rodas:

$$\dot{\phi}_r \triangleq r \frac{\dot{\phi}_R - \dot{\phi}_L}{2W} \quad (3.20)$$

Assim, o vetor $\vec{V}_r$ pode ser reescrito da seguinte forma:

$$\vec{V}_r \triangleq \begin{bmatrix} r \frac{\dot{\phi}_L + \dot{\phi}_R}{2} \\ 0 \\ r \frac{\dot{\phi}_R - \dot{\phi}_L}{2W} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Para transformar estas componentes de velocidade para o referencial inercial, basta multiplicar pela matriz da equação 3.14:

$$\vec{V}_i = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \frac{\dot{\phi}_L + \dot{\phi}_R}{2} \\ 0 \\ r \frac{\dot{\phi}_R - \dot{\phi}_L}{2W} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Simplificando as equações 3.18 e 3.20 por 3.15 e 3.16, temos:

$$\vec{V}_i = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ 0 \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

e por fim,

$$\vec{V}_i = \begin{bmatrix} v \cos \theta \\ v \sin \theta \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios experimentais e validações computacionais realizadas por meio do *software* PSIM a fim de verificar a modelagem matemática dos motores e controladores de velocidade. Ainda, são apresentadas as validações experimentais e versões do protótipo desenvolvido, onde são apontadas modificações já realizadas e pontos para melhorias futuras.

4.1 Ensaios Experimentais

Os parâmetros dos motores responsáveis pela locomoção do robô foram obtidos conforme descrito na metodologia e são apresentados na tabela 2. A partir deles foi possível realizar a simulação dos motores e estabelecer um método de controle.

Tabela 2 – Parâmetros dos motores obtidos experimentalmente.

Parâmetro	Motor 1	Motor 2
$R_a [\Omega]$	0,847	0,909
$L_a [H]$	0,000636	0,000761
$J [Kg.m^2]$	0,0526	0,0451
$B [N.m.s]$	0,997	1,252
$K [V/(rad/s)]$	2,531	3,228

Fonte: produzido pelo autor.

Os parâmetros J e B são relativamente grandes para os motores, quando comparados com outros motores CC de mesma potência. Isso se deve ao fato de ambos apresentarem uma redução mecânica no eixo, o que permite entregar muito mais torque com uma velocidade reduzida.

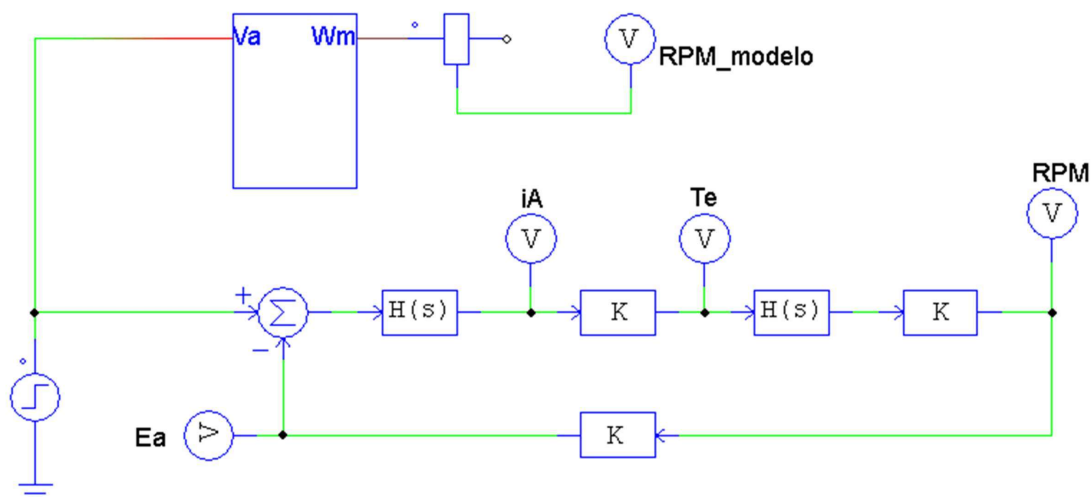
4.2 Validação computacional do modelo matemático do MCCIP

Para a validação do funcionamento das plantas modeladas com base na função de transferência do MCCIP (equação (4.1)) submetidas a um mesmo valor de tensão do diagrama de blocos o circuito da figura 21, foi realizado uma simulação no PSIM. O comportamento de cada motor é apresentado nas figuras 22 e 23 a seguir.

É possível observar a sobreposição dos valores, o que valida o resultado.

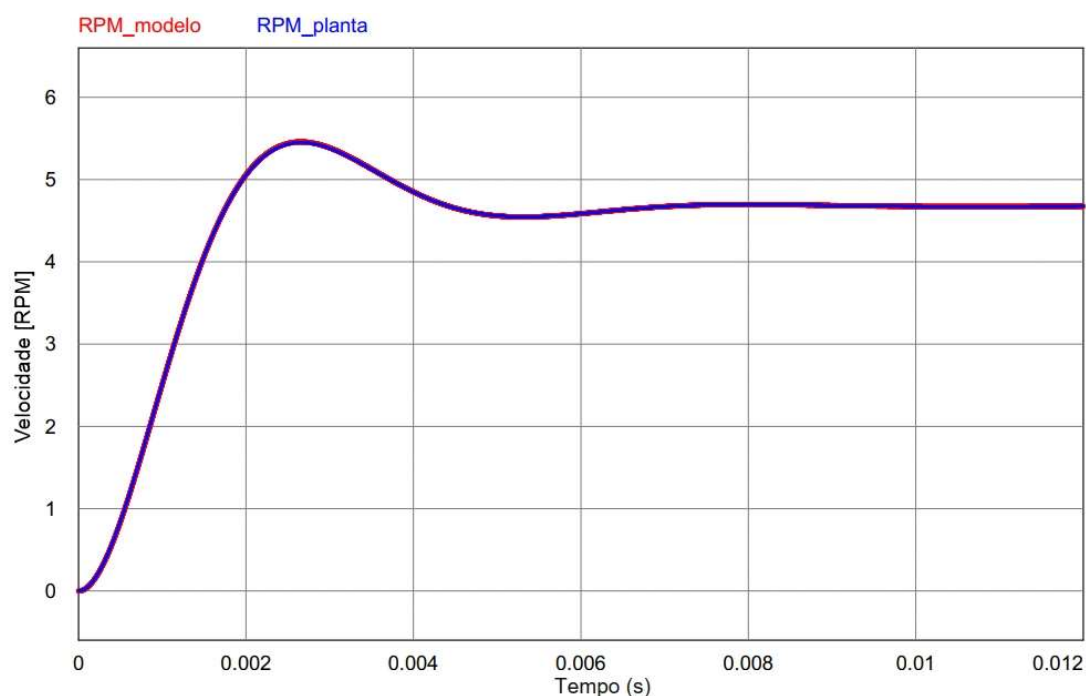
$$V_a(s) = (R_a + s.L_a)I_a(s) + k_e.\phi.\omega_m(s) \quad (4.1)$$

Figura 21 – Circuito elétrico simulado.



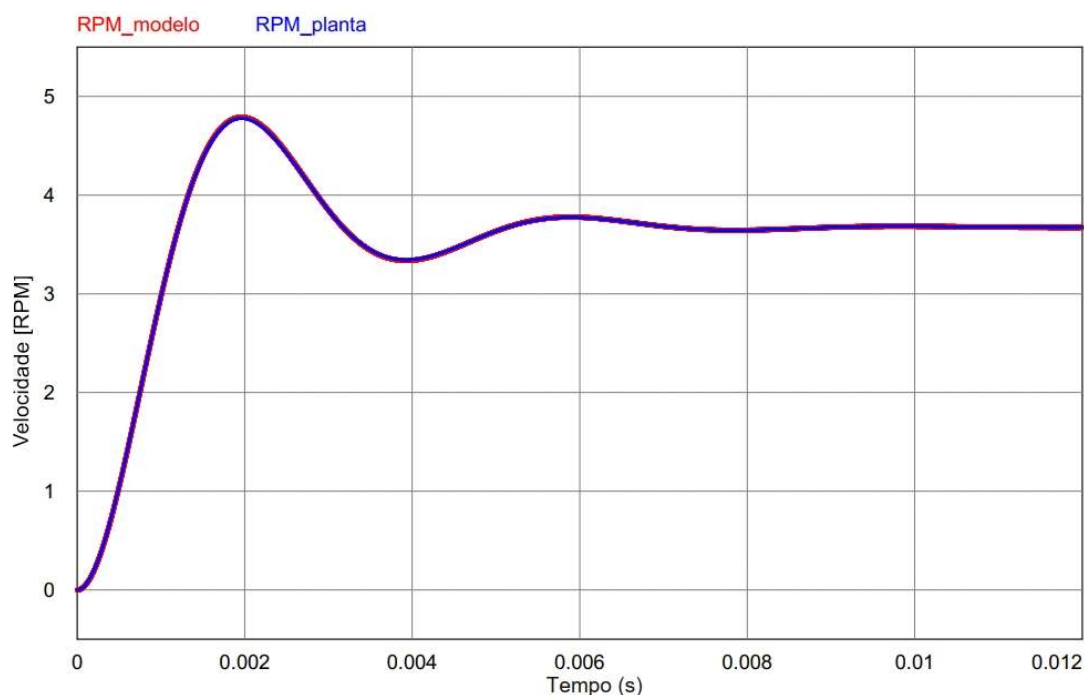
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 22 – Resposta do motor 1.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 23 – Resposta do motor 2.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

4.3 Controlador de Velocidade

Através dos parâmetros dos motores obtidos experimentalmente, foi possível simular o sistema de controle. Por meio do método descrito na seção 3.2, foram calculados os ganhos para os controladores PI apresentados na tabela 3. A implementação do controlador no PSIM ocorre na forma Padrão, o que requer os ganhos K_p e T_i , enquanto a forma Paralela, comumente utilizada no microcontrolador requer K_p e K_i . O motor de corte não apresenta sistema de controle, dada a sua função simples de ser ligado e desligado, não requerendo atingir uma velocidade específica.

Tabela 3 – Ganhos dos Controladores PI de Velocidade.

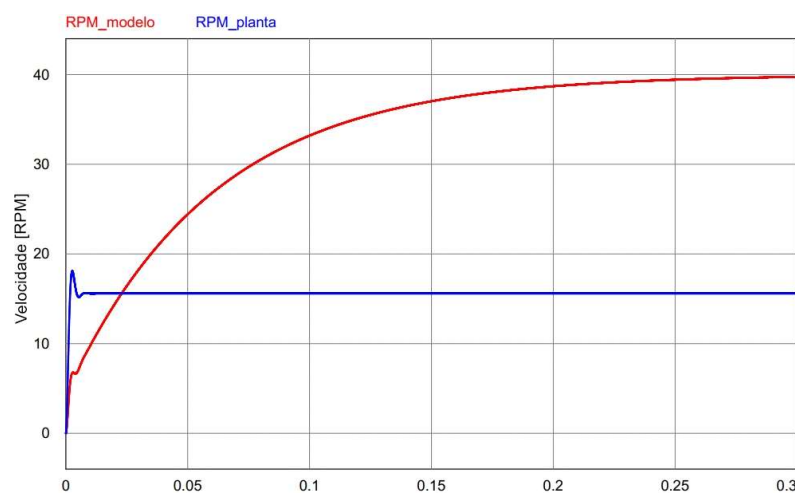
Ganho	Motor 1	Motor 2
K_p	0,37	0,32
K_i	0,52	0,55

Fonte: produzido pelo autor.

A comparação do comportamento dos motores sem controle e com controle da velocidade pode ser observada nas figuras a seguir, onde o gráfico em vermelho representa a velocidade que o motor atinge quando não controlado e em azul a velocidade obtida com controle, onde foi utilizada uma referência de 40 RPM (velocidade aproximada em que os motores funcionarão).

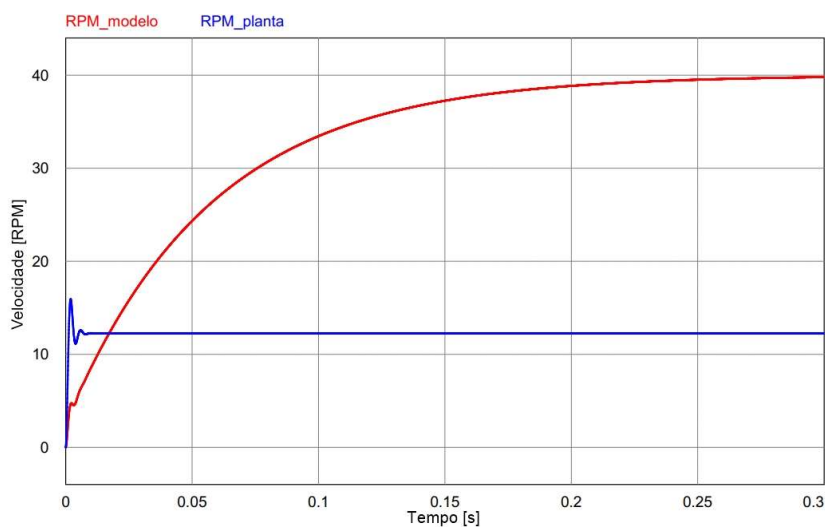
Os resultados são apresentados nas figuras 24 e 25 a seguir.

Figura 24 – Controle de velocidade do motor 1.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 25 – Controle de velocidade do motor 2.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Estes gráficos apresentam ainda o tempo que os motores levam para alcançar o regime permanente (aproximadamente 0,3 segundos). Este tempo está diretamente relacionado com o esforço requerido pelo controlador e com a variável controlada. Assim, quanto mais rápido almejamos obter o regime permanente, maior serão as correntes e tensões consumidas.

Se o motor requerer uma tensão ou corrente maior do que a bateria é capaz de fornecer, ocorre o fenômeno de saturação, fazendo com que a planta não se comporte como projetado, já que a fonte não é capaz de entregar a potência que a carga necessita, portanto os controladores foram devidamente projetados para que não ocorresse a saturação.

A implementação experimental apresentou o problema de *wind-up* da ação integral, recorrente em controladores PID, onde ocorre uma saturação na variável de controle, o que mantém a saída do controlador em seu valor máximo. Para solucionar este problema, foram feitas alterações na equação de diferenças do controlador a fim de adequá-lo a trabalhar da forma correta.

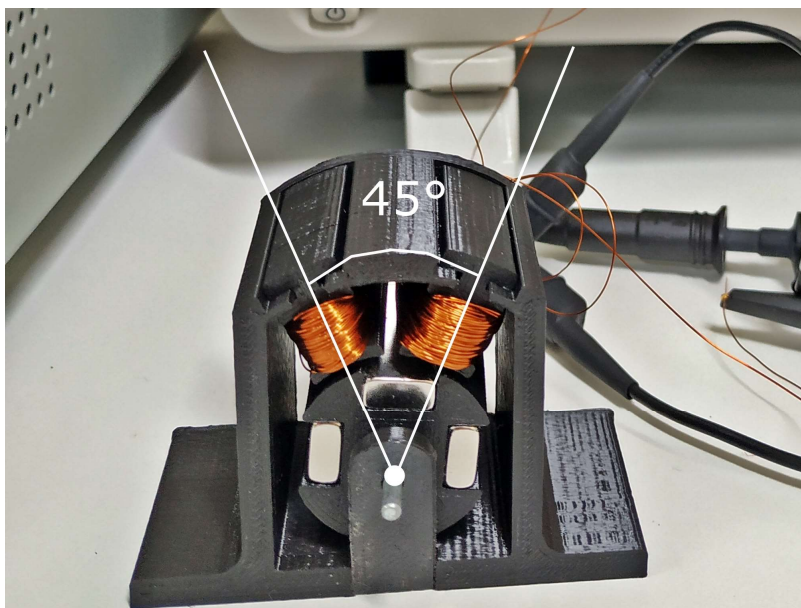
4.3.1 Resolver

A malha de controle requer um sensor de velocidade para informar ao controlador como se encontra a saída do sistema. Neste trabalho foi desenvolvido um sensor rotativo conhecido como *resolver*, já apresentado na seção 3.4.3.

Na figura 26 é possível ver o *resolver* projetado para um dos motores, com detalhe para as bobinas posicionadas com 45° no espaço, para gerar os sinais de seno e cosseno. O ângulo de 45° e não de 90° , como ocorre entre os sinais em quadratura se deve ao fato da alocação do ímãs produzir dois referenciais Norte-Sul. A utilização de menos ímãs no rotor seria possível, mas pela baixa velocidade a qual os sensores estão submetidos a utilização de mais ímãs proporciona um melhor resultado.

Foram desenvolvidos dois *resolvers*, um para cada roda.

Figura 26 – *Resolver* desenvolvido.

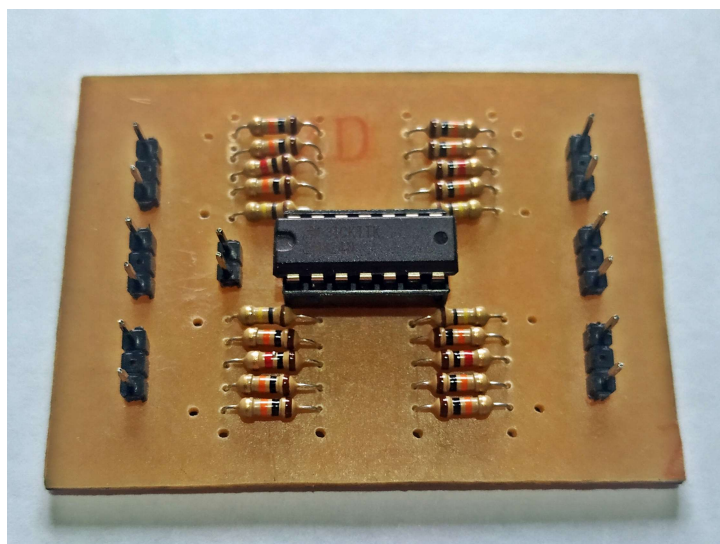


Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Na figura 27 está a placa projetada para receber os sinais, amplificar e entregar a tensão

com um *offset* positivo ao microcontrolador. Foi utilizado um amplificador operacional modelo LM324. Ele apresenta quatro amplificadores internamente, sendo ideal para esta aplicação onde são gerados quatro sinais. Os resistores são responsáveis pelo ganho do amplificador e também alteração da referência do sinal.

Figura 27 – Placa de aquisição de sinais dos *resolvers*.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

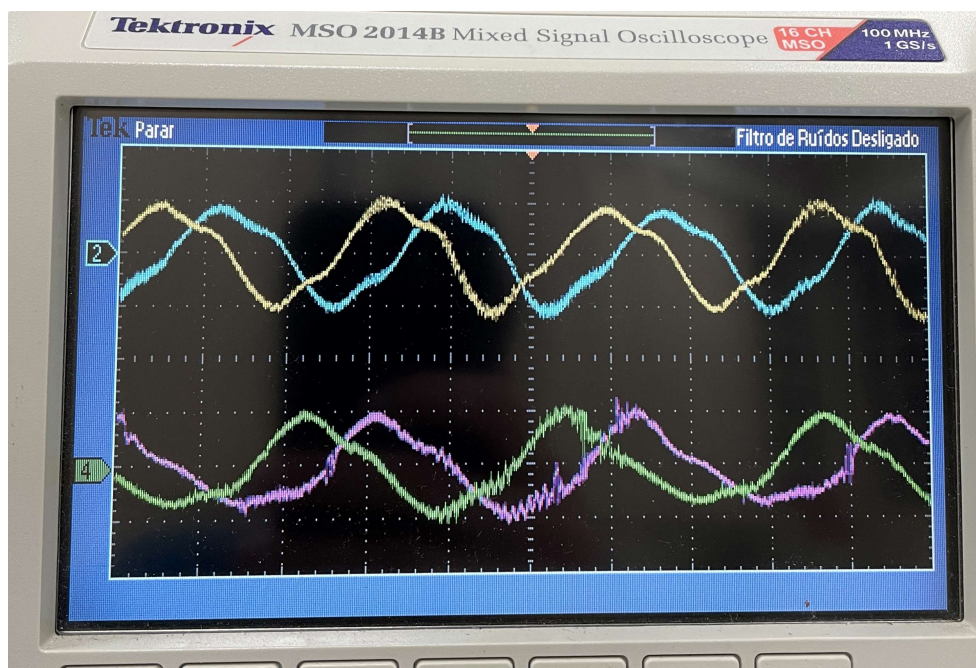
Conforme observado na figura 28, os sinais gerados pelo resolver apresentam a quadratura necessária (devido ao formato físico do *resolver*, porém, com um sinal ruidoso, com formato que não é puramente senoidal).

Como solução, foi feita a utilização de um filtro passa-baixas, com princípio na transformada de Fourier, onde seu valor absoluto é resultado da soma de sinais senoidais de diferentes frequências e amplitudes. Assim, filtrando altas frequências, permitindo apenas a passagem de sinais de baixa frequência (por isso "passa-baixas"), é possível obter o sinal desejado.

No entanto a aplicação de um filtro digital de primeira ordem não foi o suficiente para obter os resultados necessários.

Conforme tratado na seção 3.7.2, a velocidade das rodas pode ser obtida através da derivada da posição, que por sua vez é obtida através do cálculo do arcotangente dos sinais de seno e cosseno gerados pelo resolver. No entanto, a derivada discreta que é calculada pelo microcontrolador apresenta uma descontinuidade toda vez que a roda completa um giro completo. A descontinuidade ocorre porque em um único instante de tempo o microcontrolador fica submetido aos ângulos 0° e 360° , sem um estado definido. Foram feitas várias tentativas de contornar este problema através da programação do microcontrolador, mas não foram obtidos resultados apropriados.

Figura 28 – Sinais gerados pelo *resolver*.

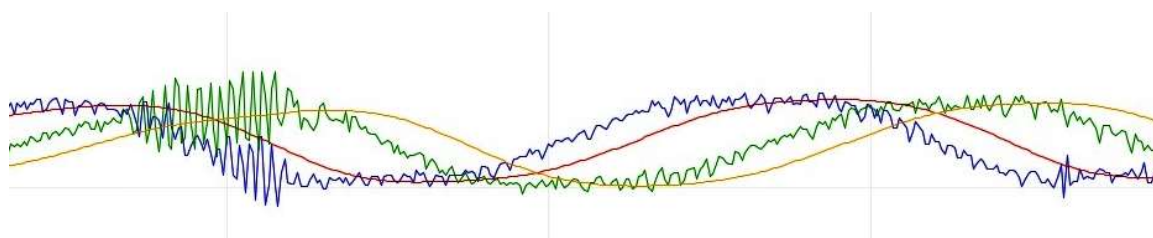


Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Para contornar este problema, adotou-se a técnica proposta por Baratieri (2015), onde o sinal passa por três filtros passa-baixa Butterworth de segunda ordem enquanto é feita a derivada do arcotangente. Esta técnica, implementada no microcontrolador através de equações de diferenças possibilitou a obtenção da velocidade de cada roda de forma muito assertiva.

A figura 29 permite a visualização dos sinais entregues pelo *resolver* em azul e verde. Em vermelho e laranjado está o sinal filtrado, antes de ser aplicada a derivada.

Figura 29 – Sinais do com ruído e filtrados.



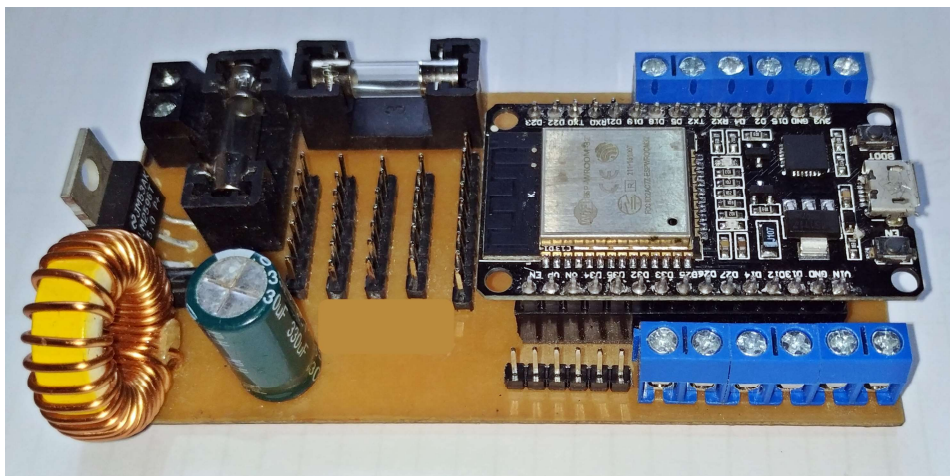
Fonte: desenvolvido pelo autor.

4.4 Placas de aquisição de sinais e Controle

A placa desenvolvida para fixação dos componentes é apresentada na figura 30, nas dimensões de 5 cm x 10 cm. Nela é possível ver dois fusíveis para proteção de curto-circuito, conversor Buck no canto inferior esquerdo, microcontrolador ESP32 no centro à direita e vários

terminais e bornes para conexão dos motores (pontes H) e sensores.

Figura 30 – Placa de acionamento e controle do robô.

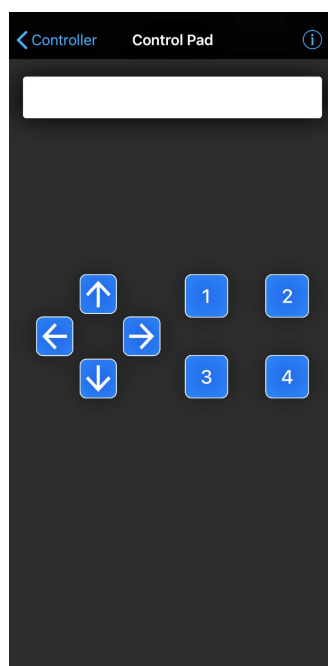


Fonte: desenvolvido pelo autor.

4.5 Aplicativo

O *layout* do aplicativo *Bluefruit Connect* utilizado para a validação do protótipo é exibido na figura 31. Seu desempenho mostrou-se muito satisfatório por apresentar rápida resposta entre a comunicação Bluetooth do celular com o ESP32.

Figura 31 – Aplicativo utilizado para os testes.



Fonte: desenvolvido pelo autor.

4.6 Implementação Experimental

Após todo o projeto do robô, um protótipo foi desenvolvido a fim de validar o controle de velocidade, sensores e principalmente o corte da grama.

4.6.1 Sistema de corte

Os modelos de robôs cortadores de grama autônomos disponíveis no mercado hoje apresentam sistemas com lâminas pequenas, com a finalidade de reduzir ao máximo o risco a quem se aproximar e também garantir a sua durabilidade em caso de colisão de obstáculos pequenos.

Estas lâminas (geralmente três) são fixadas na extremidade de um disco de plástico, rotacionando através da força centrípeta que age no mesmo. Para este trabalho, optou-se pela utilização de um sensor de presença para garantir a segurança de quem se aproximar da máquina, permitindo um sistema de corte mais robusto.

Foram realizados testes com três sistemas de corte: lâmina de ferro, fio de nylon e espia de aço. A lâmina de ferro foi imediatamente descartada, devido ao seu peso aumentar muito o momento de inércia e assim sobrecarregando o motor. Na comparação entre o fio de nylon e a espia de aço, a última se saiu melhor, dada sua rigidez superior ao fio de nylon, necessitando menor força e velocidade do motor.

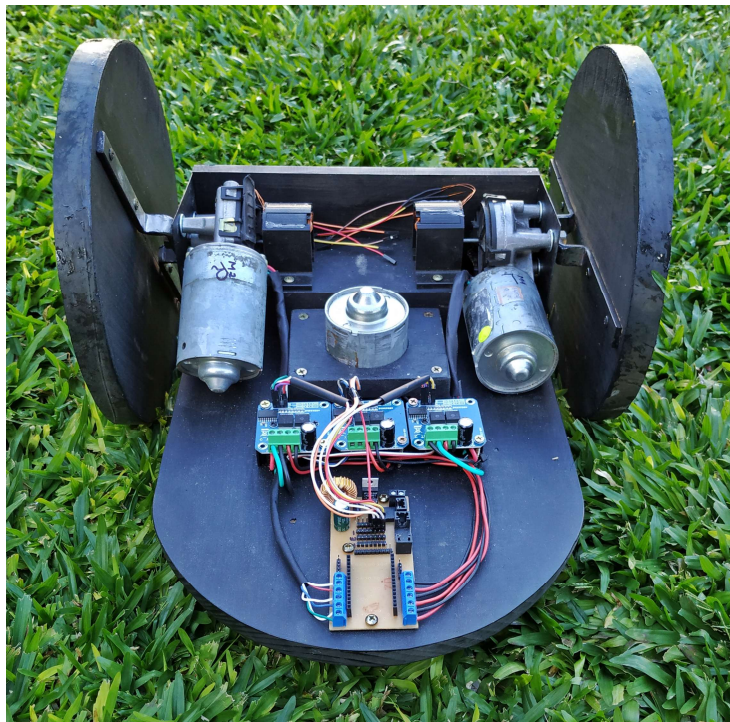
Para a regulação da altura do corte, o motor foi fixado em um cano de PVC e um parafuso na parte superior do robô é utilizado como trava. Assim, a altura pode ser ajustada manualmente, conforme a necessidade.

4.6.2 Protótipo

Com o objetivo de validar a proposta, o robô foi construído sobre uma estrutura de madeira e nela estão fixados todos os componentes. Na figura 32 é possível ver a primeira versão implementada para testes.

A partir desta versão, foram identificados vários pontos a serem melhorados, como a altura entre o robô e o solo, o que implicou no desenvolvimento de uma segunda versão do protótipo, observada na figura 33.

Figura 32 – Primeira versão do protótipo.



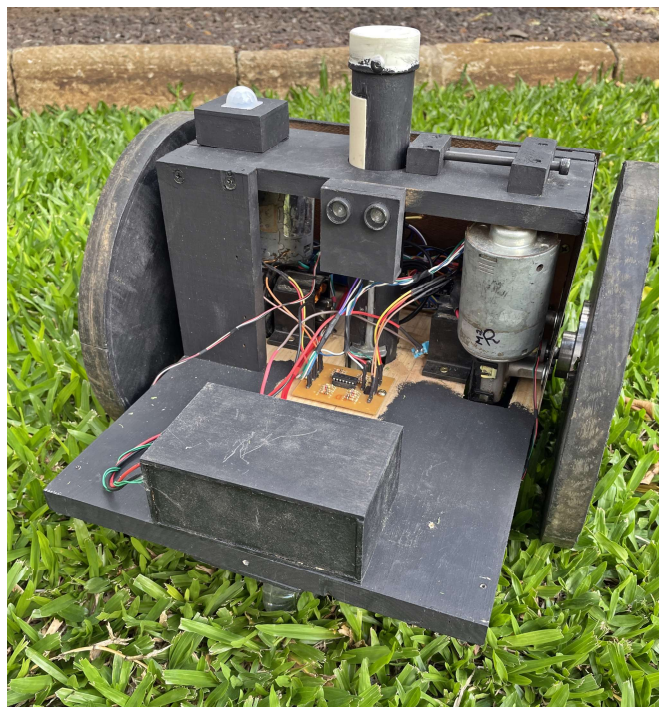
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 33 – Versão final do protótipo.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 34 – Versão final do protótipo.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Na figura 35 é possível ver a parte traseira do robô, onde estão alocados todos os componentes elétricos embaixo da tampa de proteção.

Figura 35 – Versão final do protótipo.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A figura 36 exibe quatro situações perigosas para o robô trafegar, no entanto, são situações onde não há um sensor capaz de detectar tais obstáculos, tornando assim perigosa a tarefa autônoma sem supervisão neste tipo de ambiente.

Figura 36 – Obstáculos em meio a grama.



Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A solução para isto seria a implementação de uma câmera e o uso de inteligência artificial para a detecção da grama.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um protótipo de um robô para o corte de grama em gramados residenciais.

Através da revisão bibliográfica sobre máquinas automáticas, com foco em robôs autônomos de uso residencial, foi possível destacar as principais características de robôs cortadores de grama autônomos disponíveis no mercado hoje, onde foi encontrado um padrão construtivo e então definido parâmetros para o trabalho.

A partir desta etapa, foram definidos os materiais a serem utilizados, como bateria, microcontrolador, sensores e principalmente os motores responsáveis pela locomoção e corte.

Após a definição dos materiais foram desenvolvidos controladores de velocidade para os motores de corrente contínua, onde foram obtidos seus parâmetros. No *software* PSIM o modelo matemático de cada motor e o sistema de controle foi simulado e validado.

Em seguida foi desenvolvido um protótipo para receber os motores, bateria, sensores e placas de controle e acionamentos, sendo este controlado através de celular.

Para realizar os testes iniciais de locomoção do robô, o aplicativo utilizado apresentou bons resultados, tanto na conexão Bluetooth ao parear com um dispositivo, quanto no seu tempo de resposta aos comandos.

Os controladores foram discretizados e implementados em código C, onde foi possível acionar o robô e concluir que o veículo apresenta boa manobrabilidade e não há escorregamento entre as rodas e a grama.

O robô apresentou bom comportamento em diversas superfícies como grama, terra, brita, concreto e pedras (apesar dele ser projetado para cortar grama, deve ser capaz de transitar por outras superfícies com a lâmina de corte desligada).

A metodologia adotada em contraste com os resultados obtidos permitem afirmar que os objetivos do trabalho foram alcançados, onde foi possível obter um protótipo para a aplicação de técnicas de controle para automatização do processo de corte de grama.

5.1 Perspectivas de continuação do trabalho

Como continuação deste trabalho, é possível listar os seguintes itens:

- Analisar a autonomia da bateria;
- Aprimorar o código do microcontrolador;
- Implementar metodologias para o controle autônomo do robô.

REFERÊNCIAS

- ABDI, A. H. M. et al. Remote controlled lawn mower. 2021. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/123456789/1252>>.
- AN, H.; ZHANG, K. Research on tracking control of unmanned lawn mower based on absolute and visual relative positioning. In: **2022 7th International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE)**. [S.l.: s.n.], 2022. p. 89–95.
- BAMPI, S. **Controle de Posição Digital com Redução de Ordem da Planta Aplicado a uma Cúpula de Observatório Astronômico**. Monografia (Graduação) — Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, 2019.
- BARATIERI, C. L. **Contribuições ao Controle do Motor Síncrono de Ímã Permanente com FCEM Não Senoidal**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.
- BARBOZA, B. D. G. Concepção de uma plataforma robótica móvel com sistema de armotecimento. 2017.
- BIM, E. **Máquinas Elétrica e Acionamento**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- BRACHT, M. P. P. Projeto de um veículo autônomo capaz de cobrir uma Área poligonal sem passar mais de uma vez pela mesma região. 2015.
- CICOLANI, J. **Beginning Robotics with Raspberry Pi and Arduino**. [S.l.]: Apress, 2018. ISBN 978-1-4842-3461-7.
- COOK, G. **Mobile Robots - Navigation, Control and Remote Sensing**. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 WROOM 32 Datasheet**. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://storage.googleapis.com/baudaeletronicadatasheet/ESP32.pdf>>.
- FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. **Sistemas de Controle para Engenharia**. 6. ed. [S.l.]: Bookman, 2013.
- GUL, F.; RAHIMAN, W.; ALHADY, S. S. N. A comprehensive study for robot navigation techniques. **Cogent Engineering**, Cogent OA, v. 6, 2019. ISSN 23311916.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física - Volume 1 - Mecânica**. 10. ed. [S.l.]: LTC, 2016. ISBN 978-85-216-3204-7.
- HAZEM, S. et al. Design and path planning of autonomous solar lawn mower. In: **International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference**. [S.l.: s.n.], 2021.
- IBRAHIM, M. Y.; FERNANDES, A. Study on mobile robot navigation techniques. In: . [S.l.: s.n.], 2004. p. 230–236.

- JOHN, J. S. et al. Design and analysis of solar powered automated lawn mower with vacuum cleaner. In: **2022 International Conference on Advances in Computing, Communication and Applied Informatics (ACCAI)**. [S.l.: s.n.], 2022. p. 1–5.
- KAGAN, E. et al. **Autonomous Mobile Robots and Multi-Robot Systems**. 1. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2020. ISBN 978-1-119-21316-1.
- KAROL, A. A conditional coverage path planning for an autonomous lawn mower. 2016.
- KIM, S.-H. **Electric Motor Control**. [S.l.]: Elsevier, 2017. ISBN 978-0-12-812138-2.
- LATHI, B. P. **Sinais e Sistemas Lineares**. [S.l.]: Bookman, 2007. ISBN 978-85-7780-391-0.
- MARTINS, A. **O que é robótica**. 2. ed. [S.l.]: Editora Brasiliense, 2007.
- MATARIC, M. J. **The Robotics Primer**. [S.l.]: MIT Press, 2007. ISBN 978-0262633543.
- MOREIRA, V. R. F. Controle inteligente de um robô móvel omnidirecional com tomada de decisão utilizando aprendizagem por esforço. 6 2021.
- MUNHOZ, I. P. **Robótica**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2017.
- MURPHY, R. R. **Introduction to AI robotics**. Cambridge: MIT Press, 2000.
- NISE, N. **Engenharia de Sistemas de Controle**. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Rio de Janeiro: Pearson Prentice Hall, 2012.
- OPPENHEIM, A.; SCHAFER, R. W. **Processamento em Tempo Discreto de Sinais**. [S.l.]: Pearson, 2013.
- PANASONIC. **Lithium Ion Batteries: Individual Datasheet CGR18650CG**. [S.l.], 2005.
- PANDEY, A. Mobile robot navigation and obstacle avoidance techniques: A review. **International Journal of Robotics & Automation**, MedCrave Group, LLC, v. 2, 5 2017.
- RIASCOS, L. A. **Fundamentos de Robótica: manipuladores e robôs móveis**. São Paulo: Editora Pleiade, 2010.
- ROMERO, R. A. F. et al. **Robótica móvel**. [S.l.]: LTC, 2014.
- SAMSUNG. **Specification Of Product for Lithium-Ion Rechargeable Cell Model: ICR18650-22FM**. [S.l.], 2008.
- SCHULTZ, M. D. **Desenvolvimento de um Sistema de Controle de Tração para Veículo Four-Wheel**. Monografia (Graduação) — Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, 2019.
- SICILIANO, B.; KHATIB, O. **Springer Handbook of Robotics: Robotics and the Handbook**. 2. ed. [S.l.]: Springer, 2016.

SIEGWART, R.; NOURBAKHS, I. R. **Introduction to autonomous mobile robots**. Cambridge: MIT Press, 2004.

TZAFESTAS, S. G. **Introduction to Mobile Robot Control**. [S.l.]: Elsevier, 2014. ISBN 978-0-12-417049-0.

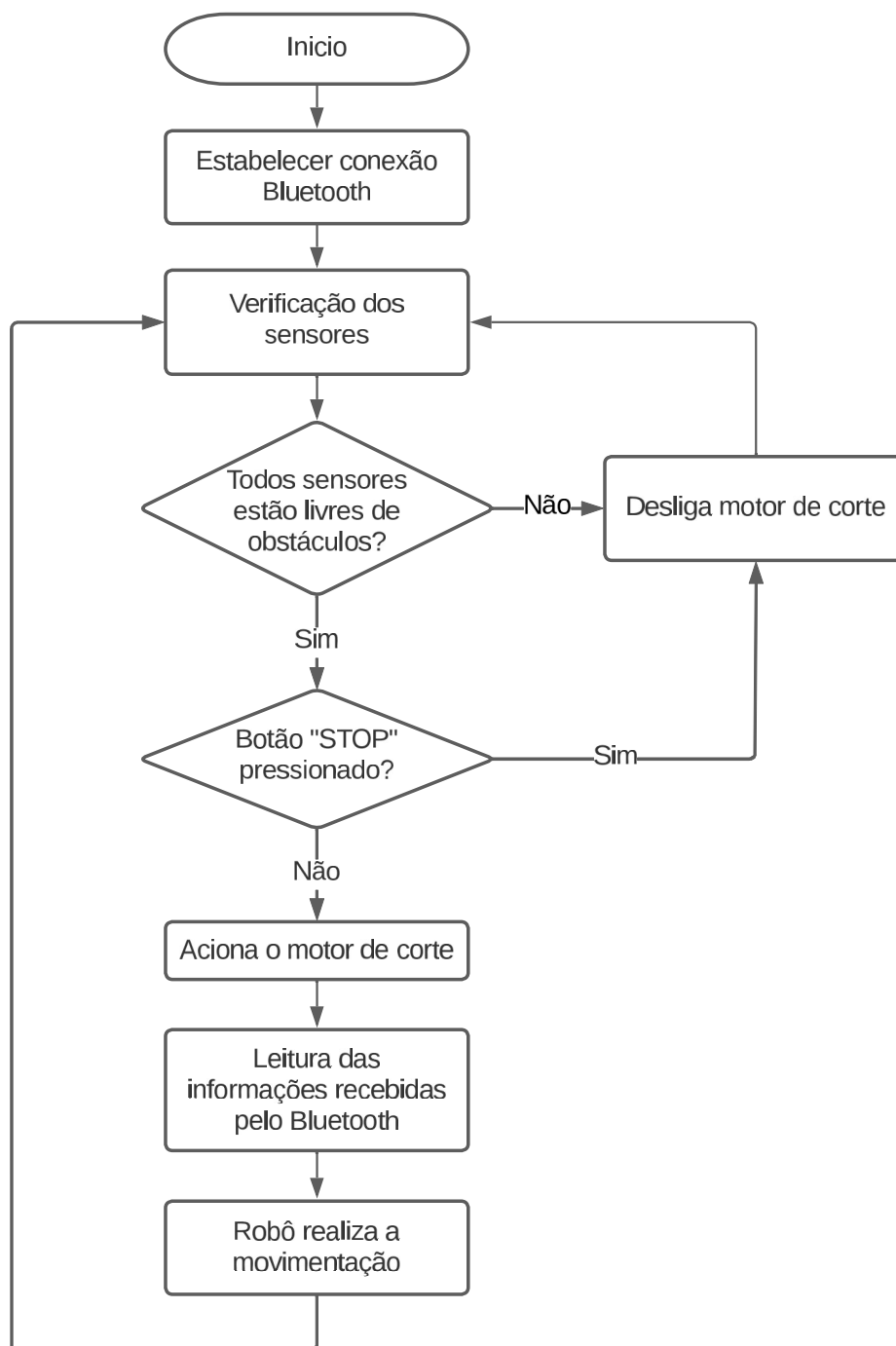
VIDAL, V. **"Sensor Ultrassônico HC-SR04 com Arduino"**. 2022. Disponível em: <<https://blog.eletragate.com/sensor-ultrassonico-hc-sr04-com-arduino/>>.

APÊNDICE A – Características das principais marcas de robôs cortadores de grama autônomos disponíveis no mercado hoje

Tabela A.1 – Comparação entre as principais marcas de robôs cortadores de grama autônomos no mercado hoje.

Marca	WORX	Stihl	John Deere	Gardena	Flymo	Honda	Husqvarna	Husqvarna
Preço [R\$]	6604	6390	8522	8517	4525	9055	6039	19000
Área trabalho [m²]	2000	1500	2200	1250	800	3000	600	5000
Largura corte [mm]	180	200	310	220	170	220	170	240
Altura corte [mm]	20 a 50	20 a 60	19 a 102	20 a 50	20 a 50	20 a 60	20 a 50	20 a 60
Ruído [dB(A)]	66	60	62	57	58	62	61	67
Dimensões [cm]	63; 44,5; 22,5	-	-	58; 39; 23	55; 38; 23	-	55; 39; 25	72; 56; 31
Peso [kg]	9,8	9	14,7	8,3	7,4	10	6,7	13,5
Bateria [Ah]	5	-	-	-	1,6	3,6	10	
Auton. [minutos]	-	60	90	65	50	70	70	270

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

APÊNDICE B – Fluxograma do código executado pelo microcontrolador

Fonte: Desenvolvido pelo autor.