

Andreive Giovanini Silva

**Projeto e construção de robô móvel tipo
micromouse para bancada de busca e
salvamento**

Uberlândia, Minas Gerais

2017

Andreive Giovanini Silva

Projeto e construção de robô móvel tipo micromouse para bancada de busca e salvamento

Monografia de conclusão de curso apresentada no programa de graduação em Engenharia Mecatrônica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica.

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Faculdade de Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. José Jean-Paul Zanlucchi de Souza Tavares

Uberlândia, Minas Gerais

2017

Dedico este trabalho de conclusão de curso à minha família, fornecedora de toda a estrutura e conjunto de valores para minha formação, e aos professores e Universidade pelo auxílio na construção de meu conhecimento.

Agradecimentos

Aos meus pais, pelo esforço incansável para me suportar nos variados âmbitos de minha vida, seja acadêmica ou pessoal;

Ao professor Dr. José Jean-Paul Zanlucchi de Souza Tavares pela ajuda, sugestões e críticas fornecidas ao longo do trabalho, além de importante contribuição na minha formação como um dos melhores lecionadores da graduação;

Ao doutorando João Paulo da Silva Fonseca pela participação ativa, paciência, orientação e apoio na execução de todo o projeto;

Aos membros do MAPL por auxílio em diversas áreas, em especial, ao Rodrigo Nogueira Cardoso pela ajuda no uso dos equipamentos do laboratório e impressão 3D, ao Thiago Macedo Mendonça e Túlio Germano pelo auxílio na confecção das peças e testes;

Aos colegas de curso por sugestões e convivência durante toda a graduação;

À Universidade Federal de Uberlândia pelas oportunidades e vivências únicas que pude obter ao longo da vida acadêmica.

Resumo

Atividades de busca e salvamento possuem elevado risco associado à sua execução e, conseqüentemente, necessitam de estratégias bem definidas para serem realizadas. Neste sentido, ambientes de simulação são essenciais para testar condições e analisar resultados de um método implementado. Como uma tendência, a cooperação entre diferentes robôs (sistema multirrobô) é uma solução interessante para auxiliar neste tipo de situação. Este projeto visa desenvolver um veículo autônomo com capacidade sensorial para identificar obstáculos e robôs adjacentes, capacidade de navegação com base nos dados dos sensores, capacidade para comunicação sem fio com outros robôs e comunicação por radiofrequência para rastrear objetos habilitados para esta forma de troca de mensagens, considerando um custo inferior aos modelos comerciais e utilizando de equipamentos de fabricação disponíveis na Universidade. O método de projeto baseou-se na avaliação dos requisitos, restrições de orçamento, definição dos componentes, layout da placa eletrônica, design da estrutura mecânica, testes e avaliação dos resultados. A fabricação da placa eletrônica, a qual inclui circuito SMD, foi inviável com recursos próprios da Universidade até o momento de conclusão deste trabalho. Os demais componentes atenderam aos requisitos, garantindo ao veículo dimensões adequadas para operação, comunicação sem fio, percepção do ambiente e de outro robô, e identificação de etiquetas RFID de localização espalhadas pelo cenário por meio de um módulo RFID. Desde que os equipamentos da Universidade estejam com funcionamento adequado, é possível construir um veículo autônomo de forma personalizada, com custo, neste projeto, 38% inferior ao principal modelo comercial brasileiro consultado.

Palavras-chave: Micromouse. Arduino. Placa de Circuito Impresso. Impressão 3D. RFID. Multirrobô.

Abstract

Search and rescue activities have an elevated risk associated with their execution and therefore need well-defined strategies to be done. In this sense, simulation environments are essential to test conditions and analyze results of an implemented method. As a trend, cooperation between different robots (multi-robot system) is an interesting solution to assist in this type of situation. This project aims to develop an autonomous vehicle with sensory ability to identify obstacles and adjacent robots, ability to navigate based on sensors' data, capability to communicate wirelessly with other robots and radiofrequency communication to track objects enabled for this type of message sharing, considering a lower cost comparing to commercial models and using manufacturing equipment available at the University. The design method was based on requirements assessment, budget constraints, component definition, electronic board layout, mechanical structure design, testing and evaluation of results. Construction of the electronic board, which includes SMD circuitry, was not viable with the University's own resources until the date of conclusion for this work. Other components met the requirements, guaranteeing adequate dimensions for vehicle's operation, wireless communication, perception of the environment and another robot, and identification of location tags spread throughout the scenario by using an RFID module. Provided that the equipment of the University is functioning properly, it is possible to build a personalized autonomous vehicle, with a cost, in this project, 38% lower than the cost for the main brazilian model evaluated.

Keywords: Micromouse. Arduino. Printed Circuit Board. 3D Printing. RFID. Multirobot.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Sistema multirrobo do tipo enxame com visualização de geometria da rede	13
Figura 2 – Robô do tipo micromouse em um labirinto de competição	16
Figura 3 – Placa microcontroladora Arduino MEGA	17
Figura 4 – Exemplo de placa de circuito impressa gerada por corrosão	19
Figura 5 – Impressora 3D baseada em extrusão de plástico	20
Figura 6 – Esquema de comunicação RFID	21
Figura 7 – Esquema de comunicação de um dispositivo WiFi em uma rede	21
Figura 8 – Representação esquemática do plano de projeto	23
Figura 9 – Motor escolhido com encoder magnético embutido	26
Figura 10 – Módulo RFID NFC PN532	26
Figura 11 – Módulo Wi-Fi ESP8266-01	27
Figura 12 – Esquema de detecção de robô adjacente com situações possíveis de colisão	28
Figura 13 – Adaptador TQFP100 utilizado para o ATMEGA2560	29
Figura 14 – Representação esquemática do circuito eletrônico	30
Figura 15 – Circuito de alimentação, incluindo conectores e saídas	31
Figura 16 – LEDs indicadores de funcionamento	32
Figura 17 – Circuito para o microcontrolador, incluindo ramo auxiliar de reset	33
Figura 18 – Circuito da interface de comunicação (serial e ICSP)	33
Figura 19 – Ramo do circuito com os sensores ultrassônicos e elementos de detecção de outro robô	34
Figura 20 – Circuito para módulo Wi-Fi com divisores de tensão	35
Figura 21 – Circuito para módulo RFID	35
Figura 22 – Circuito de acionamento dos motores	36
Figura 23 – Layout no software de modelagem. Da esquerda para a direita: máscara de solda e trilhas a serem usinadas	37
Figura 24 – Estrutura mecânica no software de modelagem	38
Figura 25 – Vista de topo do veículo com as dimensões da sua seção retangular	42
Figura 26 – Print do teste realizado para envio de mensagens pelo módulo Wi-Fi	43
Figura 27 – Da esquerda para a direita: região inferior e topo da placa usinada	45
Figura 28 – Estrutura do veículo produzida em impressora 3D	47

Lista de tabelas

Tabela 1 – Lista de Componentes e Custos	39
--	----

Lista de abreviaturas e siglas

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
FEMEC	Faculdade de Engenharia Mecânica
FMD	<i>Fused Deposition Modelling</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
ICMS	Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
ICSP	<i>In-Circuit Serial Programming</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LiPo	<i>Lithium Polymer</i>
LMEST	Laboratório de Mecânica de Estruturas
MAPL	Laboratório de Planejamento Automático de Manufatura
NFC	<i>Near Field Communication</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RFID	<i>Radio-Frequency Identification</i>
SMD	<i>Surface Mount Device</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TTL	<i>Transistor-transistor Logic</i>
UART	<i>Universal Synchronous Receiver/Transmitter</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UFG	Universidade Federal de Goiás
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	13
1.2	Justificativa	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Micromouse	15
2.2	Microcontroladores e Plataforma Arduino	15
2.3	Placa de Circuito Impresso	17
2.4	Prototipagem Rápida e Impressão 3D	18
2.5	RFID e NFC	20
2.6	Módulo de comunicação Wi-Fi	21
3	METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO	22
3.1	Definição de requisitos do sistema	23
3.2	Avaliação das restrições orçamentárias do projeto	24
4	PROJETO DO MICROMOUSE	25
4.1	Definição dos componentes	25
4.2	Design da Placa de circuito impresso	30
4.3	Desenvolvimento da estrutura mecânica	37
5	IMPLEMENTAÇÃO E TESTES	39
5.1	Relação de materiais e custos	39
5.2	Confecção da PCB	39
5.3	Estrutura mecânica	40
5.4	Testes	40
5.4.1	Componentes e software para teste	40
5.4.2	Circuito eletrônico	41
5.4.3	Estrutura mecânica	41
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
6.1	Operação na bancada	42
6.2	Comunicação sem fio	43
6.3	Comunicação por radiofrequência para rastreamento de veículo	44
6.4	Percepção do ambiente e de robô adjacente	44
6.5	Placa de Circuito Impresso	44
6.6	Estrutura mecânica com suporte para guincho	46

6.7	Preço em relação a modelos comerciais	47
7	CONCLUSÕES	49
7.1	Projetos Futuros	50
	REFERÊNCIAS	52
	APÊNDICES	54
	APÊNDICE A – CÓDIGO DE TESTE DO MÓDULO WI-FI	55
	APÊNDICE B – CÓDIGO DE TESTE DO DRIVER DO MOTOR .	57
	APÊNDICE C – CÓDIGO DE TESTE DO MÓDULO RFID	61

1 Introdução

Missões de busca e salvamento constituem um ato de evacuação de indivíduos que requer elevada coordenação entre a equipe de resgate, considerando que por muitas vezes não se tem certeza da localização exata das vítimas (SOUSA, 2011). O Departamento de Defesa americano ainda define formalmente a busca e salvamento como “o uso de aeronaves, veículos de superfície, submarinos e de equipes de resgate e equipamentos especializados para buscar e resgatar pessoas em perigo, em terra ou em mar, que estejam num ambiente de difícil sobrevivência” (CHAVES, 2013).

No que diz respeito a buscas terrestres, o mapeamento do cenário é essencial, segundo o próprio Corpo de Bombeiros (2006). De acordo com este, é de extrema importância que a equipe de resgate saiba se orientar durante uma operação de busca. Adentrar em matas e florestas sem conhecimento básico de orientação, constitui um ato de grande imprudência, podendo levar a equipe inteira a se perder e até mesmo a morte. Segundo Ferguson (2008), técnicas modernas de busca consideram, inclusive, perfil comportamental, probabilística e interpretação de terreno para estimar a localização de indivíduos a serem resgatados. Ferguson (2008) discute em seu artigo, por exemplo, a segmentação de uma área de busca por um adolescente autista na Virgínia, EUA, por meio de um histórico de dados sobre indivíduos perdidos no local e um relatório sobre o comportamento do indivíduo. O objetivo principal da divisão do mapa em regiões probabilísticas é maximizar a chance de sucesso na missão através da busca em áreas mais críticas primeiro.

A aplicação e uso de robôs para atuar na busca e salvamento das vítimas visa auxiliar socorristas e até mesmo substituir o trabalho humano em locais de difícil acesso, tal como cenários pós-catástrofes naturais, com chance de explosões ou mesmo com níveis de radioatividade acima do normal.

Neste sentido, com o interesse por desenvolver atividades mais complexas de forma autônoma, laboratórios ao redor do mundo estudam cada vez mais formas cooperativas de trabalho entre diferentes unidades robóticas, sistema este conhecido como multirrobô. Em síntese, quando uma determinada tarefa é executada com o trabalho de dois ou mais robôs, os quais trocam informações ou não, considera-se esta atividade como parte de um sistema multirrobô (PINHEIRO, 2009). A figura 1 demonstra um sistema do tipo enxame, composto por uma grande quantidade de robôs no mesmo espaço, interagindo entre si para atingir um objetivo comum (PASSOS; CHAIMOWICZ, 2011). O principal interesse de pesquisa na área é simplificar a tarefa a ser executada por cada robô, diminuindo sua complexidade construtiva e incrementar a eficiência e velocidade do sistema. No caso de robôs utilizados para localização, por exemplo, a atuação de forma cooperativa permite

a varredura de uma área maior em um menor intervalo de tempo quando comparado ao uso de um único robô (ODAKURA, 2006). Além disso, é interessante o fato de existir busca em diversas áreas de uma determinada região ao mesmo tempo, igual ao número de unidades sendo utilizadas.

Outro ponto a ser considerado em atuação cooperativa de robôs é a troca de informação entre eles, seja esta direta ou mediada. Em robôs aplicados em localização, o conjunto de informações pode ser utilizado para identificar regiões já percorridas, construir um mapa, e para modificar o planejamento das próximas etapas. Isto evita que robôs percorram os mesmos caminhos, inclusive ao mesmo tempo, pois a rota de cada um pode ser planejada sabendo do caminho que os demais irão percorrer.

Para robôs mais simples, o mapeamento futuro de atuação é muitas vezes inexistente, dada limitação de velocidade para processamento e troca de informações. Nestes casos, é importante gerenciar o quê, quando e para quem enviar um certo dado, evitando sobrecarga do sistema. A maioria das técnicas de localização existentes são guiadas por detecções, de modo que um robô se comunica com outro quando detecta a presença deste a uma certa distância (ODAKURA, 2006). Durante a troca de informações, ambos podem informar por onde passaram, onde estão e o caminho em que estavam seguindo.

Visando simular estratégias de busca, mapeamento do cenário e resgate em ambiente terrestre, um trabalho de doutorado do MAPL propõe a disposição de veículos autônomos em um cenário de labirinto. Este atual projeto busca desenvolver unidades robóticas em formato *micromouse*, comumente aplicadas na locomoção no interior de labirintos, para auxiliar na montagem de um sistema multirrobô para suprir a bancada de simulação a ser construída na tese em andamento. Tem-se por objetivo a construção a um custo acessível e com recursos específicos, como será discutido adiante. É de interesse também que sejam armazenadas informações sobre a posição atual dos robôs, vítimas encontradas e terreno mapeado até o momento. Os robôs podem compartilhar dessa informação, tendo conhecimento do que cada um visualizou do cenário. Isto permite alterar as estratégias de busca em tempo real, dadas as condições de cenário e localização dos robôs socorristas no intervalo de tempo de interesse. A utilização dos veículos para simular situações de busca é útil para a validação e otimização das estratégias definidas por uma equipe de resgate, bem como possibilita a visualização de problemas antecipadamente à ocorrência destes durante uma ação em campo.

Por instância, os ambientes de busca e salvamento simulados a partir do uso das unidades robóticas desenvolvidas neste trabalho serão percorridos e mapeados por meio de um sistema cooperativo distribuído. Os robôs identificarão a presença de outro robô por meio sensorial.

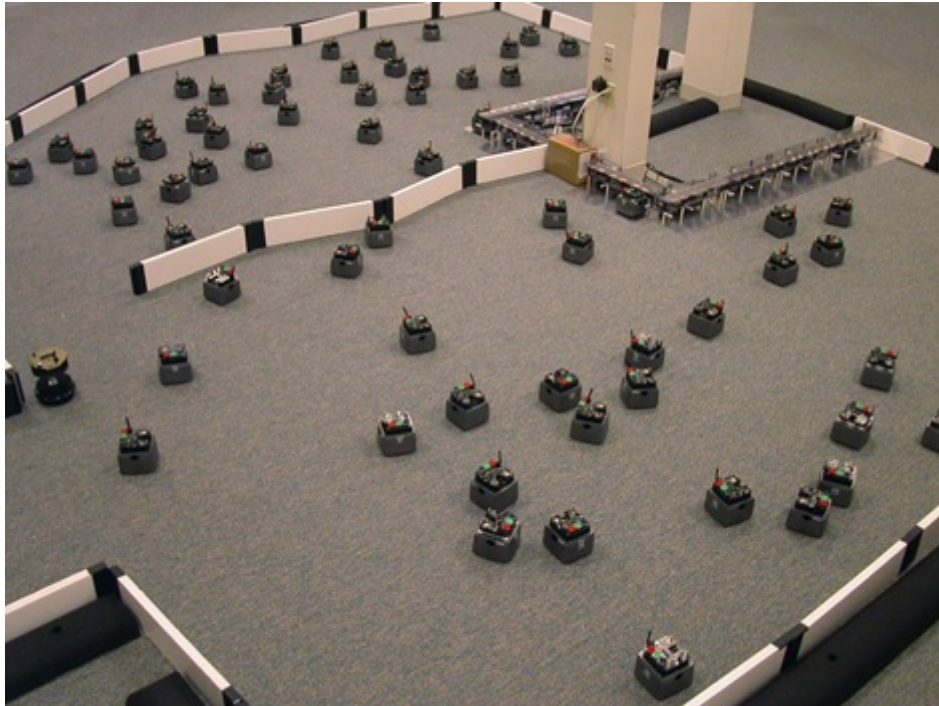


Figura 1 – Sistema multirrobo do tipo enxame com visualização de geometria da rede

Fonte: <<https://people.csail.mit.edu/jamesm/project-MultiRobotSystemsEngineering.php>>, acesso em 19/06/2017

1.1 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo projetar e construir unidades robóticas terrestres em formato *micromouse* para uma bancada de simulação de operações de busca e salvamento. Os objetivos específicos são listados a seguir:

- Projetar um robô com as dimensões que permitam sua operação na bancada;
- Implementar módulo de comunicação sem fio;
- Implementar capacidade sensorial para percepção do ambiente;
- Projetar e construir uma placa de circuito impresso (PCB) contendo os componentes;
- Projetar e construir a estrutura mecânica de apoio com suporte para guincho;
- Montar conjunto final, incluindo motores e baterias;
- Realizar testes para comprovar o funcionamento do robô;
- Apresentar um preço menor que modelos comerciais presentes no mercado.

1.2 Justificativa

Existem modelos comerciais de unidades robóticas em formato *micromouse* disponíveis para venda em lojas físicas e virtuais. No entanto, a aplicação em que tais robôs serão utilizados no laboratório requer a personalização e inserção de módulos de comunicação Wi-Fi e leitoras de *tags* RFID, o que não é comumente observado nos modelos vendidos. Além disso, estes apresentam preços elevados e muitas vezes o seu projeto não é aberto, o que dificulta modificações a níveis de *hardware*, por exemplo.

Dadas estas condições, este trabalho é proposto para elaborar um projeto que visa atender às necessidades específicas do laboratório por meio do projeto de um circuito eletrônico personalizado. O intuito é mantê-lo sob licença de uso livre para que o mesmo possa ser modificado conforme a necessidade. Outro ponto para justificar a execução deste projeto é a redução de recursos necessários para produzir esta unidade robótica quando comparado com um modelo comprado. Como a Universidade dispõe de uma máquina para usinar placas de circuito eletrônico e impressora 3D para fabricar a estrutura mecânica, os custos estão limitados à compra de componentes, e consumo de matéria-prima e energia pelo maquinário. Por este ponto de vista, a economia pode ser significativa, como será discutido no capítulo de Resultados. Vale ressaltar que este trabalho não se preocupa com características mecânicas do material da estrutura do veículo, tais como rigidez, resistência à tração, à torção e ao cisalhamento.

2 Fundamentação Teórica

Este capítulo trata de conceitos e definições fundamentais para o entendimento do restante do trabalho. Primeiramente discute-se sobre o formato *micromouse* de robô e suas características principais. Em seguida, fala-se sobre microcontroladores e a plataforma Arduino, tratando também dos métodos de fabricação aplicados no projeto, tanto para o circuito eletrônico quanto para a estrutura mecânica. Por fim, apresenta-se conceitos envolvendo os módulos de comunicação envolvidos neste projeto.

2.1 Micromouse

O robô móvel terrestre utilizado neste trabalho é inspirado no formato *micromouse*, o qual ficou conhecido após a criação de competições em que pequenos robôs devem solucionar labirintos no menor tempo possível. Ao percorrer o caminho, o robô deve registrar suas posições, mantendo em memória a configuração do labirinto (BORGES, 2014). Ao alcançar o centro, este deve retornar à sua posição de partida. A figura 2 exibe um *micromouse* em um labirinto típico de competição.

Para este tipo de competição, os robôs apresentam uma constituição característica: um chassi montado sobre a placa de circuito impressa ou com adicionais de plástico e metal; dois motores de corrente contínua em lados opostos; bateria; sensores de detecção de obstáculos, normalmente infravermelhos ou ultrassônicos; um microcontrolador que recebe sinais dos sensores e comanda os motores de acordo com estes dados. O robô deste trabalho tem os princípios básicos orientados pelo modelo de *micromouse*, mas possui a adição de outros elementos pertinentes ao projeto, como módulo de comunicação sem fio, módulo RFID e aparato para detecção de robô adjacente.

2.2 Microcontroladores e Plataforma Arduino

Os microcontroladores tiveram sua precursão a partir dos microprocessadores, surgidos na década de 70. Com base na arquitetura destes e adicionando periféricos básicos integrados em uma única unidade, desenvolveu-se um componente equivalente ao uso de um microprocessador e seus adicionais. Após certo tempo e miniaturização, os microcontroladores passaram a ser referência para aplicações que necessitam de processamento, baixa demanda de energia, baixo custo de hardware e um elemento que ocupe pouco espaço físico (MARTINS, 2005).

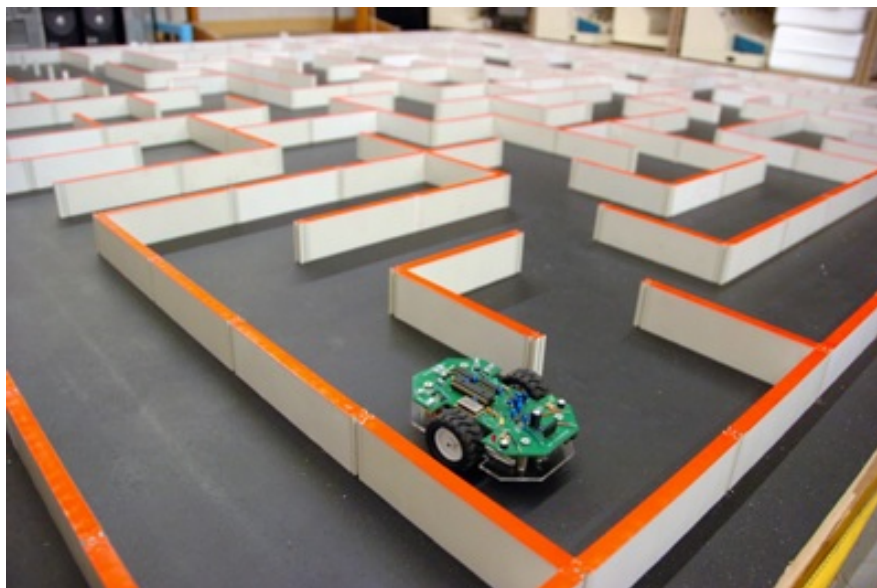


Figura 2 – Robô do tipo micromouse em um labirinto de competição

Fonte: <<https://www.ocf.berkeley.edu/~jordanwo/micromouse.html>>, acesso em 19/06/2017

Microcontroladores, de modo geral, são pastilhas eletrônicas que possuem uma unidade central de processamento, memória e barramento com pinos de entrada/saída, podendo estes serem digitais ou analógicos. Por meio de programação lógica digital, a qual pode ser abstraída a nível de software, saídas podem ser comandadas pela unidade de processamento com base nos sinais de entrada e na lógica de controle. Expandindo a definição, microcontroladores incorporam em um mesmo encapsulamento: microprocessador – processa dados por meio de instruções; memória de programa – memória permanente que armazena o conjunto de instruções dos programas gravados; memória de dados – memória volátil que armazena valores temporários de dados proveniente de programa gravado; pinos de entrada/saída – barramento para ligação com o meio externo, limitado a tensões e correntes específicas de acordo com cada fabricante; periféricos como conversores analógico/digital e digital/analógico, comunicação serial, geradores de modulação por largura de pulso (PWM), temporizadores cão de guarda (WatchDog Timers – WDTs). A inclusão destes itens em um único chip é a principal diferença para microprocessadores, os quais não contam com tantos periféricos (MARTINS, 2005).

O Arduino é uma plataforma de microcontroladores surgida na Itália, em 2005, visando criar um microcontrolador para projetos e protótipos que seja mais acessível tanto em questões de custo como de software. Uma grande vantagem desta plataforma é a disponibilização de hardware e software open-source (CAVALCANTE et al., 2014). A grande popularização do Arduino fez com que diversos fabricantes produzissem módulos e bibliotecas que integram os dispositivos a um microcontrolador da família Arduino.

A família Arduino é baseada em placas que utilizam microprocessadores ATMEGA de 8 bits da fabricante Atmel, os quais são construídos a partir de uma arquitetura com instruções reduzidas: RISC - *Reduced Instruction Set* (EVANS; NOBLE; HOCHENBAUM, 2013). A plataforma e arquivos são licenciados pela *Creative Commons*, uma organização não governamental da Califórnia, a qual regulamenta o uso de suas licenças para cópia e compartilhamento em meios menos restritos que o tradicional "todos os direitos reservados" (CAVALCANTE et al., 2014).

Os microcontroladores da família Arduino podem ser programados por meio de interface serial com um computador. Esta plataforma dispõe de um software próprio para criação de código e gravação – Arduino IDE. Este processo também pode ser executado normalmente por meio de editores de textos convencionais, compilado e transferido via terminal (como o aplicativo CMD do sistema operacional Windows ou o *Bash* de sistema operacional Linux Ubuntu) para as placas (ARDUINO, 2017). A figura 3 demonstra uma placa Arduino MEGA.



Figura 3 – Placa microcontroladora Arduino MEGA

Fonte: <<https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega>>, acesso em 19/06/2017

2.3 Placa de Circuito Impresso

Uma placa de circuito impresso, também conhecida por PCB (do inglês *Printed Circuit Board*) é uma placa contendo uma ou mais camadas de material condutor (normalmente cobre) fixadas a uma placa isolante (e.g. fibra de vidro, fenolite ou fibra de poliéster). As conexões elétricas são estabelecidas por ligações feitas por meio do material condutor. Estas conexões são conhecidas por trilhas. A sua formação se dá pela retirada

de material da camada condutora, gerando trilhas isoladas e conectadas de acordo com o interesse do projetista. A retirada ocorre por processos químicos ou mecânicos. Atualmente, os métodos mais comuns são corrosão e fresagem (LUCCA, 2013). Como será discutido no restante do trabalho, espessuras de trilhas são padronizadas em função de milésimos de polegada. A nomenclatura "T + tamanho" é utilizada nestes casos. Como referência, o termo T20 indica um tamanho de 20 milésimos de polegada.

Neste trabalho, dois métodos foram aplicados. Para ambos deles, o layout virtual da placa foi gerado a partir de software de desenho de circuitos eletrônicos. De modo geral, este permite a seleção dos componentes, conexão elétrica entre eles e roteamento das trilhas que serão refletidas no modelo real.

Um dos métodos de fabricação foi utilizado na empresa que gerou o primeiro modelo de placa para testes. Trata-se da corrosão com perclorato de ferro. Nesta tratativa, a imagem das trilhas é gravada na superfície a ser corroída. Para esta gravação, utiliza-se um papel fotolito com a impressão das trilhas em questão. Tinta fotossensível é aplicada sobre a superfície do metal. O fotolito é posicionado na região de interesse sobre o cobre e o conjunto é exposto à luz ultravioleta. A tinta fotossensível é fragilizada e removida nas regiões que não possuem cobertura de fotolito com impressão. Posteriormente, é feita a revelação da imagem com a retirada da tinta fragilizada por meio de solução de bicarbonato de sódio com água. Restando apenas a imagem de interesse na superfície do cobre, a última etapa constitui na corrosão do metal através da imersão em solução aquosa de perclorato de ferro. O resultado final é a placa com as conexões demarcadas, a qual precisa apenas passar por furação para ter uso final. Um guia completo para elaboração de placas pode ser encontrado na referência utilizada para este parágrafo – “Guia para a elaboração de placas de circuito impresso” (LOPES, 2016). A figura 4 contém uma placa gerada por corrosão química.

O segundo método utilizado foi o de usinagem da superfície do metal por meio de uma fresadora de controle numérico computadorizado (CNC). Neste processo, o layout da placa é usado como base para gerar um código de coordenadas interpretável por uma máquina CNC. Existem softwares capazes de exportar os arquivos de layout virtual da placa no formato Gerber, o qual pode ser convertido em linguagem de máquina. Como explica Lucca (2013), ao seu utilizar uma fresa com perfil e espessura adequados, pode-se retirar material de forma a confeccionar o contorno das trilhas do circuito de interesse.

2.4 Prototipagem Rápida e Impressão 3D

A estrutura mecânica do veículo foi construída por meios de prototipagem rápida, isto é, métodos que geram peças diretamente a partir de um desenho sem a necessidade de desenvolvimento de moldes ou ferramental adicional, o que é ideal para a produção de

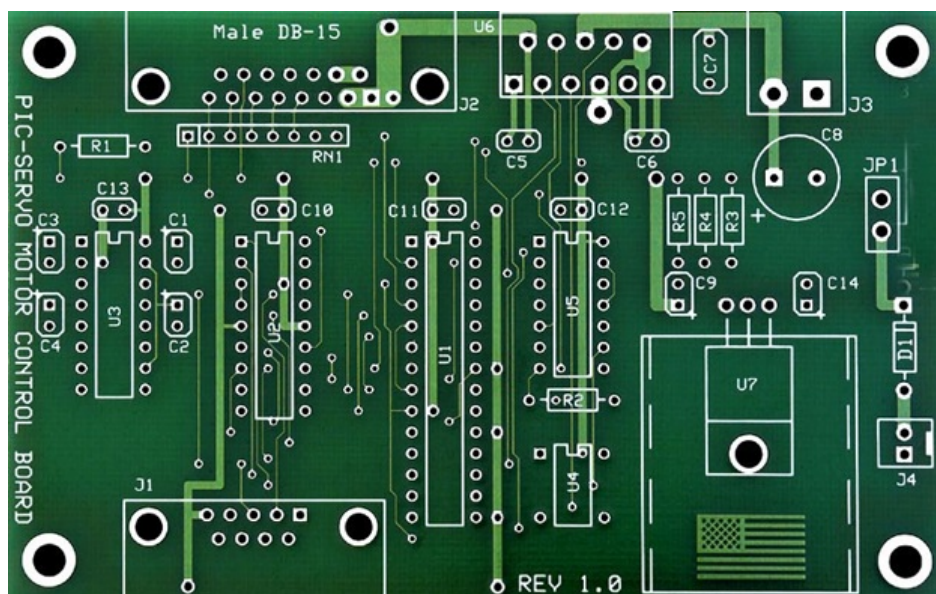


Figura 4 – Exemplo de placa de circuito impressa gerada por corrosão

Fonte: <<http://www.electronicandyou.com/blog/printed-circuit-board-design-diagram-and-assembly.html>>, acesso em 20/06/2017

pequenas quantidades e para aumentar a flexibilidade do projeto. O método de prototipagem rápida em questão foi a impressão 3D, o qual se baseia no princípio de executar diversos fatiamentos da figura, geralmente na horizontal, obtendo uma fina camada da peça que é impressa através do processo de deposição de material. Com a sobreposição de várias camadas consecutivas, obtém-se o objeto final desejado (TAKAGAKI, 2013).

A técnica de impressão do equipamento disponível no laboratório MAPL é a *Fused Deposition Modelling* (FDM). Nesta, é utilizado um material que se funde (extrusão) dentro de um conjunto extrusor, tornando-o quase líquido e formando um fino cordão que é depositado sobre uma plataforma semiaderente ao material. Como dito, a geração da peça é pela deposição de camadas consecutivas. Primeiramente, deposita-se o cordão para formar a primeira camada da figura 3D desejada ao se solidificar na plataforma. Após isso, o conjunto extrusor é levado à altura da segunda camada e novamente o material é depositado. A precisão deste processo depende da precisão da espessura do cordão que se consegue, o qual é da ordem de 0,1 mm. Geralmente, o material a ser extrudado é um termoplástico tipo ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), PLA (ácido polilático) e similares. Como, em geral, as maiores partes dos equipamentos de consumo são feitos atualmente em plástico ABS, o FDM com uso de ABS aproxima-se bastante da técnica de plástico injetado que a indústria utiliza para produção em massa. As impressoras 3D pessoais que estão se proliferando no mercado, utilizam esta técnica por ser a mais simples e, conseqüentemente, mais barata (TAKAGAKI, 2013). A figura 5 demonstra uma impressora 3D baseada em extrusão, onde se vê o rolo de filamento plástico na cor vermelha.

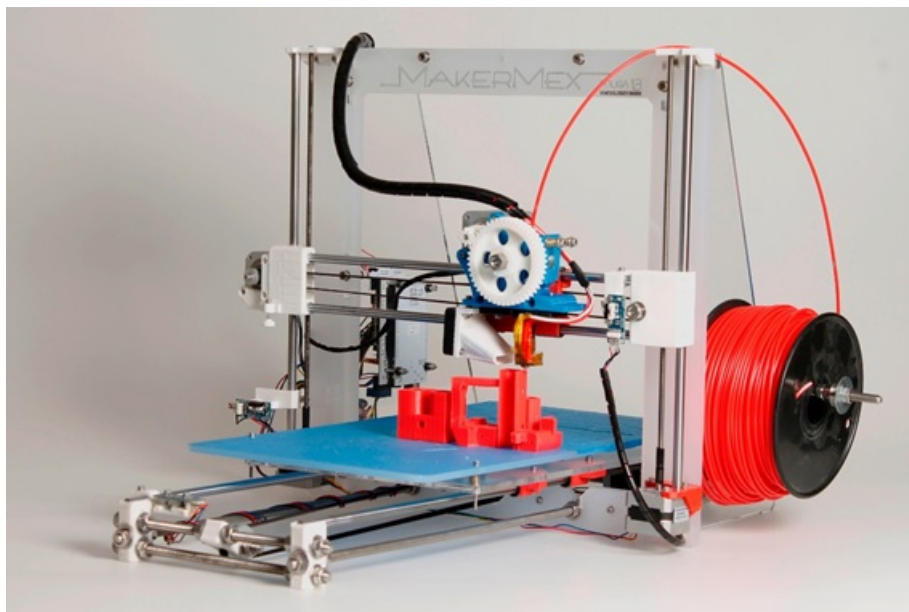


Figura 5 – Impressora 3D baseada em extrusão de plástico

Fonte: <<http://www.campus-party.es/page/5/>>, acesso em 20/06/2017

2.5 RFID e NFC

RFID (do inglês *Radio-Frequency Identification*) é um sistema de identificação de objetos por meio de ondas na faixa de frequência de rádio. Em síntese, um sistema RFID é composto por um transceptor que transmite uma onda de rádio-frequência, geralmente por meio de uma antena, para um transponder (comumente chamado de *tag*). A *tag* absorve a onda de RF e responde com algum outro dado. Em casos de pequena quantidade de dados para comunicação, a *tag* é energizada pela própria onda recebida - *tag* passiva. Já quando é necessário enviar maior volume de dados e/ou percorrer uma maior distância, a *tag* pode conter uma bateria para operação - *tag* ativa (NASSAR; VIEIRA, 2013). A figura 6 ilustra o princípio de funcionamento discutido anteriormente. NFC (do inglês *Near Field Communication*) é uma versão evoluída da comunicação sem fio por rádio-frequência, na qual dois dispositivos podem se comunicar pela emissão e recepção destas ondas. Estes operam na faixa de alta frequência (HF) do RFID, em torno de 13,56 MHz. Uma das principais diferenças em relação ao RFID convencional é a possibilidade de um dispositivo ser tanto um leitor quanto uma *tag*, permitindo comunicação ponto-a-ponto. Neste último caso, os dispositivos são emparelhados, fornecendo maior segurança ao canal e sendo uma razão da escolha de NFC sobre RFID para transações financeiras (NASSAR; VIEIRA, 2013).

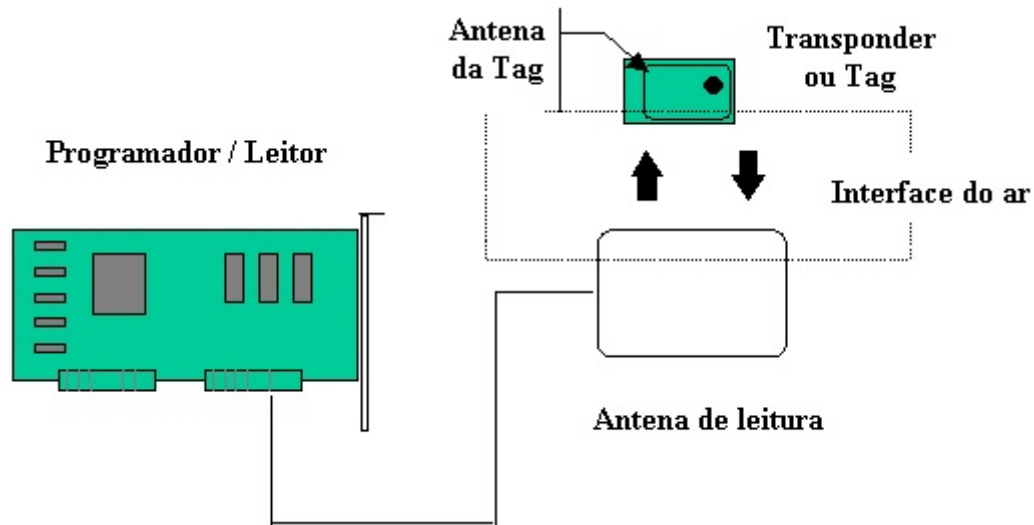


Figura 6 – Esquema de comunicação RFID

Fonte: <<http://paginas.fe.up.pt/ee95203/rfid.htm>>, acesso em 20/06/2017

2.6 Módulo de comunicação Wi-Fi

Módulos de comunicação Wi-Fi convertem sinais recebidos em ondas eletromagnéticas que são transmitidas sem a necessidade de fios. A entrada de dados no módulo é de forma serial. O módulo Wi-Fi é responsável por emitir e ler as ondas que trafegam pelo meio, desde que sejam de interesse da rede constituída, convertendo-as depois para um formato legível pelo dispositivo conectado na interface serial. Seu canal de retorno da informação para o microcontrolador também é serial, o que facilita a leitura, interpretação e reenvio de dados por este (FERNANDES et al., 2016). A figura 7 exibe um esquema exibindo a comunicação de um dispositivo Wi-Fi com um outro dispositivo por canal serial, bem como com um roteador via rede sem fio. Neste caso, o dispositivo Wi-Fi pode acessar, indiretamente, dados de outros componentes conectados à rede sem fio. O roteador funciona como um gerador e organizador da rede sem fio em questão.

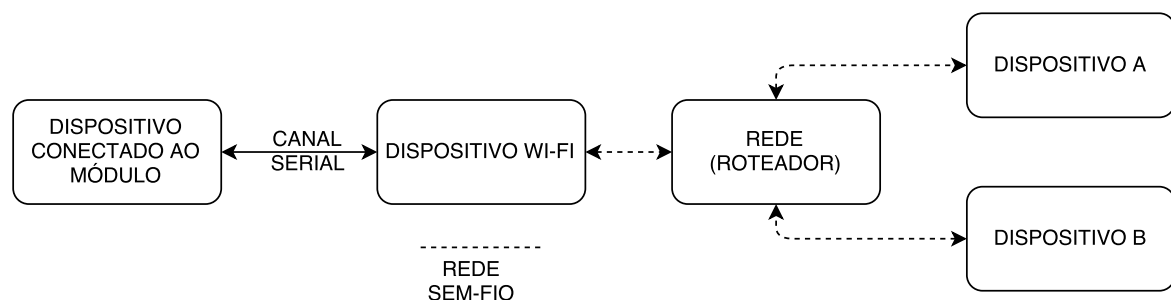


Figura 7 – Esquema de comunicação de um dispositivo WiFi em uma rede

Fonte: Autor

3 Metodologia e Desenvolvimento

Este trabalho foi executado com base na metodologia incremental de desenvolvimento. Grande parte do projeto foi concentrado em design e reajuste, considerando um plano de ação de melhoria contínua.

A estrutura da metodologia pode ser descrita da seguinte forma, representada na figura 8:

- Definição de requisitos do sistema: levantamento de restrições inerentes ao projeto e características do ambiente em que o robô será utilizado;
- Avaliação das restrições orçamentárias do projeto: análise dos meios de fabricação disponíveis, incluindo observação do maquinário disponível em laboratório e pesquisa de meios alternativos mais acessíveis, como equipamentos da UFU ou universidades vizinhas;
- Definição de componentes do veículo: cruzamento entre as informações de características necessárias ao projeto e meios de fabricação viáveis, resultando na escolha de microcontrolador, módulos e demais periféricos do veículo.
- Design da placa de circuito impresso e estrutura mecânica: elaboração do layout e criação dos modelos computacionais da estrutura por meio de softwares CAD, os quais servirão de base para a construção dos objetos reais;
- Implementação parcial com avaliação dos resultados de fabricação: construção de protótipos para testes das montagens elétricas e do conjunto mecânico, verificando o nível de fidelidade obtido em relação ao modelo computacional;
- Ajustes no design (eletrônico e mecânico): alterações no design e concepção do projeto, visando adequar componentes e layout aos meios de fabricação após verificação de resultados provenientes de um protótipo anterior;
- Construção do conjunto final: integração entre todas as partes após estas serem testadas individualmente e terem funcionamento minimamente garantido;
- Testes e resultados: execução de rotinas e testes com o conjunto final, visando gerar os resultados de interesse para a análise deste trabalho.

A definição dos componentes, projeto da placa eletrônica e design da estrutura mecânica são discutidos especificamente no capítulo 4. A construção parcial do conjunto e teste são demonstrados nos capítulos 5 e 6.

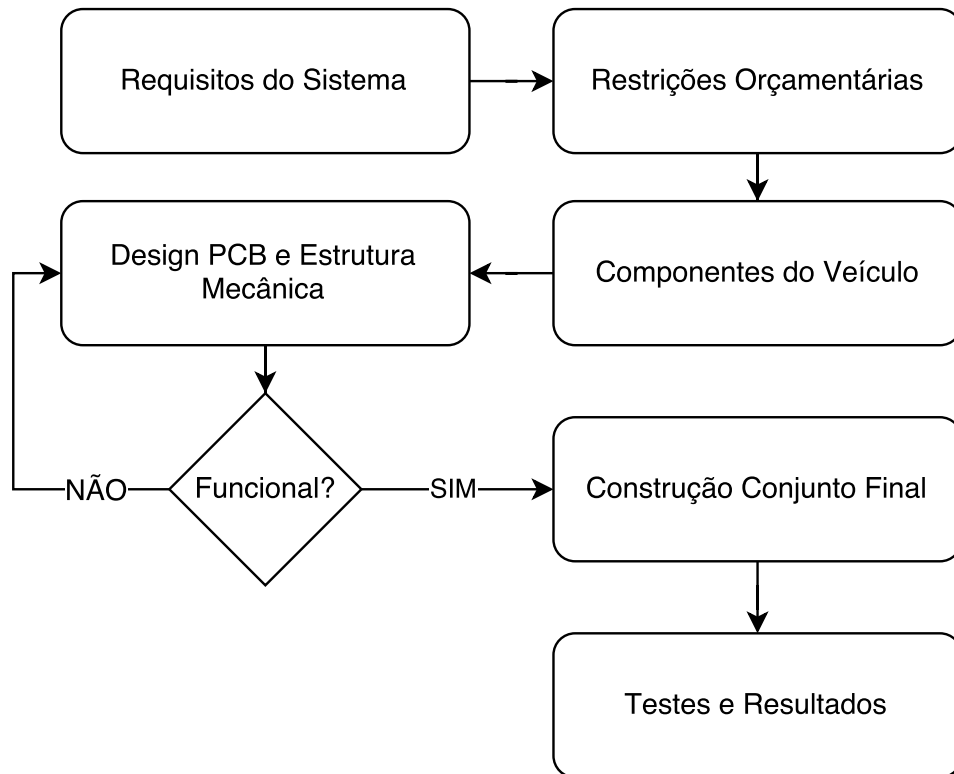


Figura 8 – Representação esquemática do plano de projeto

Fonte: Autor

3.1 Definição de requisitos do sistema

Para desenvolvimento do robô móvel terrestre, foram levantados os seguintes requisitos:

- Dimensões que permitam sua inserção no labirinto construído no laboratório – área interna a um quadrado de 120 mm de lado e altura máxima de 90 mm;
- Oferecer capacidade de comunicação sem fio;
- Possuir capacidade para identificar outro robô adjacente, sendo que a preferência é por sensoramento por toque para permitir aproximação;
- Possuir capacidade de identificar obstáculos no cenário, tais como as próprias paredes do labirinto;
- Possuir sistema de comunicação por radiofrequência capaz de auxiliar no rastreamento do veículo;
- Ser capaz de ser içado por veículo aéreo;
- Ter canais de comunicação e entradas suficientes para suportar os módulos necessários.

A premissa básica do projeto é permitir a construção de um veículo personalizado com custo total menor que um modelo adquirido no mercado.

3.2 Avaliação das restrições orçamentárias do projeto

As limitações de orçamento deste projeto impuseram uma utilização máxima e preferencial de equipamentos do MAPL, FEMEC e UFU, seguido de serviços externos de custo reduzido. Neste caso, a escolha dos componentes é feita em etapa seguinte à avaliação dos meios de fabricação disponíveis, os quais são limitadores do processo. Para a construção do circuito eletrônico, o laboratório possui uma fresadora de fabricação própria, a qual permite fresagem de circuitos com trilhas adequadas para circuitos discretos - de espessura igual ou superior a 40 milésimos de polegada, ou 1,016 mm. Já o LMEST (Laboratório de Mecânica de Estruturas) possui uma mini CNC profissional, a qual permite confeccionar, com qualidade, trilhas com espessura igual ou superior a 20 milésimos de polegada, ou 0,508 mm. A implementação do circuito eletrônico, como será discutido adiante, foi a principal dificuldade enfrentada para a execução do projeto.

Para a estrutura mecânica do veículo, o MAPL possui impressora 3D baseada em FDM. Tal impressora é um modelo construído no laboratório a partir da aquisição de seus componentes comerciais. A resolução oferecida por este equipamento é de cerca de 0,1 mm, o que admitiu-se suficiente para o trabalho, considerando a baixa complexidade das peças que compõem a estrutura. Ressalta-se que não houve preocupação com rigidez e resistência mecânica do material neste projeto.

4 Projeto do Micromouse

4.1 Definição dos componentes

Os componentes foram definidos segundo os requisitos específicos, sendo que bateria e microcontrolador ficaram correlacionados ao restante dos componentes. Uma das principais características observada em todos foi o custo, quesito altamente relevante neste projeto.

- (a) Motores: para mover o conjunto, foi escolhido um par de motores de corrente contínua. Suas características principais são: tensão de alimentação nominal de 6V (permitida variação de 3V a 12V), velocidade de 500 RPM com caixa de redução de 30:1, torque de $2 \text{ N} \cdot \text{mm}$ e encoder embutido com 210 pulsos por revolução. Com este torque e o raio da roda desenhada de 35 mm, a força resultante, considerando superfície plana e desprezando deslizamento da roda, é dada pela equação 4.1:

$$Fr = \frac{\text{Torque}}{\text{raio}} = \frac{2 \text{ N} \cdot \text{mm}}{35 \text{ mm}} = 0,057 \text{ N} \quad (4.1)$$

Como não existem requisitos de locomoção com rápida aceleração para os veículos, admite-se uma aceleração de 10 mm/s^2 . Deste modo, a força resultante calculada anteriormente é suficiente para mover uma massa dada pela equação 4.2:

$$Fr = \text{massa} \cdot \text{aceleração} \Rightarrow m = \frac{0,057 \text{ N}}{0,01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}} \Rightarrow m = 5,7 \text{ kg} \quad (4.2)$$

Esses cálculos são para um único motor, o qual pode ser visto na figura 9. Desta forma, considerando o funcionamento com um par, a potência fornecida é suficiente para mover o conjunto segundo os baixos requisitos de velocidade e massa. A massa estimada para o veículo é inferior a 500 gramas, tendo como referência a massa de 100 gramas do veículo comercial apresentado no link (MICROMOUSEBRASIL, 2017), sem bateria, sem módulos de comunicação e com sensores de ambiente mais leves. Estimativas mais detalhadas serão discutidas na seção de Resultados.

- (b) Leitor RFID: para suprir a necessidade de comunicação por radiofrequência para auxiliar no rastreamento do veículo, optou-se pela inclusão de um leitor de *tags* RFID com capacidade para comunicação por proximidade de campo (*Near Field Communication* - NFC). O módulo leitor RFID escolhido para o projeto foi o RFID NFC PN532. Dentre suas características, destacam-se distância máxima de leitura e gravação de 70 mm, tensão de operação de 5V, interface de comunicação serial e suporte a *tags* RFID populares como Mifare 1k, 4k, CD97BX, IRT5001, RCS_860 e

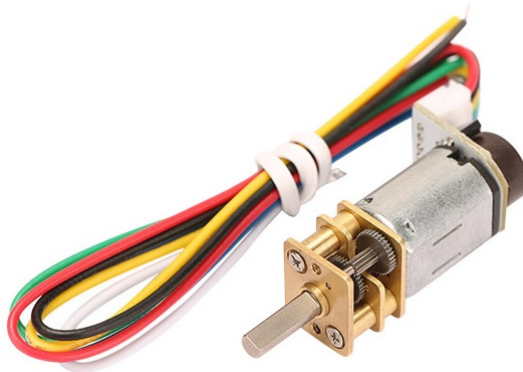


Figura 9 – Motor escolhido com encoder magnético embutido

Fonte: <<http://www.ebay.com/itm/DC6V-90RPM-N20-Encoder-Motor-Reducer-Gear-Motor-DC-Gear-Motor-/172311970547>>, acesso em 21/06/2017

outros. Outra vantagem deste item era a sua disponibilidade no MAPL. Seu suporte para NFC e alcance de comunicação foram decisivos para sua escolha. A figura 10 exibe o modelo discutido.

Sua utilização se dará pelo posicionamento do leitor na região inferior do veículo e leitura de *tags* espalhadas pelo cenário. O objetivo é o armazenamento de informações de localização de outros robôs nas *tags*, permitindo estimar a posição daqueles que tráfegaram sobre as mesmas *tags*.

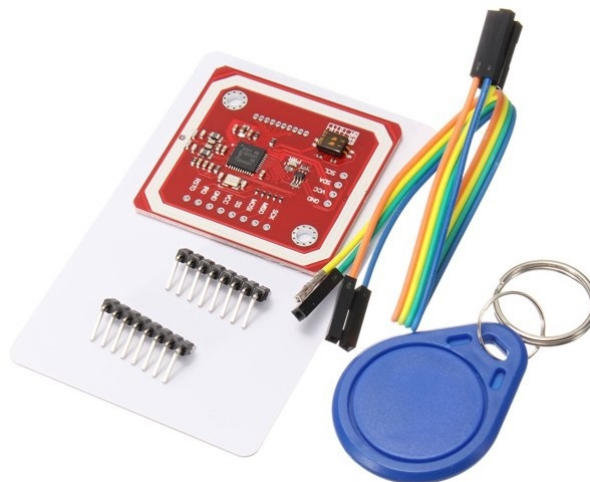


Figura 10 – Módulo RFID NFC PN532

Fonte: <<http://electronic.debgadgets.cf/2016/02/10/bewertungen-p1017796/>>, acesso em 22/06/2017

- (c) Módulo Wi-Fi: para realizar a comunicação entre robôs distintos e uma base fixa, optou-se pela utilização de um módulo de comunicação via rede sem fio. O módulo ESP8266 ESP-01 foi adotado devido ao seu baixo custo e versatilidade, oferecendo

suporte às redes 802.11 b/g/n (padrões IEEE mais utilizados para esse tipo de comunicação atualmente) e interface de comunicação serial. Sua tensão de operação é de 3.3 V, o que necessitou de algumas adaptações no circuito, como será discutido adiante no detalhamento do circuito. O módulo ainda possui alcance de até 90 metros, conforme especificado pelo fabricante. O componente em questão pode ser visto na figura 11.

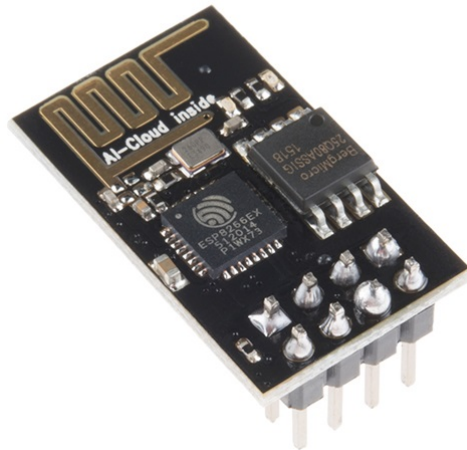


Figura 11 – Módulo Wi-Fi ESP8266-01

Fonte: <<https://www.sparkfun.com/products/13678>>, acesso em 22/06/2017

- (d) Sensores de ambiente: para identificar obstáculos no cenário, optou-se pelo uso de sensores ultrassônicos. O funcionamento deles é baseado na emissão e leitura de ondas ultrassônicas moduladas. A leitura é da própria onda emitida, a qual reflete em superfícies e retorna para o sensor, sendo sua frequência conhecida. Como a frequência de emissão é conhecida pelo sensor, este lê apenas ondas recebidas na mesma frequência. O sensor ultrassônico foi preferido por não sofrer com interferências de luminosidade ou cores do ambiente, além de apresentar custo acessível (da ordem de R\$8,00 por sensor) e grande disponibilidade no mercado. Vale ressaltar que o módulo pode sofrer interferência de sinais vindos de módulos de outros robôs quando os sensores de ambos se encontram frente a frente. A solução para este problema será trabalhada a nível de software, dentro do desenvolvimento do sistema multirrobô para a bancada de busca e salvamento. Esta interferência pode ser tratada por uso alternado dos sensores entre os robôs, tendo cada um operando em intervalos de tempo distintos.

A identificação de outro robô adjacente foi elaborada através da construção de uma estrutura montada no veículo, com conectores elétricos expostos. Um robô percebe outro quando as superfícies metálicas de ambos se tocam dentro das regiões de

interesse. A figura 12 contém uma ilustração do esquema que será discutido adiante. Basicamente, cada robô conta, em cada face, com uma placa que serve para fechar circuito com o robô adjacente ao longo de metade do comprimento da face. Na outra metade estão duas placas, uma carregada positivamente e outra ligada ao terra por meio de um resistor de *pull-down*. Quando estas duas tocam na placa de outro robô para fechar circuito, carga flui da placa positiva para a ligada ao terra. Como esta placa possui um resistor de *pull-down*, ao passo que a corrente circula, uma conexão na extremidade superior do resistor recebe nível lógico alto e esta é ligada ao microcontrolador. Quando não existe corrente circulando, esta extremidade permanece em nível lógico baixo. Deste modo, pode-se concluir que um robô está em contato quando o microcontrolador percebe nível lógico alto em sua entrada. A figura 12 exhibe o esquema mencionado, em situações de colisão frontal e traseira dos robôs. Desconsiderou-se o contato lateral, dada as condições de movimentação destes no labirinto. Note que o posicionamento alternado das placas entre as faces garante que sempre ocorra contato entre as placas de interesse, assumindo um bom nível de alinhamento do veículo no labirinto.

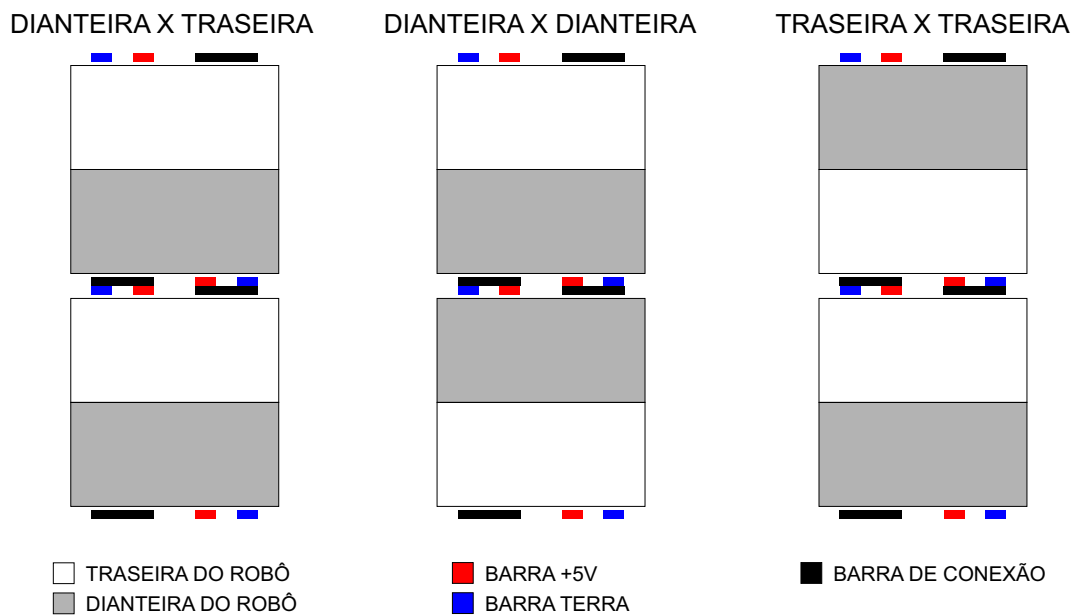


Figura 12 – Esquema de detecção de robô adjacente com situações possíveis de colisão

Fonte: Autor

- (e) Microcontrolador: este foi o componente de escolha mais complexa, dado o conjunto de restrições a serem consideradas. O primeiro critério de análise foi a disponibilidade de portas digitais de entrada e saída. Os módulos anteriores e adicionais necessitam de 22 portas digitais e 3 canais de comunicação serial. A disponibilidade imediata no Brasil foi outro critério adotado, bem como a compatibilidade com os diversos módulos

utilizados. Os meios de fabricação também foram considerados neste ponto. Por questões de disponibilidade de pinos de entrada/saída e canais de comunicação serial, bem como compatibilidade com todos os módulos, o microcontrolador selecionado foi o Atmel ATMega2560, o qual é incorporado em placas de Arduino MEGA. Sua principal limitação é seu encapsulamento SMD, o qual exige trilhas de espessura T20 ou inferior para conexão, sendo que o ideal é um tamanho T10. Deste modo, adaptadores foram adquiridos para expandir as conexões para tamanhos que tornassem a fabricação mais viável (ver figura 13).

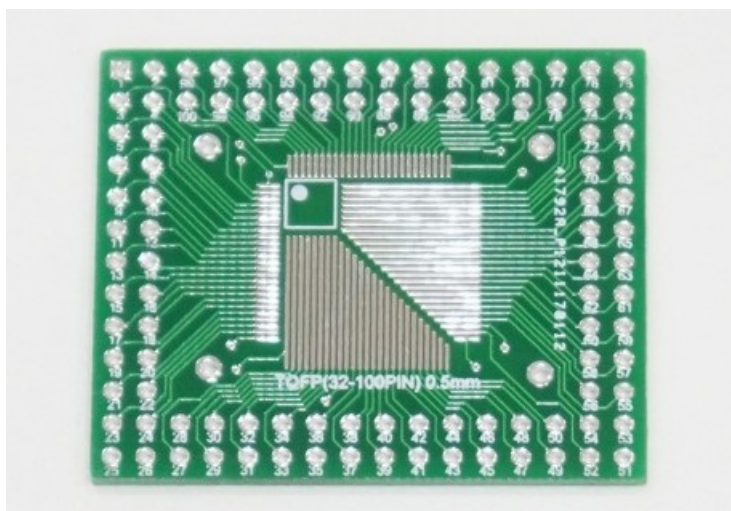


Figura 13 – Adaptador TQFP100 utilizado para o ATMEGA2560

Fonte: Autor

As principais características do ATMega2560 são: *clock* externo de 16 MHz, memória de programa *flash* de 256 kB, tensão de operação de 5V, conversor analógico/digital de 10 bits, 54 pinos digitais de entrada/saída, 16 pinos de entrada analógicos e 4 UARTs (ARDUINO, 2017). A existência de mais de um dispositivo se comunicando de forma serial com o microcontrolador exigiria a criação de um protocolo auxiliar de troca de informação via software para o caso em que fosse utilizado um microcontrolador com uma única entrada serial - tal como o ATMega328p, que possui custo inferior. Nesta situação, o protocolo controlaria a comunicação em uma mesma porta ou simularia um canal serial em outras portas. Dada a frequência baixa de operação do microcontrolador, erros frequentes na execução do programa poderiam surgir.

- (f) Bateria: tendo em vista os componentes anteriores, o limitador de tensão é o motor, requerendo 6V de alimentação. Para suprir estas necessidades, foi escolhido um par de baterias LiPo de 3,7 V e 1100 mAh de capacidade de carga para serem ligadas em série. Com a conexão em série, a tensão de saída é somada, totalizando 7,4 V. A capacidade de carga de 1100 mAh indica que a bateria pode fornecer energia, em

condições ideais, para uma carga que consome 1100 mA durante uma hora. A ligação em série não altera essa capacidade, apenas aumenta a tensão de saída do conjunto.

4.2 Design da Placa de circuito impresso

O circuito de conexões elétricas foi feito utilizando o software Proteus, o qual possibilita a criação do esquema de componentes e ligações, e a confecção do layout da placa de circuito impresso. O circuito foi dividido em alguns ramos principais, os quais são listados a seguir. A figura 14 apresenta um diagrama representativo do circuito eletrônico.

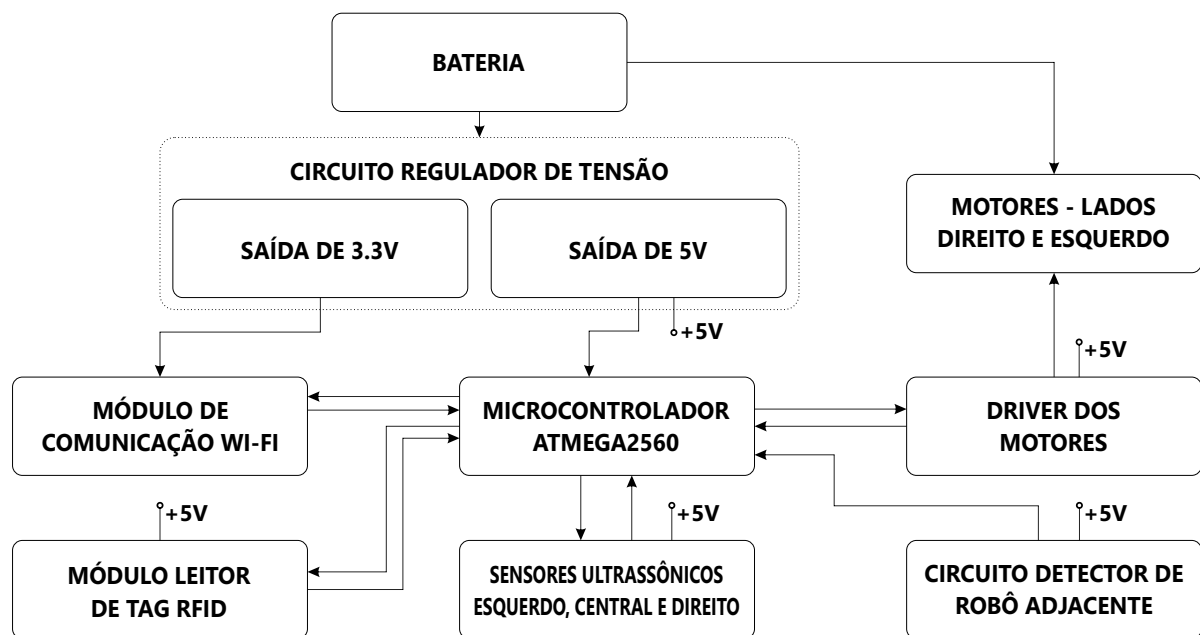


Figura 14 – Representação esquemática do circuito eletrônico

Fonte: Autor

- (a) Alimentação: observando a figura 15, da esquerda para a direita, o circuito de alimentação tem início nos conectores de baterias, os quais são conectados a um terminal para ser acessado externamente pelos motores. A tensão de bateria é conectada a um divisor de tensão que serve de referência para medir o nível de carga da bateria. Na direita da figura, observa-se um ramo que contém um elemento unido à tensão de bateria, no caso um regulador de tensão de 5V - modelo LM7805. Sua saída regulada é utilizada para os componentes que necessitam de alimentação de 5V e também para o regulador de tensão de 3,3 V (um LM1117). A saída deste, por sua vez, é utilizada no módulo Wi-Fi, o qual necessita de uma fonte de 3,3 V. As entradas e saídas de ambos reguladores são conectadas a capacitores que amortecem flutuações nos sinais de tensão de entrada e saída, tal como indicado

nos *datasheets* (FAIRCHILD SEMICONDUCTOR, 2014; TEXAS INSTRUMENTS, 2016). O microcontrolador possui um circuito dedicado para estabilização de sua alimentação, como indicado no seu *datasheet* (ATMEL, 2014).

Os dois ramos intermediários da figura apresentam dois interruptores do circuito – um para a tensão da bateria (segundo ramo a partir da esquerda), que alimenta todo o circuito, e outro para a tensão de alimentação dos motores. Isto é para permitir que o circuito possa ser mantido ligado enquanto os motores estiverem desligados, não correndo o risco que eventuais erros ou falhas de software provoquem o movimento do veículo em momento indesejado, tal como durante a transferência de um novo conjunto de instruções para o microcontrolador.

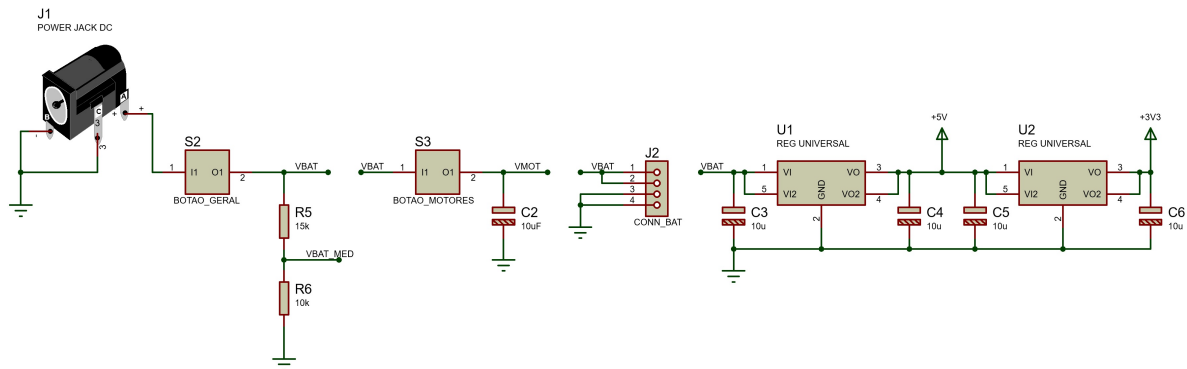


Figura 15 – Circuito de alimentação, incluindo conectores e saídas

Fonte: Autor

- (b) Indicadores de funcionamento: o circuito conta com 3 LEDs para indicar a presença de tensão em 3 ramos principais do circuito: tensão regulada de 5V, tensão regulada de 3,3 V e tensão no ramo de alimentação dos motores, tal como pode ser visto na figura 16.
- (c) Circuito do microcontrolador: a figura 17 apresenta este circuito, o qual possui 4 conectores para o soquete adaptador (componentes J7, J8, J9 e J10), sendo um par de conectores com 14 linhas e 2 colunas, além de outro par de conectores com 13 linhas e 2 colunas, ambos com espaçamento de 0,1 polegada. Um botão para acionar o *reset* também está presente (lado inferior esquerdo da figura). De acordo com o *datasheet* do microcontrolador (ATMEL, 2014), a entrada de *reset* deve ser mantida em nível lógico alto para funcionamento de circuito, sendo que nível baixo reinicia os ciclos do microcontrolador. Para garantir este quesito, um resistor de *pull-up* foi colocado na entrada do *reset*, unido à tensão de 5V. Basicamente, enquanto o botão não é acionado, a tensão na entrada é de nível lógico alto, próxima de 5V. Quando o botão é acionado, o resistor de *pull-up* é conectado ao terra em outra extremidade, fazendo

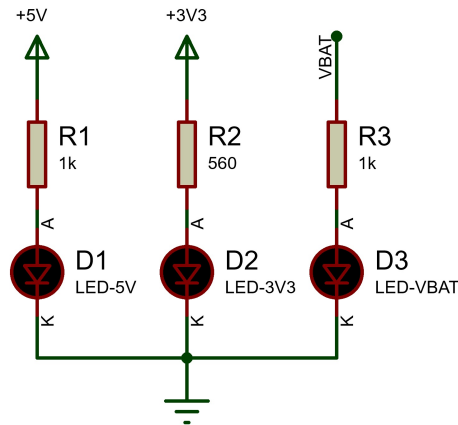


Figura 16 – LEDs indicadores de funcionamento

Fonte: Autor

com que a corrente que o percorre reduza a tensão na sua extremidade para um nível lógico baixo, acionando o *reset*. O microcontrolador necessita de uma referência de *clock* externo (lado superior esquerdo da figura), o qual é obtido por meio da utilização de um cristal de quartzo de 16 MHz, com capacitores acoplados às suas extremidades, visando a estabilização da frequência de oscilação. Conforme orientado pelo *datasheet* do microcontrolador (ATMEL, 2014), dois capacitores cerâmicos de 22 pF foram utilizados.

- (d) Interface de comunicação: para a comunicação do microcontrolador com o meio externo, optou-se por interfaces que já são implementadas no chip, como a serial e ICSP. Essa escolha se deu para evitar o acréscimo de um conversor serial para USB ao circuito, reduzindo a necessidade de aumento de área da placa eletrônica.

Para a conexão serial, um dos canais de comunicação serial do ATmega2560 é utilizado, além de um conector adicional de reset, o qual serve basicamente para sincronizar microcontrolador e componente que está gravando. A partir da figura 18, nota-se que a conexão ICSP possui seis pinos (lado direito da figura), sendo dois de alimentação, um de reset e outros três que são conectados a entradas digitais do ATmega2560 (pinos MISO, MOSI e SCK) – esta conexão é uma estratégia para fornecer um canal de comunicação serial com o microcontrolador sem demandar o uso de suas portas seriais, flexibilizando seu uso, bem como permitindo a gravação de *bootloader* no microcontrolador. O *bootloader* é o *firmware* responsável por permitir a gravação de programas via comunicação serial. O lado esquerdo da figura exhibe a interface TTL, que suporta comunicação por ligação direta a algum dos pares das entradas seriais TX e RX do microcontrolador, existindo também um conector unido ao *reset* - entrada utilizada para informar o microcontrolador sobre o início da comunicação.

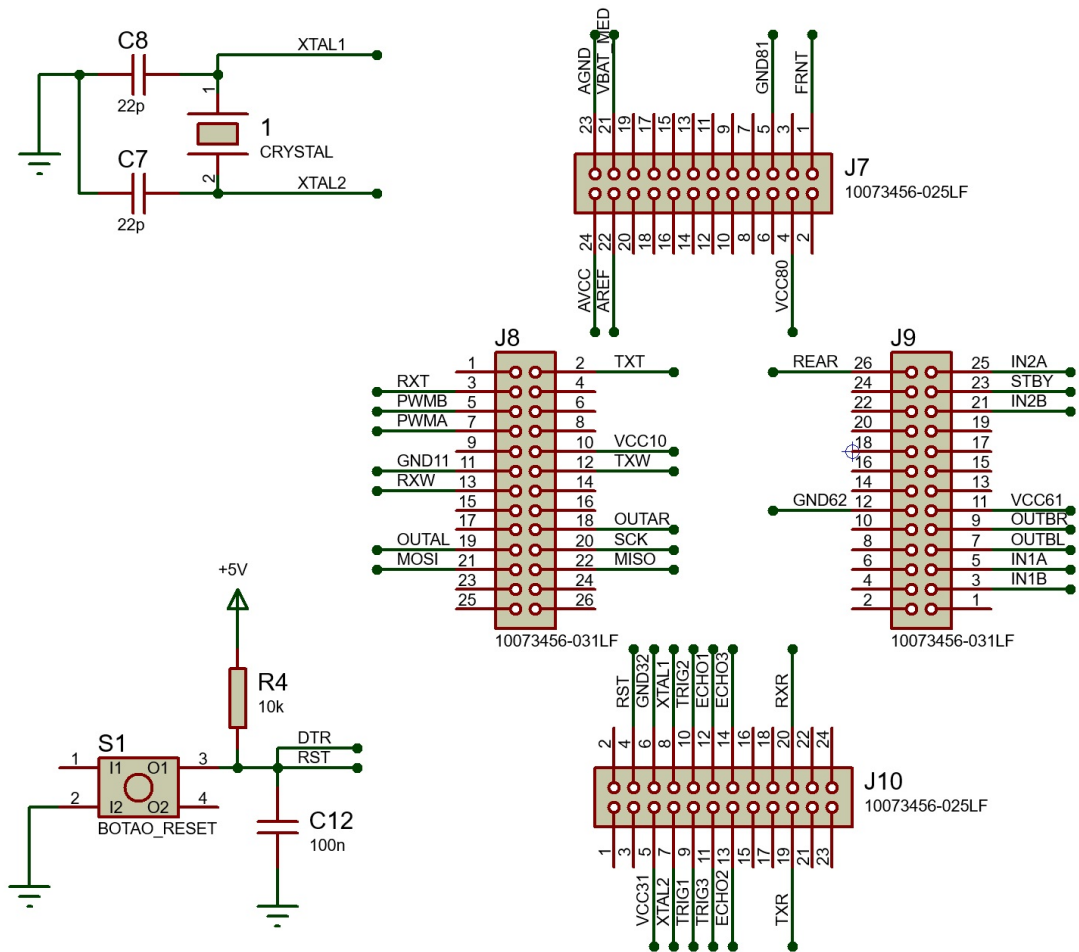


Figura 17 – Circuito para o microcontrolador, incluindo ramo auxiliar de reset

Fonte: Autor

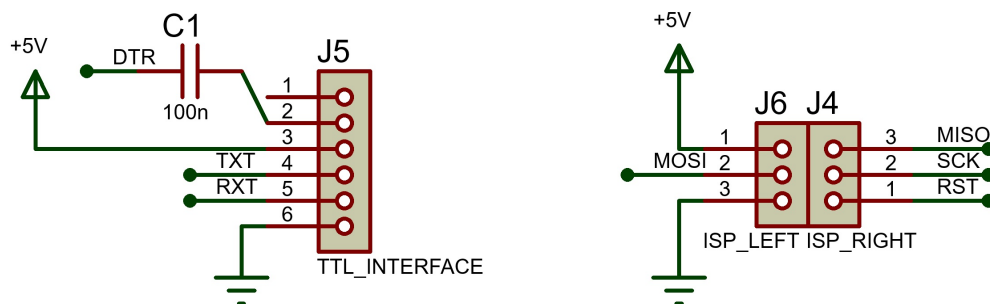


Figura 18 – Circuito da interface de comunicação (serial e ICSP)

Fonte: Autor

- (e) Circuito para sensores do ambiente: observando a figura 19, os sensores de ambiente incluem os sensores ultrassônicos (lado esquerdo da figura) e o circuito de detecção de robô adjacente (lado direito). Para os módulos, existem 4 pinos por unidade: dois de alimentação, um para o disparo da onda ultrassônica e outro para leitura do sinal recebido pelo módulo. Neste caso, apenas os conectores foram alocados. Já o circuito

de detecção de robô adjacente conta com resistores de *pull-down*, utilizados para manter a porta digital do microcontrolador em nível lógico baixo estável na ausência de um sinal de detecção.

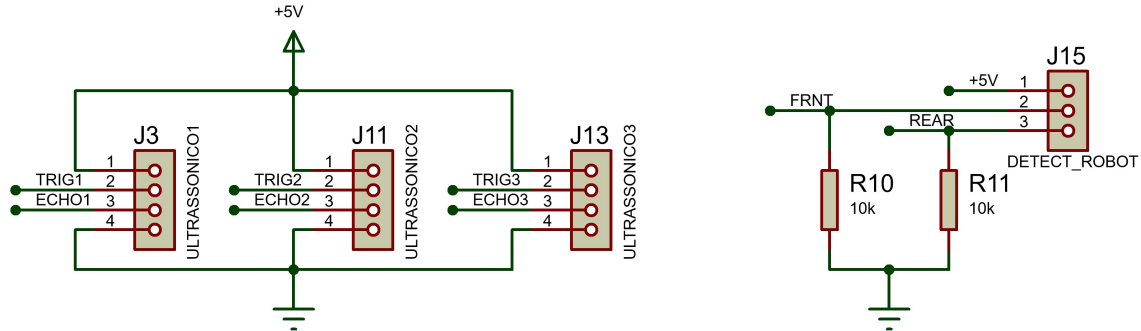


Figura 19 – Ramo do circuito com os sensores ultrassônicos e elementos de detecção de outro robô

Fonte: Autor

- (f) Circuito para módulo Wi-Fi: o módulo Wi-Fi é o único componente do circuito que funciona exclusivamente em 3,3 V. Desta forma, seus sinais são transmitidos a partir desta referência. Como o próprio *datasheet* do microcontrolador informa (ATMEL, 2014), o nível lógico de 3,3 V não apresenta problemas de leitura. No entanto, o envio de comandos pelo microcontrolador a 5 V para o módulo Wi-Fi pode danificá-lo. Deste modo, um divisor de tensão foi alocado no ramo de transferência de dados do microcontrolador para o módulo, como demonstra a figura 20. A relação de resistências usadas permite reduzir o nível de tensão na entrada no módulo. O cálculo da tensão de entrada no módulo (V_{out}) é feito conforme a equação 4.3:

$$V_{out} = \frac{R8}{R8 + R9} \cdot V_{in} \Rightarrow V_{out} = \frac{10k}{10k + 5,6k} \cdot 5 \Rightarrow V_{out} = 3,205V \quad (4.3)$$

Com isto, garante-se que se a tensão de entrada atingir o pico de 5V, o pico de entrada no módulo será de 3,205 V, evitando danos ao circuito. Além dos resistores do divisor de tensão, um terceiro resistor (R7, ver figura 20) é posicionado para unir as portas de *chip enable* e *reset* do microcontrolador a um nível lógico alto, sem curto-circuito. Para o módulo funcionar corretamente, tanto *chip enable* quanto *reset* devem estar em nível lógico alto (novamente, a referência do módulo é 3,3 V).

- (g) Circuito para módulo RFID: o módulo RFID comunica-se por meio de canal serial com o microcontrolador. Como sua tensão de alimentação é 5 V, este ramo do circuito conta apenas com o conector ligado diretamente aos pinos de interesse - alimentação, terra, e um par TX e RX do canal serial (ver figura 21).

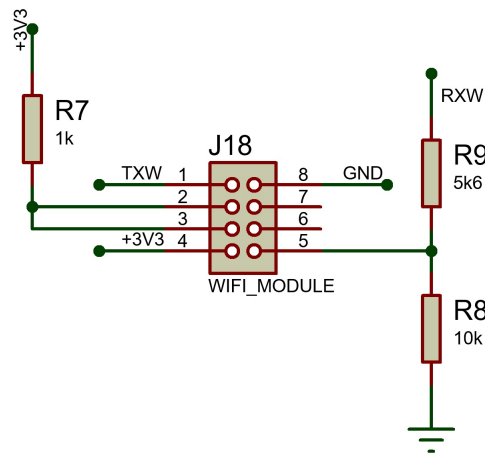


Figura 20 – Circuito para módulo Wi-Fi com divisores de tensão

Fonte: Autor

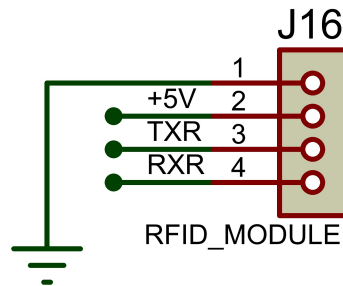


Figura 21 – Circuito para módulo RFID

Fonte: Autor

- (h) Circuito de acionamento dos motores: observando a figura 22, o ramo de acionamento dos motores contém o *driver* (lado direito da figura) e uma barra de conexão J17. A lógica do *driver* é referenciada a 5 V e não requisita nenhum componente adicional. Desta forma, existem os conectores para o driver (conectores J14 e J12 da figura), os conectores de saída para o motor e os conectores de entrada para os fios vindos dos encoders do motor (estando entrada e saída listados no conector J17 da figura).
- (i) Desenvolvimento do layout da placa: após a seleção dos componentes e definição dos variados ramos do circuito, cada um destes foi sendo testado independentemente em protoboard. O intuito foi identificar possíveis erros em cada região do módulo antes da junção do conjunto em um layout de placa de circuito impresso. Com cada módulo testado, prossegue-se com a elaboração do layout efetivo da PCB. Para este design, foi utilizada a máxima largura de trilha possível para garantir o espaçamento mínimo entre trilhas requisitado pela mini CNC profissional, que no caso é de T10. Consequentemente, a largura máxima obtida para trilhas que são conectadas na parte interna dos *headers* (equivalente a conectores) do microcontrolador é T25. Os headers possuem um espaçamento entre pinos de T50.

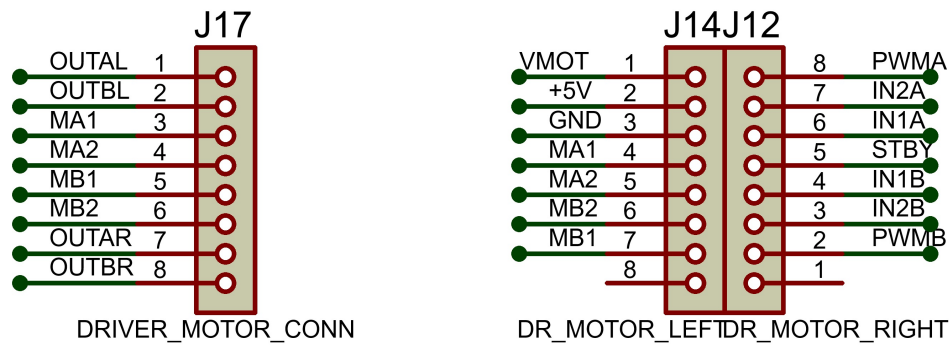


Figura 22 – Circuito de acionamento dos motores

Fonte: Autor

Para o cálculo da largura mínima das trilhas, foi utilizado como referência o guia IPC-2221 – *Generic Standard on Printed Board Design* (ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES, 1998), por meio de uma ferramenta online de cálculo (ADVANCED CIRCUITS, 2017). Os *inputs* necessários ao cálculo são: corrente percorrendo a trilha, espessura de cobre da placa, aumento de temperatura máximo permissível desejado, temperatura ambiente e localização da trilha. Para o circuito em questão, o microcontrolador admite correntes de até 50 mA em suas portas de entrada e saída. O módulo Wi-Fi pode consumir até 300 mA de corrente. O módulo RFID, por sua vez, pode consumir até 140 mA durante a transmissão de dados. O item de maior consumo na placa são os motores, que podem consumir até 700 mA em carga máxima e em máxima rotação. No caso, considerou-se 1,4 A para o conjunto que é alimentado pelo mesmo driver e adotou-se um consumo de 1,5 A para o conjunto motores mais driver. Todos os dados foram baseados nos *datasheets* dos fabricantes. Considerando que a espessura do cobre da placa adquirida é de 1 oz/cm, um aumento de temperatura máximo de 10 °C, uma temperatura ambiente de 25 °C, e trilha em camada externa e exposta ao ar, os valores mínimos de largura de trilha são: T1 para 50 mA, T3 para 300 mA, T1 para 140 mA e T25 para 1,5 A. Ao se aumentar a largura de trilha, diminui-se a resistência e maior é a capacidade de corrente sem que ocorra superaquecimento. Com isso, o limitador de largura passa a ser o próprio equipamento de fabricação. Como padrão, foi adotada uma espessura T25 para as trilhas que precisam cruzar conectores próximos e não são de itens de consumo elevado (superior a 100 mA); T60 para as trilhas vindas da bateria e as utilizadas para o ramo dos motores; e, por fim, T40 para as demais trilhas de controle e tensão localizadas nas demais partes do circuito.

O posicionamento dos componentes levou em conta a sua utilização dentro da estrutura do veículo, bem como uma aproximação de seus pontos de conexão com o microcontrolador, visando facilitar o roteamento das trilhas. Os sensores ultrassônicos, por exemplo, foram posicionados da seguinte forma: um frontal paralelo à frente da

placa, dois laterais com um ângulo de 15 graus em relação a um posicionamento perpendicular ao sensor frontal. Isto foi feito para evitar que o veículo perceba um obstáculo se afastando quando inicia o movimento na direção dele. Com o leve ângulo de saída em relação ao objeto, quando o veículo inicia o movimento na direção deste, a percepção é de que o objeto está realmente se aproximando no momento de desvio da sua direção original. O layout da placa pode ser visto na figura 23.

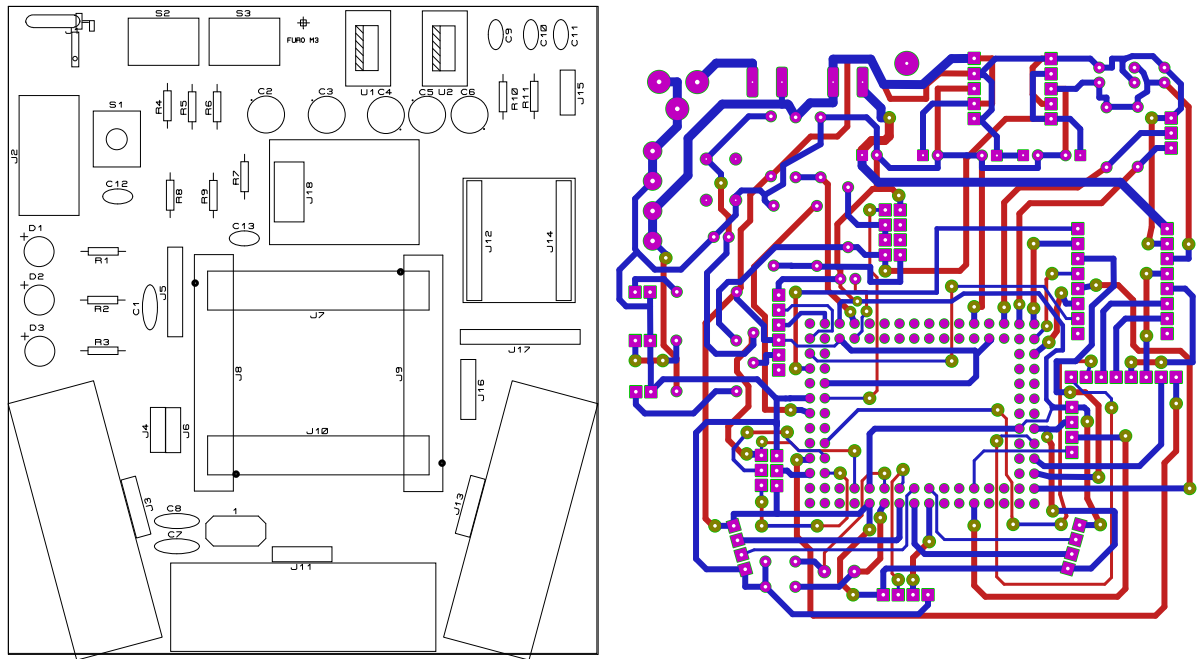


Figura 23 – Layout no software de modelagem. Da esquerda para a direita: máscara de solda e trilhas a serem usinadas

Fonte: Autor

4.3 Desenvolvimento da estrutura mecânica

A estrutura mecânica foi projetada no entorno da PCB e demais componentes. Um cálculo estrutural não foi realizado, dado a massa baixa do conjunto, estimada como um valor abaixo de 500 gramas. Os delineadores do design ficaram relacionados às dimensões máximas admissíveis e limitações da impressora 3D. Nestas, pode-se citar a dificuldade de impressão de formas circulares e pequenos detalhes com dimensões inferiores a 1 mm, mesmo que a resolução teórica da impressora seja 0,1 mm. Alguns componentes com dimensões pequenas tiveram que passar por ajuste manual e fixadores, inicialmente desenvolvidos por pinos que seriam montados com interferência, foram alterados para parafusos M3 – norma métrica, com diâmetro de rosca de 3 mm.

Dentre as principais características do veículo, resalta-se a presença de um suporte para o módulo RFID na sua parte inferior, o qual deixa o módulo a uma distância de 7 mm do solo, e a existência de uma alça para guincho em sua parte superior. Esta será utilizada para içamento por um robô auxiliar a ser montado na bancada de simulação em caso de necessidade. O modelo tridimensional final pode ser visto na figura 24.

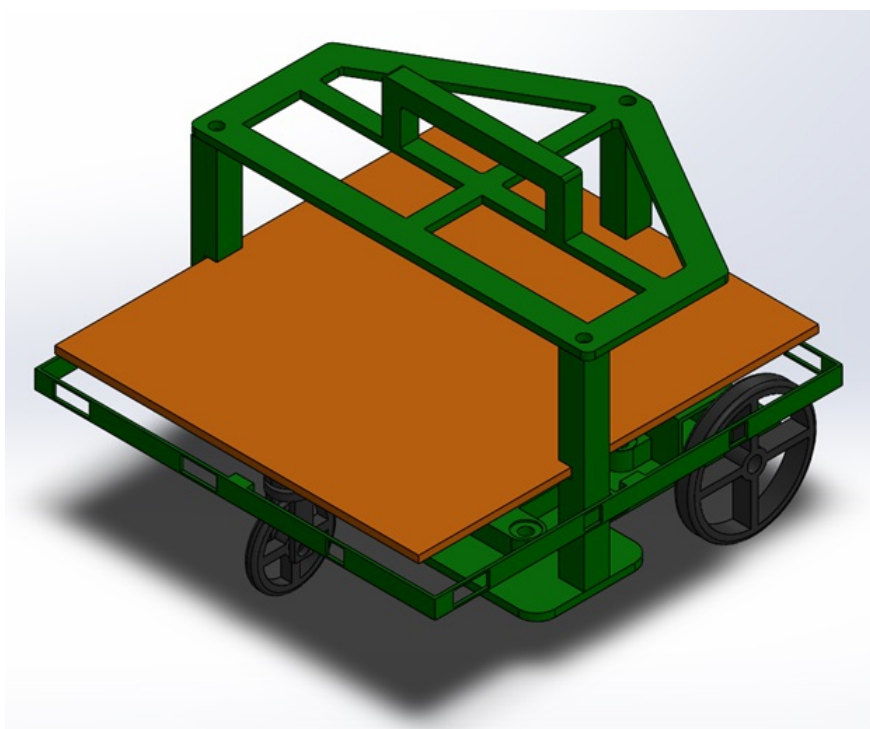


Figura 24 – Estrutura mecânica no software de modelagem

Fonte: Autor

5 Implementação e Testes

Esta seção discutirá sobre as etapas, materiais e custos envolvidos na implementação do projeto.

5.1 Relação de materiais e custos

Todos os materiais utilizados neste projeto podem ser encontrados no mercado nacional e internacional. Serão utilizadas referências de custo baseada no cenário brasileiro. A tabela 1 apresenta a relação de itens e preços para cada um. Custos de transporte não foram inclusos na análise. Para os recursos das universidades, apenas o material gasto será considerado. A confecção de poucas unidades foi algo que encareceu o projeto, valendo ressaltar que uma produção em maior escala é capaz de reduzir os custos significativamente, tanto no que diz respeito ao custo unitário de componente quanto ao custo de transporte. Um custo de confecção da placa de circuito impresso a partir de terceiros foi listado na tabela 1, tendo em vista que a produção através dos equipamentos da Universidade apresentou problemas. Os componentes passivos mencionados na tabela 1 incluem: resistores, capacitores, LEDs, conectores, botões e cristal.

Tabela 1 – Lista de Componentes e Custos

Item	Quantidade	Valor Unit.	Total
Micromotor 6V com redução 30:1	2	R\$32.00	R\$ 64.00
Bateria LiPo 3.7 V 1100 mAh	2	R\$35.00	R\$ 70.00
PCB 110x110 mm em placa de cobre 1 oz/cm ²	1	R\$55.00	R\$ 55.00
Módulo RFID PN352	1	R\$37.00	R\$ 37.00
Módulo Wi-Fi ESP8266 ESP-01	1	R\$14.00	R\$ 14.00
Driver motor TB6612FNG	1	R\$14.00	R\$ 14.00
Sensor ultrassônico HC-SR04	3	R\$6.00	R\$ 18.00
Microcontrolador ATmega2560	1	R\$45.00	R\$ 45.00
Material para Impressão 3D	1	R\$40.00	R\$ 40.00
Componentes passivos	1	R\$15.00	R\$ 15.00
Total			R\$372.00

Fonte: Autor

5.2 Confecção da PCB

A placa de circuito impressa foi o componente de fabricação mais difícil dados os meios disponíveis. A fresadora do laboratório não apresentou resolução e robustez suficientes para usinar as trilhas de ligação ao microcontrolador com espessura T40, sendo

que apenas serviu bem para usinar trilhas predominantemente horizontais ou verticais com largura T40 ou superior. O próximo passo seria utilizar a mini CNC profissional do LMEST, mas a mesma se encontra parada devido à falta de verba de manutenção. A solução encontrada foi usinar as placas de teste na mini CNC profissional da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de em Goiânia. Neste local foram feitas as placas iniciais de teste. Após a conclusão e revisão do design final da placa, esta pode ser usinada em terceiros a um custo de R\$ 55,00 por unidade para quantidades inferiores a 3 unidades. Este custo pode ser reduzido com o aumento de unidades solicitadas.

5.3 Estrutura mecânica

A estrutura de suporte à placa e de movimento do veículo foi inicialmente produzida no MAPL com o auxílio da impressora 3D local. Um segundo protótipo foi confeccionado na impressora 3D de um membro do laboratório. Dada a complexidade relativamente baixa dos componentes, este equipamento foi suficiente para confeccionar os itens. Optou-se pela utilização de parafusos em todas as juntas desmontáveis, garantindo uma melhor confecção das peças e evitando a necessidade de impressão de geometrias mais complexas. Para as juntas fixas, utilizou-se cola quente. As rodas tiveram que ser cobertas com borracha em suas faces de contato, o que aumenta o coeficiente de atrito no contato entre roda e piso durante a operação do veículo no cenário de testes.

5.4 Testes

5.4.1 Componentes e software para teste

O componente que exige mais cuidado para teste é o microcontrolador. Deve-se energizar todas as entradas de alimentação deste, conectar um cristal externo de referência para clock e ligar o mesmo a um programador serial para verificar a possibilidade de transferência de programas. Neste caso, considera-se que o microcontrolador adquirido é um que tenha *bootloader* instalado. Caso contrário, deve-se primeiro gravar o *bootloader* usando a conexão ISP. Um canal de comunicação com o computador pode ser estabelecido por meio de um programador serial ou ligando o microcontrolador a uma placa de Arduino em modo de programação. Para cada outro módulo utilizado e seu respectivo ramo do circuito que transmite e/ou recebe dados para/do microcontrolador, foram desenvolvidos pequenos códigos para teste. Estes servirão de base para funções e módulos do programa que comandarem a integração dos componentes com o microcontrolador. Os blocos testados foram o de comunicação com o módulo RFID, comunicação com o módulo Wi-Fi, leitura dos sensores ultrassônicos, detecção de robô adjacente e acionamento dos motores. Os

códigos para cada um podem ser encontrados nos apêndices deste trabalho. Para os módulos Wi-Fi e RFID foi testado o envio e recebimento de dados constituídos por cadeias de caracteres. Para os sensores ultrassônicos e de robô adjacente, leu-se os sinais de saída destes, observando se ocorria alteração conforme modificação no ambiente. Para o acionamento do motor, verificou-se se o giro do motor acompanhava a velocidade e sentido estabelecida no código.

A utilização do ATMega2560 foi importante neste quesito, pois permite o monitoramento das portas seriais de comunicação com o módulo RFID e módulo Wi-Fi simultaneamente, uma vez que este microcontrolador possui 4 portas de comunicação seriais físicas distintas. O restante dos módulos utiliza portas digitais e analógicas convencionas para troca de dados.

5.4.2 Circuito eletrônico

A placa de circuito impressa passou por testes que incluem a verificação de: isolamento entre trilhas distintas, o que pode causar curto-circuito em caso de problemas; continuidade entre pontos de uma mesma trilha, o que pode acarretar em perda de sinal caso existam falhas; conformidade com os encapsulamentos dos componentes, o que garante o encaixe adequado dos itens. Para se testar a conexão ou isolamento de trilhas, utilizou-se o multímetro do MAPL em modo de continuidade. A correspondência da dimensão dos encaixes da placa com os encapsulamentos dos componentes foi feita antes da usinagem da placa, por meio de sobreposição de uma folha com o layout impresso em escala real.

5.4.3 Estrutura mecânica

Os testes envolvendo a estrutura mecânica foram concentrados na adequação dimensional dos itens impressos ao modelo 3D. Foram analisados os encaixes dos componentes isolados e montagens do conjunto, com atenção aos furos base para a alocação de parafusos. Após a conferência da adequação das dimensões, observou-se se as juntas e demais elementos apresentavam estresse mecânico ou folga. Trechos com espessuras insuficientes ou em excesso foram remodelados posteriormente.

6 Resultados e Discussões

Este capítulo trata da exposição e análise dos resultados parciais obtidos com o projeto, estabelecendo relação com o propósito inicial do projeto. As principais características estabelecidas nos objetivos serão analisadas em seções deste capítulo, referenciando o nível de correspondência ao que foi inicialmente planejado.

6.1 Operação na bancada

A placa de circuito impresso e a estrutura mecânica que acoplam os componentes foram desenvolvidas de modo a permitir funcionamento satisfatório no labirinto construído por quadrantes com dimensões de 150x150 mm. A dimensão final obtida para o conjunto foi um retângulo de 110x112 mm (ver figura 25), sendo que a maior medida lateral está na direção perpendicular aos eixos do veículo. A folga de cerca de 40 mm para as paredes laterais é suficiente para permitir a realização de curvas de 90 graus (caso crítico) no labirinto.

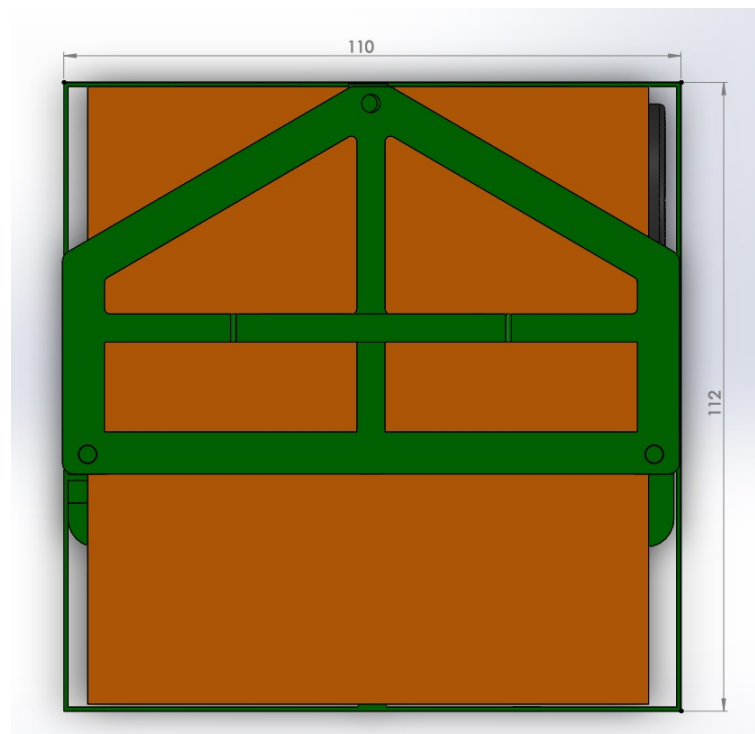


Figura 25 – Vista de topo do veículo com as dimensões da sua seção retangular

Fonte: Autor

6.2 Comunicação sem fio

A comunicação sem fio dos veículos foi obtida através do uso do módulo Wi-Fi ESP8266-01. Dentre as características necessárias ao projeto, este apresenta pequena dimensão e baixo consumo de energia, o que está diretamente ligado à distância de transmissão e potência do sinal emitido. Por se tratar de um módulo que pode acessar redes sem fio do padrão IEEE 802.11, foi possível conectá-lo a redes criadas por roteadores e monitorá-lo por meio de computadores com maior facilidade. Deste modo, pode-se utilizá-lo para implementar soluções mais complexas, auxiliando no desenvolvimento de novas funcionalidades para o veículo. Os testes com *strings* simples enviadas não apresentaram perda de mensagem, demonstrando que o módulo é aplicável ao projeto. Na figura 26, observa-se o uso de comandos padrão AT. Em síntese, ao se digitar “AT”, o módulo responde com “OK” caso a conexão exista. “AT+CWLAP” exibe as redes disponíveis, sendo que na figura 26, “Silva” era a rede da residência. “AT+CIFSR” lista o endereço IP associado ao módulo e este foi utilizado para acessar as mensagens através de um *browser* no computador. A mensagem formatada em HTML “<h1>TCC Micromouse - Teste Mensagem</h1>” foi enviada ao módulo, a qual pode ser vista formatada no *browser*.

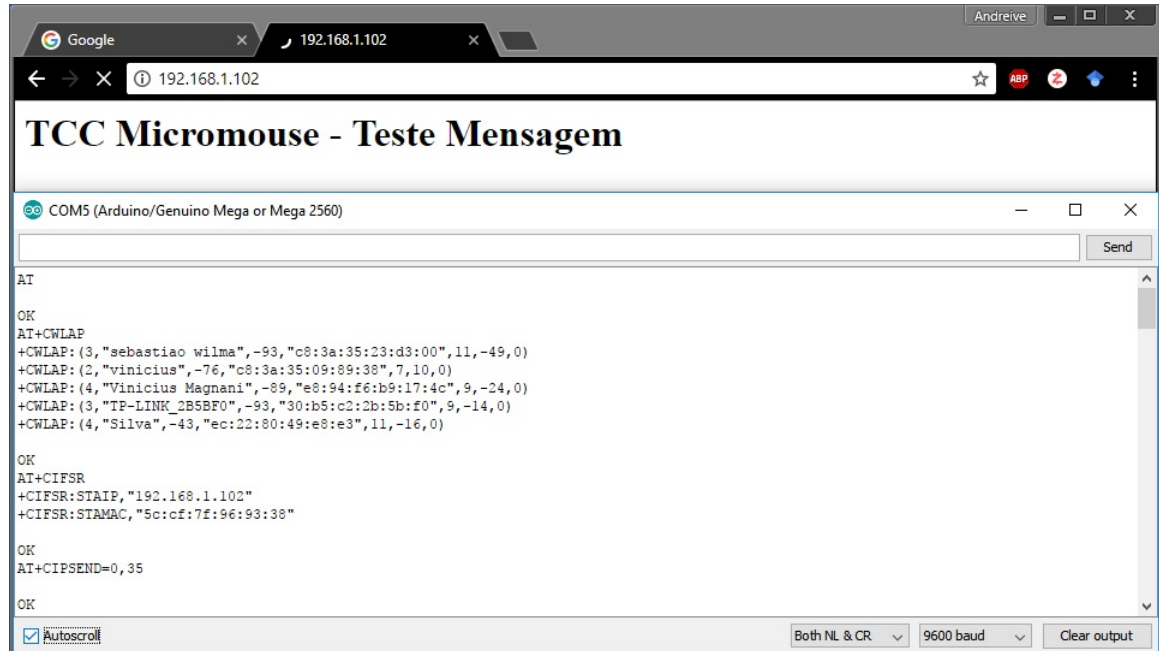


Figura 26 – Print do teste realizado para envio de mensagens pelo módulo Wi-Fi

Fonte: Autor

6.3 Comunicação por radiofrequência para rastreamento de veículo

A comunicação por radiofrequência foi implementada a partir do módulo RFID PN532. Este módulo apresenta canais de comunicação com o microcontrolador no padrão I2C e serial. Nos testes, só foi possível reconhecer uma *tag* utilizando o canal serial, sendo que este método foi aplicado no projeto. Para a leitura de *tags* disponibilizada com o módulo, pode-se executá-la a uma distância de 50 mm sem a ocorrência de falhas em um rol de 10 repetições. A escrita nas *tags* pode ser feita a partir desta mesma distância, superior ao que será necessário no projeto. Como o módulo RFID é posicionado na região inferior do veículo, a uma distância de aproximadamente 7 mm do solo, o componente em questão se mostrou aplicável ao projeto.

6.4 Percepção do ambiente e de robô adjacente

Os sensores ultrassônicos aplicados à leitura do ambiente apresentam desempenho satisfatório, com algumas leituras incorretas esporádicas, aceitáveis dentro da operação do veículo. Valores com erro estão estimados em 1% ou menos, a partir de um rol de valores gravados. Apenas uma sequência de leituras incorretas pode alterar o movimento do veículo de forma perceptível. Como se tratam de sensores baseados em ondas ultrassônicas, variações na iluminação do ambiente não interferem em seu funcionamento, o que poderia ocorrer com sensores infravermelhos. A principal desvantagem deste tipo de sensor fica ligada ao seu tamanho proporcionalmente ao restante do veículo, ocupando cerca de 30% da área da placa logo acima da camada de trilhas. Já o esquema montado para detectar um robô adjacente foi testado com a colocação manual das placas uma frente à outra. Por se tratar de um circuito simples tendo caminho fechado, não ocorreram problemas e o contato é suficiente para transmitir um sinal de nível lógico alto ao microcontrolador. A presença do resistor de *pull-down* é suficiente para garantir que o nível lógico lido permaneça baixo durante a ausência de uma placa de contato.

6.5 Placa de Circuito Impresso

A placa de circuito impresso foi o componente de confecção menos acessível durante a realização deste projeto. A fresadora própria do MAPL não possui estabilidade e rigidez suficientes para gerar trilhas com larguras inferiores a T30, assim como trilhas anguladas em relação aos eixos primários de movimentação do equipamento. Deste modo, a utilização desta foi inviabilizada logo no início do projeto. Uma primeira unidade protótipo da placa foi confeccionada com recursos próprios em uma empresa de Curitiba. Esta placa foi útil para identificar pontos falhos no projeto eletrônico, como conexões faltantes para o microcontrolador, assim como uma desvio dimensional no adaptador modelado em

software quando comparado ao modelo adquirido. Com o projeto reavaliado, uma segunda unidade protótipo foi feita em uma mini CNC profissional. Ambos protótipos construídos apresentaram trilhas bem definidas, sendo que a fabricada na mini CNC profissional possui uma limitação de espaçamento de conectores (é recomendável um espaçamento mínimo igual a T20), o que gerou a necessidade de redução da área de cobre para soldagem em alguns pontos com grande concentração de trilhas. No projeto, deu-se preferência pela redução da área de soldagem em pontos de ligação entre as faces da placa, uma vez que nestes locais será soldado apenas um elemento condutor simples e de diâmetro pequeno – no caso, um fio de cobre de diâmetro 0,5 mm. A placa usinada até a data de conclusão deste trabalho é apresentada na figura 27.

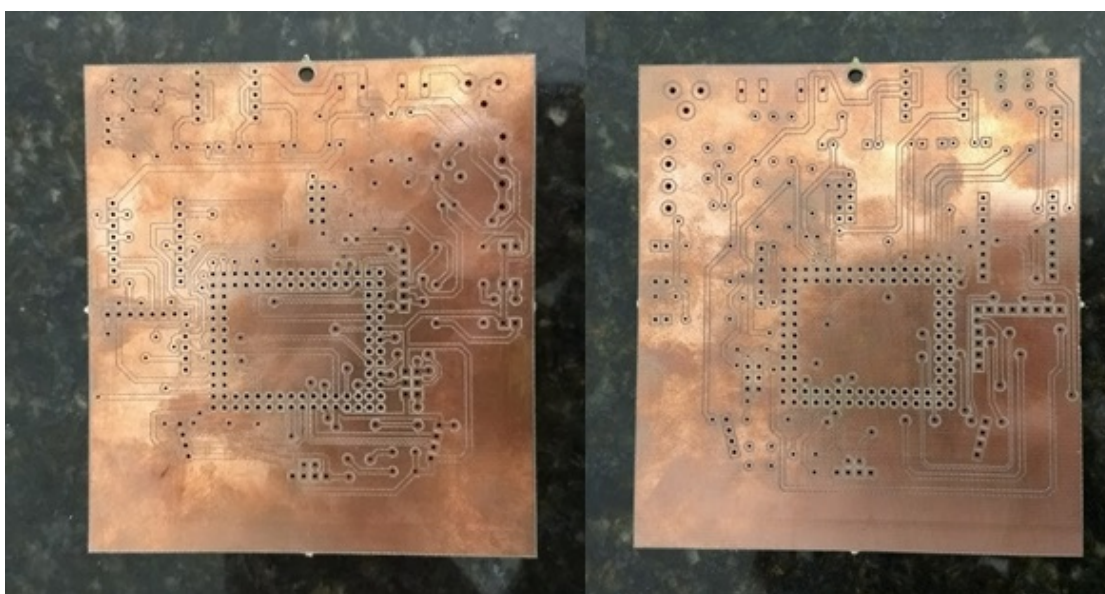


Figura 27 – Da esquerda para a direita: região inferior e topo da placa usinada

Fonte: Autor

A elaboração do layout de uma placa de circuito impresso para integração dos componentes demonstrou-se lenta e ineficiente para a implementação direta em um projeto sem auxílio imediato de equipamento de prototipagem. Com a ausência de uma fresadora local, cada alteração no projeto requereu algumas semanas até que a placa estivesse disponível para uma nova análise. Embora as conexões possam ser analisadas em protoboard, elementos novos ou revisados do projeto muitas vezes exigiram o reposicionamento, remoção e/ou adição de novas trilhas. Tais elementos incluem adaptadores para os circuitos SMD, elementos passivos alternativos e circuitos revisados do projeto – em grande parte destes casos, componentes diferentes são necessários dada a disponibilidade imediata para aquisição.

Outro ponto que dificultou a confecção da placa foi a ausência de equipamentos para metalizar os furos da placa. Furos metalizados são aqueles que apresentam contato metálico em ambas faces da placa de circuito impresso, permitindo que se realize a solda em qualquer um dos lados conforme a necessidade. A metalização é feita pela aplicação de tubos de cobre ou alumínio finos nos furos, ou ainda pela aplicação de material condutivo para secagem (este último sendo menos eficiente, por apresentar maior resistência à condução). Esta aplicação exige um equipamento semelhante a uma rebidadeira, a qual posiciona os pequenos tubos em cada furo e comprime as extremidades de cada um na face da placa.

Como consideração final, até o momento da conclusão deste trabalho, a construção da placa com recursos próprios de fabricação do circuito impresso é inviável. Entretanto, é essencial para a obtenção de um protótipo funcional que possa ser enviado para fabricação externa com custos decrescentes segundo uma demanda de mais unidades.

6.6 Estrutura mecânica com suporte para guincho

A estrutura mecânica foi impressa com recursos próprios do MAPL. A maior defasagem em relação ao especificado no modelo computacional concentrou-se nos furos, os quais ficaram em grande maioria distorcidos e com necessidade de retrabalho. Neste caso, utilizou-se equipamento de microretífica para melhorar o acabamento das peças e atender aos requisitos dimensionais. Para furos roscados, como o material possui baixa resistência mecânica ao desgaste (cerca de 10 vezes menor que aço 1020, por exemplo (LANDI; ANDRADE, 2003)), os próprios parafusos foram utilizados para gerar a geometria de rosca. Houve aplicação de fixação com rosca e fixação com parafuso e porca ao longo da estrutura.

Nas primeiras unidades, houve problema com fratura nas vigas estruturais verticais da superfície, as quais apresentaram rompimento na direção das lâminas de ABS – região de menor resistência ao cisalhamento do material. O rompimento ocorria no encaixe dos parafusos, sendo que o desvio de cerca de 0,2 mm em relação ao projetado resultava na tração excessiva do material no momento de encaixe do parafuso. No segundo lote de peças, a espessura das vigas foi elevada em 2 mm e o furo alargado em 0,2 mm, evitando que novas fraturas ocorressem. O restante da estrutura não possui pontos com uma elevada relação de esforço por área de material, não apresentando problemas. A estrutura confeccionado até a data de apresentação deste trabalho pode ser vista na figura 28. A estimativa de massa inferior a 500 gramas se afirma ao término da fase de desenvolvimento, com uma placa de circuito impresso com massa de cerca de 30 gramas, par de baterias com 70 gramas, conjunto de motores com 30 gramas, módulos com 50 gramas e estrutura mecânica com parafusos com cerca de 120 gramas, totalizando uma massa de, aproximadamente, 300 gramas.

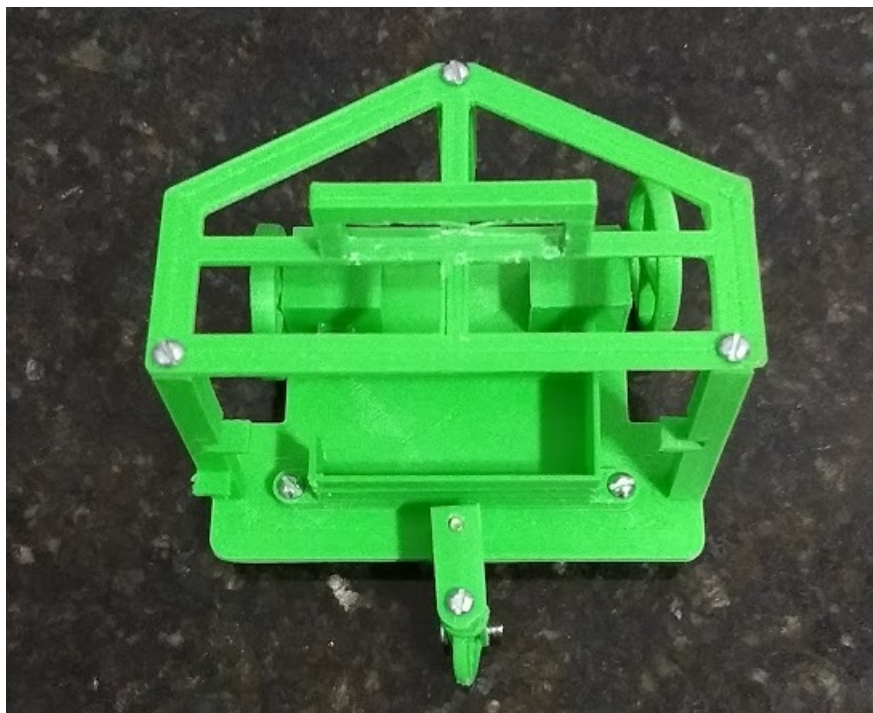


Figura 28 – Estrutura do veículo produzida em impressora 3D

Fonte: Autor

6.7 Preço em relação a modelos comerciais

A tabela 1 apresenta a relação de componentes e materiais utilizados com custos unitários. O valor total de R\$ 372,00 é inferior ao custo de R\$ 599,00 do principal modelo comercial disponível no mercado brasileiro – o robô uMART-INO, baseado em microcontrolador Arduino UNO, sem módulo Wi-Fi e RFID (MICROMOUSEBRASIL, 2017). No mercado internacional, vale citar dois modelos de veículo como comparativo: o "*Elegoo for Arduino Project Smart Robot Car*"¹, que não possui módulo Wi-Fi, e o "*Adept Smart Car Kit for Arduino*"². Ambos custam cerca de 90 dólares (o que resultaria em aproximadamente R\$ 283,50 em conversão direta com uma taxa de câmbio de R\$ 3,15 por dólar), sendo que nenhum destes possui módulo RFID, sensores ultrassônicos triplos, baterias e aparato de detecção de robô adjacente, bem como são baseados no microcontrolador ATmega328p ao invés do ATmega2560, apresentando menos entradas/saídas digitais e portas de comunicação. Vale ressaltar que com impostos de importação de 60% sobre o valor do produto, acrescido do valor de ICMS para o estado de Minas Gerais igual a 18%, os veículos importados teriam um valor final de R\$ 535,25 ($R\$ 283,50 + 60\%$) + 18%. Para os cálculos de custos do veículo deste trabalho, despesas com energia elétrica foram desconsideradas. Uma fonte de 500 W alimenta a impressora 3D do MAPL, a qual

¹ Disponível em: <<https://www.amazon.com/Elegoo-Four-wheel-Ultrasonic-Intelligent-Educational/dp/B01DPH0SWY>>, com acesso em 31/07/2017.

² Disponível em: <<https://www.amazon.com/Adept-NRF24L01-Wireless-Robotics-Guidebook/dp/B06XF5J52J>>, com acesso em 31/07/2017.

precisou de cerca de 2 horas para concluir a impressão das peças. Neste caso, para pico de consumo durante todo o período de trabalho, gastou-se 1 kWh, o que equivale a menos de R\$ 1,00 por lote de peças 3D de uma unidade do veículo. Conclui-se que a construção personalizada do robô e aquisição de componentes separados resulta em economia efetiva de recursos financeiros. Tais gastos podem ser ainda menores caso todos os processos possam ser executados na própria Universidade.

7 Conclusões

O enfoque deste trabalho foi a elaboração do projeto e construção de um robô móvel a partir da utilização de equipamentos disponíveis na Universidade. A concepção, seleção de componentes e o design virtual do veículo se mostraram viáveis e os recursos disponíveis foram suficientes para esta etapa. No entanto, a aquisição dos materiais a um custo baixo foi prejudicada em vista dos preços praticados no mercado nacional. Frequentemente, existiram problemas relacionados também à disponibilidade de alguns itens, principalmente microcontroladores. Outra questão de peso no aumento dos custos é a produção em escala mínima, sendo que alguns fornecedores de placas não puderam atender às solicitações devido a uma quantia ordenada inviável para eles.

Porém, a maior dificuldade encontrada esteve relacionada à fabricação da placa de circuito impresso com trilhas adequadas para o posicionamento do microcontrolador. A fresadora disponível no laboratório não obteve desempenho satisfatório ao longo da superfície da placa, apresentando irregularidades em vários trechos. A mini CNC do laboratório LMEST da UFU esteve paralisada ao longo da execução do projeto devido à falta de verba para manutenção. A opção restante foi usinar em uma outra mini CNC profissional do laboratório da UFG. Vale ressaltar, no entanto, que a resolução das trilhas esteve limitada à do equipamento – em torno de T20 para a minimização de falhas de usinagem. Como nota, circuitos comerciais, tal como a própria placa de desenvolvimento para Arduino, utilizam trilhas com espessura T10, o que permite um melhor roteamento e condensação de trilhas por mm^2 .

No que diz respeito aos demais componentes, todos apresentaram desempenho que atendeu aos requisitos de projeto. O conjunto motor possui torque de saída suficiente para mover o veículo. O módulo Wi-Fi permitiu o envio e recebimento de mensagens no espaço de trabalho sem perdas, assim como o módulo RFID permitiu a leitura de *tags* espalhadas a uma distância maior que a da aplicação final. Os sensores ultrassônicos identificam obstáculos no cenário com medições errôneas esporadicamente, mas em quantidade baixa perante o nível de leituras.

Conclui-se a partir deste trabalho que, com a disponibilização de ferramentas adequadas, é possível construir uma solução adequada às necessidades de cada projeto do laboratório, dada a grande integração e versatilidade dos módulos e microcontroladores disponíveis atualmente, em especial a plataforma Arduino. O uso desta ainda permite a disseminação do conhecimento e modificação de conteúdo por qualquer interessado, uma vez que a plataforma é construída sob o conceito de open source. Além disso, a necessidade de sistemas embarcados pelo MAPL pode ser suprida com uma redução

dos custos dos módulos por meio de fabricação personalizada. Atualmente, o laboratório demanda equipamentos para experimentos de robótica, bem como para aulas de automação e redes industriais. Vale ressaltar que a economia obtida em relação ao modelo comercial disponível no Brasil foi de, aproximadamente, 38%. Quanto a dois modelos comerciais pesquisados no mercado internacional, a economia foi de 31%, sendo que estes modelos não oferecem suporte a todas as funcionalidades necessárias ao projeto.

7.1 Projetos Futuros

Projetos futuros para este trabalho podem estar ligados à implementação de circuitos minimalistas e personalizados para atividades do laboratório MAPL. Em relação a este próprio projeto, melhorias efetivas podem ser feitas:

- Substituição dos sensores ultrassônicos por sensores infravermelhos menores e de alta intensidade, estando menos sujeitos à luminosidade do ambiente e reduzindo a área ocupada pelo veículo. Tais componentes necessitam de importação;
- Troca do microcontrolador por um mais veloz e com maiores memórias de programa e execução, tal como o ATSAM3X8E. Este é membro da plataforma Arduino (incluso na placa Arduino Due), possui instruções de 32 bits e *clock* de 84 MHz. Comparado com o ATMega2560, as conexões e circuitos teriam que passar por adaptações, com conversão dos sinais de 5V para 3,3V, dado que a tensão base de operação do ATSAM3X8E é 3,3V;
- Elaboração de uma placa com dois microcontroladores de custo menor e com menos entradas trabalhando de forma integrada, de modo a simular um funcionamento em paralelo, otimizar a ocupação de superfície da placa e reduzir o preço final do conjunto. Uma opção é a utilização do microcontrolador ATMEGA328p - aplicado na placa Arduino UNO;
- Integração de todos os componentes dos módulos na placa, otimizando roteamento e permitindo uma redução do espaço ocupado pela placa. Isto permitiria a utilização da própria placa de circuito impresso como chassi, diminuindo também a altura do veículo;
- Elaboração de parcerias com as demais faculdades e institutos de Uberlândia que necessitam da construção de sistemas embarcados para o ensino de robótica, permitindo redução nos custos de fabricação através de uma demanda maior e garantindo arrecadação de um certo montante de recursos. O veículo desenvolvido neste projeto dispõe de recursos essenciais para discutir sobre tecnologias atuais de automação e redes, bem como permite trabalhar fundamentos de disciplinas de cursos de robótica.

Basicamente, o circuito de alimentação pode ser analisado em aulas de eletrônica digital, o movimento do veículo pode ser trabalhado em aulas de controle, os sensores de ambiente podem ser utilizados em instrumentação, microcontroladores são estudados em sistemas digitais, e módulos de rede Wi-Fi permitem a implementação de protocolos de comunicação em disciplinas como redes industriais.

Por fim, vale ressaltar a importância de várias disciplinas do curso no projeto, em especial: Eletrônica Básica, Sistemas Digitais para Mecatrônica, Desenho Mecânico, Desenho Assistido por Computador, Eletrônica Digital e Instrumentação. Conhecimentos adicionais de software de modelagem de circuitos eletrônicos e a base para resolução de problemas construída dentro da faculdade de engenharia também foram essenciais para a execução do trabalho.

Referências

- ADVANCED CIRCUITS. Trace width website calculator. In: _____. 2017. Disponível em: <<http://www.4pcb.com/trace-width-calculator.html>>. Acesso em: 15 jun. 2017. Citado na página 36.
- ARDUINO. *Arduino webpage*. 2017. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 15 jun. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 29.
- ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. *Generic Standard on Printed Board Design*. [S.l.], 1998. Disponível em: <<http://www.ipc.org/TOC/IPC-2221A.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2017. Citado na página 36.
- ATMEL. *Atmel ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V*. [S.l.], 2014. Rev. 2549Q. Citado 3 vezes nas páginas 31, 32 e 34.
- BORGES, D. J. D. *Desenvolvimento de um robô para o concurso Micromouse*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal, 2014. Citado na página 15.
- CAVALCANTE, M. M.; SILVA, J. L. d. S.; VIANA, E. C.; DANTAS, J. R. A plataforma arduino para fins didáticos: estudo de caso com recolhimento de dados a partir do plx-daq. In: *XXXIV Congresso da Sociedade Brasileira de Computação (CSBC 2014)*, Brasília, DF. [S.l.: s.n.], 2014. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- CHAVES, Á. N. *Proposta de modelo de veículos aéreos não tripulados (VANTs) cooperativos aplicados a operações de busca*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Citado na página 11.
- CORPO DE BOMBEIROS. *Manuais Técnicos de Bombeiros - Salvamento Terrestre*. 2006. Disponível em: <<https://issuu.com/gliceugrossi/docs/mtb-03---manual-completo---salvamento-terrestre/5>>. Acesso em: 15 jun. 2017. Citado na página 11.
- EVANS, M.; NOBLE, J.; HOCHENBAUM, J. *Arduino em ação*. [S.l.]: Novatec Editora, 2013. Citado na página 17.
- FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. *LM7805 Datasheet*. [S.l.], 2014. Rev. 1.3.1. Citado na página 31.
- FERGUSON, D. Gis for wilderness search and rescue. In: *Proceedings of ESRI Federal User Conference*. [S.l.: s.n.], 2008. Citado na página 11.
- FERNANDES, A. C.; MAGALHÃES, I. N. D. de; SOUZA, M. A.; JUNIOR, A. G. da C.; MOREIRA, C. S. Sistema de aquisição de sinais ecg processado pelo labview com comunicação wi-fi por meio do módulo esp8266. 2016. Citado na página 21.
- LANDI, T. R.; ANDRADE, L. G. de. Estudo do efeito da radiação ionizante com feixe de elétrons sobre terpolímero acrilonitrila butadieno estireno-abs. *Revista Mackenzie de Engenharia e Computação*, v. 4, n. 4, 2003. Citado na página 46.

- LOPES, J. M. A. Guia para a elaboração de placas de circuito impresso. *Centro de Competência de Ciências Exactas e da Engenharia, Universidade da Madeira*, 2016. Citado na página 18.
- LUCCA, J. *Plotter de baixo custo para prototipação de placas de circuito impresso*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013. Citado na página 18.
- MARTINS, N. A. Sistemas microcontrolados. *Uma abordagem com o Microcontrolador PIC 16F84*. Editora Novatec Ltda, 1ª edição, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.
- MICROMOUSEBRASIL. *uMART INO*. 2017. Disponível em: <<https://kleberufu.wixsite.com/micromousebrasil/umart-ino>>. Acesso em: 15 jun. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 47.
- NASSAR, V.; VIEIRA, M. L. H. A tecnologia no auxílio ao transporte urbano: Projeto smart bus nfc rfid. 2013. Citado na página 20.
- ODAKURA, V. V. V. A. *Localização de Markov para multirrobo cooperativos*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Citado na página 12.
- PASSOS, Y. T. dos; CHAIMOWICZ, L. Controle de congestionamento para enxames de robôs no acesso a alvos em comum. X SBAI – Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, São João Del Rei, MG, 2011. Citado na página 11.
- PINHEIRO, P. G. *Localização multirrobo cooperativa com planejamento*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Computação, Campinas, SP, 2009. Citado na página 11.
- SOUSA, S. J. M. Assistência médica em evacuações aéreas e missões de busca e salvamento. Instituto de Ciências Biomédicas Abel Salazar, 2011. Citado na página 11.
- TAKAGAKI, L. K. Tecnologia de impressão 3d. *RIT-REVISTA INOVAÇÃO TECNOLÓGICA*, v. 2, n. 2, 2013. Citado na página 19.
- TEXAS INSTRUMENTS. *LM1117 800-mA Low-Dropout Linear Regulator*. [S.l.], 2016. Rev. N. Citado na página 31.

Apêndices

APÊNDICE A – Código de Teste do Módulo Wi-Fi

```
1 // Programa: Web Server com modulo ESP8266
2 // Adaptado de FILIPEFLOP
3 // Importante: configurar o Monitor Serial para "BOTH NL & CR"
4
5 // Utilizando a RX2 e TX2 do Arduino MEGA
6 #define esp8266 Serial2
7
8 #define DEBUG true
9
10 void setup()
11 {
12     Serial.begin(9600);
13     // O baud rate do modulo utilizado estava setada de fabrica em
14     // 115200bps
15     esp8266.begin(115200);
16
17     sendData("AT+RST\r\n", 2000, DEBUG); // rst
18     delay(5000);
19     // Conecta a rede wireless
20     sendData("AT+CWJAP=\"Silva\", \"XXXXXXXXX\"\r\n", 2000, DEBUG);
21     delay(3000);
22     // Mostra o endereco IP
23     sendData("AT+CIFSR\r\n", 1000, DEBUG);
24     sendData("AT+CWMODE=1\r\n", 1000, DEBUG);
25     // Configura para multiplas conexoes
26     sendData("AT+CIPMUX=1\r\n", 1000, DEBUG);
27     // Inicia o web server na porta 80
28     sendData("AT+CIPSERVER=1,80\r\n", 1000, DEBUG);
29 }
30
31 void loop()
32 {
33     // Verifica se algo foi digitado no monitor serial
34     String command = "";
35     while(Serial.available())
```

```
35     {
36         char c = Serial.read();
37         command += c;
38     }
39     sendData(command, 2000, DEBUG);
40 }
41
42 String sendData(String command, const int timeout, boolean debug)
43 {
44     // Envio dos comandos AT para o modulo
45     String response = "";
46     esp8266.print(command);
47     long int time = millis();
48     while ( (time + timeout) > millis())
49     {
50         while (esp8266.available())
51         {
52             // The esp has data so display its output to the serial
53             window
54             char c = esp8266.read(); // read the next character.
55             response += c;
56         }
57     }
58     if (debug)
59     {
60         Serial.print(response);
61     }
62     return response;
63 }
```

APÊNDICE B – Código de Teste do Driver do Motor

```
1 //Adaptado do exemplo do modulo TB6612FNG da Sparkfun
2
3 //Pinos
4 //Motor 1
5 int pinAIN1 = 9; //Direcao
6 int pinAIN2 = 8; //Direcao
7 int pinPWMA = 3; //Velocidade
8 //Motor 2
9 int pinBIN1 = 11; //Direcao
10 int pinBIN2 = 12; //Direcao
11 int pinPWMB = 5; //Velocidade
12 //Standby
13 int pinSTBY = 10;
14
15 //Constantes
16 static boolean turnCW = 0; //motorDrive funcao
17 static boolean turnCCW = 1; //motorDrive funcao
18 static boolean motor1 = 0; //motorDrive, motorStop, motorBrake
    funcoes
19 static boolean motor2 = 1; //motorDrive, motorStop, motorBrake
    funcoes
20
21 void setup()
22 {
23     //PIN Modes
24     pinMode(pinPWMA, OUTPUT);
25     pinMode(pinAIN1, OUTPUT);
26     pinMode(pinAIN2, OUTPUT);
27
28     pinMode(pinPWMB, OUTPUT);
29     pinMode(pinBIN1, OUTPUT);
30     pinMode(pinBIN2, OUTPUT);
31
32     pinMode(pinSTBY, OUTPUT);
33 }
```

```
34
35 void loop()
36 {
37     //Gira ambos motores no sentido horario, velocidade maxima
38     motorDrive(motor1, turnCW, 255);
39     motorDrive(motor2, turnCW, 255);
40     //Gira por 2 s
41     delay(2000);
42     //Gira para frente motor1: Para Motor1, Reduz Motor2
43     motorStop(motor1);
44     motorDrive(motor2, turnCW, 192);
45     //Gira por 2 s
46     delay(2000);
47     //Gira na direcao contraria: Para Motor2, Reduz Motor1
48     motorDrive(motor1, turnCW, 192);
49     delay(250);
50     motorStop(motor2);
51     //Gira por 2 s
52     delay(2000);
53     //Gira para frente
54     motorDrive(motor2, turnCW, 192);
55     delay(500);
56     //Motores em Standby
57     motorsStandby();
58     delay(1000);
59     //Gira em torno do motor1: Motor2 para frente, Motor1 reverso
60     motorDrive(motor1, turnCCW, 192);
61     motorDrive(motor2, turnCW, 192);
62     //Gira por 2 s
63     delay(2000);
64     //Freia, entra em Standby
65     motorBrake(motor1);
66     motorBrake(motor2);
67     motorsStandby();
68
69     delay(5000);
70 }
71
72 void motorDrive(boolean motorNumber, boolean motorDirecao, int
    motorVelocidade)
73 {
74     /*
```

```
75     Gira um motor especifico, em uma direcao especifica, em uma
76     velocidade especificada:
77     - motorNumber: motor1 or motor2 ---> Motor 1 or Motor 2
78     - motorDirecao: turnCW or turnCCW ---> horario ou anti-horario
79     - motorVelocidade: 0 a 255 ---> 0 = para / 255 = maximo
80     */
81     boolean pinIn1;    //AIN1 ou BIN1
82
83     //Especifica a direcao para girar o motor
84     //Horario: AIN1/BIN1 = HIGH and AIN2/BIN2 = LOW
85     //Anti-horario: AIN1/BIN1 = LOW and AIN2/BIN2 = HIGH
86     if (motorDirecao == turnCW)
87     pinIn1 = HIGH;
88     else
89     pinIn1 = LOW;
90
91     //Seleciona o motor para girar, e seta a Direcao e Velocidade
92     if (motorNumber == motor1)
93     {
94         digitalWrite(pinAIN1, pinIn1);
95         digitalWrite(pinAIN2, !pinIn1); //oposto de AIN1
96         analogWrite(pinPWMA, motorVelocidade);
97     }
98     else
99     {
100         digitalWrite(pinBIN1, pinIn1);
101         digitalWrite(pinBIN2, !pinIn1); //oposto de BIN1
102         analogWrite(pinPWMB, motorVelocidade);
103     }
104
105     //Finalmente, assegura que STBY esta desativado - seta HIGH
106     digitalWrite(pinSTBY, HIGH);
107 }
108
109 void motorBrake(boolean motorNumber)
110 {
111     /*
112     "Freia" o motor, setando sua Velocidade para zero
113     */
114     if (motorNumber == motor1)
115     analogWrite(pinPWMA, 0);
```

```
116     else
117         analogWrite(pinPWMB, 0);
118 }
119
120 void motorStop(boolean motorNumber)
121 {
122     /*
123     Para o motor setando ambos pinos IN para LOW
124     */
125     if (motorNumber == motor1)
126     {
127         digitalWrite(pinAIN1, LOW);
128         digitalWrite(pinAIN2, LOW);
129     }
130     else
131     {
132         digitalWrite(pinBIN1, LOW);
133         digitalWrite(pinBIN2, LOW);
134     }
135 }
136
137 void motorsStandby()
138 {
139     digitalWrite(pinSTBY, LOW);
140 }
```

APÊNDICE C – Código de Teste do Módulo RFID

```

1 //Programa: Teste modulo PN532 NFC RFID Arduino
2 //Autor: Adaptado de Arduino e Cia
3
4 #include <PN532_HSU.h>
5 #include <PN532.h>
6 PN532_HSU pn532hsu(Serial1);
7 PN532 nfc(pn532hsu);
8
9 void setup(void)
10 {
11     Serial.begin(115200);
12     Serial.println("*** Teste Modulo PN532 NFC RFID ***");
13
14     nfc.begin();
15
16     //Verifica a conexao do modulo PN532
17     uint32_t versiondata = nfc.getFirmwareVersion();
18     if (! versiondata)
19     {
20         Serial.print("Placa PN53x nao encontrada...");
21         while (1); // halt
22     }
23
24     //Conexao ok, mostra informacoes do firmware
25     Serial.print("Encontrado chip PN5"); Serial.println((
versiondata >> 24) & 0xFF, HEX);
26     Serial.print("Firmware versao: "); Serial.print((versiondata >>
16) & 0xFF, DEC);
27     Serial.print(' '); Serial.println((versiondata >> 8) & 0xFF,
DEC);
28
29     // Set the max number of retry attempts to read from a card
30     nfc.setPassiveActivationRetries(0xFF);
31
32     // configure board to read RFID tags

```

```
33     nfc.SAMConfig();
34
35     Serial.println("Aguardando cartao ISO14443A...");
36     Serial.println("");
37 }
38
39 void loop(void)
40 {
41     boolean success;
42     //Buffer para armazenar a UID lida
43     uint8_t uid[] =
44     {
45         0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0
46     };
47     //
48     Tamanho da UID (4 ou 7 bytes dependendo do tipo do cartao)
49     uint8_t uidLength;
50
51     //Wait for an ISO14443A type cards (Mifare, etc.). When one is
52     found
53     // 'uid' will be populated with the UID, and uidLength will
54     indicate
55     //if the uid is 4 bytes (Mifare Classic) or 7 bytes (Mifare
56     Ultralight)
57     success = nfc.readPassiveTargetID(PN532_MIFARE_ISO14443A, &uid
58     [0], &uidLength);
59
60     //Caso o cartao seja detectado, imprime o UID do cartao
61     if (success)
62     {
63         Serial.println("Cartao detectado!");
64         Serial.print("Tamanho do UID: "); Serial.print(uidLength,
65         DEC); Serial.println(" bytes");
66         Serial.print("UID: ");
67         for (uint8_t i = 0; i < uidLength; i++)
68         {
69             Serial.print(" 0x"); Serial.print(uid[i], HEX);
70         }
71         Serial.println("");
72         Serial.println("");
73         delay(1000);
74     }
75 }
```

```
70     else
71     {
72         Serial.println("Timed out waiting for a card");
73     }
74 }
```