

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

João Victor Batista Gordo

**Implementação de uma plataforma de teste de estratégia
de controle de VANTs utilizando robô terrestre
autônomo de alta velocidade**

São Carlos

2017

João Victor Batista Gordo

**Implementação de uma plataforma de teste de estratégia
de controle de VANTs utilizando robô terrestre
autônomo de alta velocidade**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Eletrônica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Eduardo do Valle Simões

**São Carlos
2017**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Gi Gordo, João Victor Batista
 Implementação de uma plataforma de teste de
 estratégia de controle de VANTs utilizando robô
 terrestre autônomo de alta velocidade / João Victor
 Batista Gordo; orientador Eduardo do Valle Simões. São
 Carlos, 2017.

 Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
 ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São
 Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

 1. desvio de obstáculos. 2. navegação autônoma. 3.
 sistemas reativos. 4. sensores ultrassônicos. I.
 Título.

João Victor Batista Gordo

**Implementação de uma plataforma de teste de estratégia
de controle de VANTs utilizando robô terrestre
autônomo de alta velocidade**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Eletrônica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

**Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 22 de junho de 2017, pela Comissão Julgadora:**

Prof. Dr. Eduardo do Valle Simões - Orientador - SSC/ICMC/USP

Prof. Dr. Marcelo Basílio Joaquim - SEL/EESC/USP

Prof. Dr. Cláudio Fabiano Motta Toledo - SSC/ICMC/USP

**Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior**

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de agradecer à comunidade que vive o paradigma revolucionário de disseminação livre e gratuita de ideias e trabalhos. Este projeto é um fruto tímido de uma árvore regada pelos esforços de cada uma destas pessoas que, de gota em gota, clareiam as águas turvadas pelo egoísmo e nutrem a germinação de verdadeiros pomares que estão por vir. Quem sabe um dia o único obstáculo ao aprendizado e construção do conhecimento seja a força de vontade...

RESUMO

Foi implementado um veículo de navegação autônoma de alta velocidade, cuja técnica de desvio de obstáculos é puramente reativa, com o propósito de servir como uma plataforma de testes de navegação de VANTs desenvolvidos na arquitetura MOSA, que desacopla a porção crítica da não crítica do sistema embarcado de tempo real. A percepção do veículo consiste em uma matriz de cinco sensores ultrassônicos, o subsistema de locomoção funciona por tração dianteira feita por motores de corrente contínua sem escovas, o subsistema de comunicação é feito via rádio com as funcionalidades de: obtenção remota de dados internos do veículo durante a navegação autônoma, de uma interface de comando que também possibilitasse a mudança de variáveis internas do veículo sem a necessidade de reprogramar o microcontrolador e, o mais importante, de dar ou não ao veículo o aval para navegar com base no *status* de um botão de segurança acoplado a outro rádio. A estratégia de navegação consiste em classificar as leituras de cada um dos sonares em três regiões: distante, atenção e próxima; com base em qual região encontra-se cada sonar, toma-se a decisão de qual a medida de evasão a ser realizada, isto é, foi gravada na memória do microcontrolador uma tabela que correlaciona cada uma das combinações de regiões a um par ordenado de velocidades que deve ser imposta aos motores para desviar do obstáculo em questão. Contudo, as leituras obtidas pelos sonares foram fortemente afetadas em decorrência de vibrações mecânicas dos motores, que causam leituras espúrias, o que, por sua vez, provoca a adoção de comportamentos errados pelo veículo.

Palavras-chaves: navegação autônoma. sistemas reativos. sensores ultrassônicos. desvio de obstáculos.

ABSTRACT

A high speed autonomous mobile robot with a purely reactive obstacle avoidance technique was implemented. Its purpose is to serve as a navigation test platform for UVAs in MOSA architecture which decouples the critical from the non-critical portion in the embedded system at real time. The vehicle's perception is composed of an array of five ultrasonic sensors, the locomotion subsystem operates by front-wheel drive made through brushless DC motors, the communication subsystem is made through radio and its functions are: obtaining remote internal data during the autonomous navigation as well as a command interface which could also enable changes on the internal variables of the vehicle without reprogramming the microcontroller and, most important, endorse the vehicle's navigation based on the status of a security button attached to another radio. The navigation strategy consists in classifying the readings from each of the sonars in three regions: distant, warning and close. Based on the region where the sonar is located, a decision is made on which evasion measure is to be carried out, i.e., in the microcontroller's memory was recorded a table that correlates each combinations of regions to an ordered pair of speed which has to be imposed to the motors so they are able to deviate from the obstacle. However, the readings obtained by the sonars were strongly affected by the mechanical vibrations from the motors, causing spurious readings which led the vehicle to adopt wrong behaviors.

Key-words: autonomous navigation. reactive systems. ultrasonic sensors. obstacle avoidance

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Módulo de Rádio Frequência baseado no <i>transceiver</i> da Nordic nRF24L01+	35
Figura 2 – Estrutura Analítica do Projeto	39
Figura 3 – Diagrama Elétrico	41
Figura 4 – Diagrama da Classe RF24	43
Figura 5 – Fluxograma da Rotina de Desvio de Obstáculos	44
Figura 6 – Três tipos de modulação PWM: <i>trailing edge</i> , <i>leading edge</i> e <i>both edges</i> , de cima pra baixo, respectivamente.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela Verdade	25
Tabela 2 – Teste sem Obstáculos ao Alcance	47
Tabela 3 – 30cm	49
Tabela 4 – 50cm	51
Tabela 5 – 100cm	54
Tabela 6 – 150cm	56
Tabela 7 – 200cm	59
Tabela 8 – Teste com os Sonares Acoplados ao Veículo	62
Tabela 9 – Teste com os Sonares Apoiados no Chão	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	Corrente Contínua
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
ESC	<i>Electronic Speed Controller</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
GFSK	<i>Gaussian Frequency Shift Keying</i>
BLDC	<i>Brushless Direct Current</i>
FIFO	<i>First In First Out</i>
VANT	<i>Veículo Aéreo Não Tripulado</i>
UBEC	<i>Ultimate Battery Eliminator Circuit</i>
LiPo	Lítio Polímero
MIFA	<i>Meandered Inverted-F Antenna</i>
ICSP	<i>In-Circuit Serial Programming</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

α	coeficiente de atenuação do meio.
τ	tempo de meia volta da onda propagante, i.e. <i>time of flight</i> , do sensor.
Δ	distância medida nos sensores do tipo <i>time of flight</i> .
ν	velocidade de propagação no meio da onda ou partícula nos sensores do tipo <i>time of flight</i> .

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	27
2.1	Sistemas Reativos	27
2.1.1	Paradigma Reativo como Robótica Bioinspirada	27
2.1.2	Características	28
2.2	Arquitetura MOSA	28
3	MATERIAIS	31
3.1	Motor <i>Brushless</i>	31
3.2	ESC	32
3.3	Sensor Ultrassônico	32
3.3.1	Princípio de Funcionamento	32
3.3.2	Limitações	33
3.3.2.1	Variação na velocidade de propagação da onda acústica	33
3.3.2.2	Direcionalidade	33
3.3.2.3	Resposta no Ambiente Alvo	34
3.3.2.4	<i>Foreshortening</i>	34
3.3.2.5	Reflexão especular e <i>Crosstalk</i>	34
3.4	Módulo de rádio frequência	35
3.5	Arduino	36
3.6	Bateria	37
3.6.1	<i>C rate</i>	37
4	MÉTODO	39
4.1	Estratégia <i>bottom-up</i>	39
4.2	Arquitetura Reativa	40
4.3	Subsistema de Locomoção	40
4.4	Subsistema de Percepção	40
4.5	Subsistema de Comunicação	42
4.6	Subsistema de Navegação	43
4.7	Integração dos Subsistemas	45
5	RESULTADOS	47
5.1	Testes Unitários	47
5.1.1	Leituras Espúrias nos Sonares	47
5.1.2	Comparação entre Intervalos de Medição Dinâmico e Estático	48

5.1.2.1	Teste 30cm	48
5.1.2.2	Teste 50cm	51
5.1.2.3	Teste 100cm	53
5.1.2.4	Teste 150cm	56
5.1.2.5	Teste 200cm	58
5.2	Testes de Integração	61
5.2.1	Interferência dos BLDC nos Sonares	61
6	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	67
7	APÊNDICES	71
7.1	Sistemas de Tempo Real	71
7.2	CRC	71
7.3	PWM	72

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho consiste na implementação de um veículo autônomo de alta velocidade, desenvolvido sob o paradigma de sistemas puramente reativos, cuja finalidade é servir como uma plataforma terrestre de testes de estratégias de navegação de Veículos Aéreos Não Tripulados, VANTs, dentro da arquitetura MOSA, *Mission Oriented Sensor Array*. Isto é, na arquitetura MOSA, o escopo deste projeto consiste na porção relativa ao controlador de navegação, que é responsável por cuidar da integridade da aeronave, enquanto a parte orientada à missão é o que pretende-se testar utilizando o veículo. A necessidade de se desenvolver um veículo terrestre para testar estratégias de voo se dá pelo fato de que este é um sistema embarcado crítico cuja falha pode resultar em acidentes graves, logo, caso o comportamento do MOSA desenvolvido seja extensivamente testado em um ambiente livre de riscos utilizando-se o veículo, há menos risco de eventuais danos provocados por mal funcionamento. Como o intuito do projeto é simular um *drone* para testar novos algoritmos de navegação para que se tenha uma segurança maior no funcionamento desejado do *software* antes de serem feitos os devidos testes utilizando de fato uma aeronave, o veículo desenvolvido opera em velocidades similares às de VANTs, podendo atingir até 100 km/h. Maiores detalhes acerca da arquitetura MOSA serão abordados na seção de Embasamento Teórico.

O projeto pode ser dividido em 4 subsistemas: percepção, locomoção, comunicação e navegação. A percepção é feita através de uma matriz de cinco sensores ultrassônicos de baixo custo, que são disparados simultaneamente a fim de reduzir o tempo gasto com obtenção dos dados do ambiente externo. Como consequência disso, obtém-se dados menos confiáveis pois são intensificados efeitos colaterais como o crosstalk, que não pode ser eliminado processando medidas consecutivas, conforme [Borenstein e Koren \(1995\)](#). Além disso, buscou-se verificar o quão significativo é o impacto na confiabilidade das medidas caso os ciclos de leitura dos sonares seja determinado de acordo com as circunstâncias do meio, isto é, caso não haja um intervalo de medição fixo e pré-determinado, denominado intervalo estático de agora em diante, de modo que o período gasto na percepção estivesse atrelado apenas ao tempo gasto pelo sonar que detectou o obstáculo mais distante do veículo, denominado intervalo dinâmico. Ao adotar intervalos dinâmicos, reduz-se o tempo entre leituras consecutivas, o que pode fazer com que vibrações residuais da membrana responsável por emitir as ondas acústicas sensibilize o elemento receptor provocando falsas leituras, conforme [Jones e Flynn \(1993\)](#). Maiores detalhes acerca do princípio de funcionamento dos sensores ultrassônicos, assim como vantagens e desvantagens deste sensor encontram-se na seção de Materiais desta monografia.

Para a locomoção do veículo, são utilizados dois motores *brushless* de corrente

contínua, de modo que a tração é dianteira. Logo, o veículo faz curvas em razão da diferença de velocidade entre os BLDC e, por se tratar de motores usualmente utilizados em VANTs, atinge velocidade de até 80 km/h. Como o controle de motores sem escovas não é trivial de ser feito, foram utilizados controladores eletrônicos de velocidade, ESCs, como elemento intermediador entre o microcontrolador e os motores. Desta forma, todo o tratamento de mais baixo nível no que concerne o acionamento das bobinas dos motores foi designado a este dispositivo, enquanto o microcontrolador se responsabiliza por fornecer aos ESCs a velocidade que pretende-se obter do seu respectivo motor. O sistema de comunicação tem o propósito de: fornecer feedback dos dados internos do veículo, como percepção e velocidade dos motores; regular o acionamento dos motores, pois repassa ao microcontrolador informações de um botão de segurança, que emite sinais ao veículo, autorizando-o ou não a navegar; e, finalmente, de servir como uma interface de comandos na qual é possível controlar remotamente o veículo. ¹.

Quanto ao subsistema de navegação, temos que este consiste na inteligência artificial do veículo, isto é, qual é a estratégia utilizada para efetuar o desvio de obstáculos com base nos dados colhidos pelos sonares. A técnica de desvio de obstáculos implementada é a mais simples possível: trata-se de uma função que mapeia as leituras dos sonares - categorizadas em três regiões: perigo, atenção e distante - em um par de velocidades angulares - categorizados quanto a intensidade em forte, médio e leve, e quanto à direção em esquerda ou direita - a serem impostas aos motores de acordo com qual a combinação de regiões lida pela matriz de sonares, conforme a Eq. 1.1. A tabela verdade que relaciona domínio e contradomínio da função de desvio de obstáculos consta no Apêndice, vide Tabela 1.

$$T : R^5 \rightarrow S \quad (1.1)$$

em que: $R = \{distante, perigo, atenção\}$, $S = \{E_L, E_M, E_F, D_L, D_M, D_F\}$

Note que cada um dos elementos do conjunto S são pares ordenados que representam a velocidade angular dos motores.

¹ Entenda-se por veículo não só a parte física como rodas, motores e dispositivos mas, também, todo o *software* responsável por gerir o automóvel.

Tabela 1 – Tabela Verdade

Sensor 0	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Ação
0	0	0	0	0	FS
0	0	0	0	1	E_L
0	0	0	1	0	E_M
0	0	0	1	1	E_M
0	0	1	0	0	E_F
0	0	1	0	1	E_F
0	0	1	1	0	E_F
0	0	1	1	1	E_F
0	1	0	0	0	D_M
0	1	0	0	1	D_M
0	1	0	1	0	E_F
0	1	0	1	1	E_M
0	1	1	0	0	D_F
0	1	1	0	1	E_F
0	1	1	1	0	E_F
0	1	1	1	1	E_F
1	0	0	0	0	D_L
1	0	0	0	1	Fre
1	0	0	1	0	E_M
1	0	0	1	1	E_M
1	0	1	0	0	D_F
1	0	1	0	1	E_F
1	0	1	1	0	E_F
1	0	1	1	1	E_F
1	1	0	0	0	D_M
1	1	0	0	1	D_M
1	1	0	1	0	D_M
1	1	0	1	1	Fre
1	1	1	0	0	D_F
1	1	1	0	1	D_F
1	1	1	1	0	D_F
1	1	1	1	1	E_F

A título de ilustração, para deixar mais claro o propósito deste projeto, podemos supor que um MOSA esteja sendo desenvolvido com o propósito de percorrer uma rota previamente selecionada, utilizando-se de GPS, acelerômetro e magnetômetro para a missão. Este poderia ser testado no veículo antes de ser colocado para voar, de forma que o veículo autônomo desempenharia a função da aeronave, sendo responsável por desviar de eventuais obstáculos quando necessário, e quando o caminho estiver livre, o controle do veículo seria repassado ao MOSA, mas ainda sob sua supervisão. Dessa forma, quando em posse do veículo, o MOSA desempenharia sua missão, que no exemplo citado seria percorrer *checkpoints*.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 Sistemas Reativos

“Representações explícitas e modelos atrapalham. No fim das contas, a melhor representação do mundo é ele mesmo.”

Brooks, R.A (BROOKS, 1991)

tradução livre

2.1.1 Paradigma Reativo como Robótica Bioinspirada

De acordo com Rodney Brooks (BROOKS, 1991), para o desenvolvimento da inteligência no seu sentido mais estrito e genuíno, são condições suficientes que o indivíduo, que denominaremos agente, tenha as seguintes faculdades: mobilidade dentro de um ambiente dinâmico no qual esteja inserido, percepção do que se passa nas suas adjacências e, por fim, manutenção da própria sobrevivência. Em suma, habilidades como o raciocinar, comunicar-se e gerar conhecimento nada mais são do que comportamentos complexos, consequências simples do fato de existirmos e do nosso poder de reação dentro do meio em que vivemos.

Para aprofundarmos a discussão e esclarecermos como se daria esse processo de aprimoramento dos agentes, é preciso fornecer uma definição mais rigorosa do termo “comportamento”. Em tradução livre: “comportamentos são mapeamentos diretos de informações sensoriais recebidas em padrões de ações motoras, desempenhadas para se cumprir uma tarefa. Matematicamente, seria uma função transferência que transforma dados dos sensores em comandos para os atuadores” (MURPHY, 2000).

Nos animais, a transformação de percepção em ação está subordinada à existência de estímulos específicos de natureza interna ou externa ao agente que podem ser entendidos como sinais de controle, permitindo ou inibindo determinados comportamentos (MURPHY, 2000). A título de ilustração: ao avistar uma presa - informação sensorial - o predador somente a ataca - comportamento - caso esteja com fome - estímulo interno; ou quando afastamos a mão - comportamento - ao tocarmos uma panela quente - a informação sensorial seria a temperatura da panela enquanto o estímulo externo é o fato de que ela excede uma dada temperatura.

Com base em estudos da etologia, os comportamentos dos animais podem ser inatos ou aprendidos, e a sua inteligência pode ser decomposta verticalmente em camadas

de comportamentos, cada qual acessa os sensores e atuadores do agente de maneira independente das demais (MURPHY, 2000). Isto é, o indivíduo inicia sua existência com um conjunto de comportamentos inatos de autopreservação mas, ao longo da sua vida, outros novos vão surgindo, podendo: refinar comportamentos pré-existent, negá-los (completamente) ou agregar a eles sem produzir conflitos, i.e. trabalhando paralelamente com os que lhe são ancestrais. Desta forma, os dois primeiros casos podem ser entendidos como uma reutilização de camadas inferiores da inteligência, enquanto o último consiste na adição de mais uma camada.

2.1.2 Características

Por estar embasado em ideias da etologia discutidas na seção anterior, o paradigma reativo simplesmente desconsidera a etapa de planejamento existente na tríade 'percepção, planejamento, ação', que sumariza o ciclo de tarefas realizadas por um sistema sob o paradigma hierárquico (MURPHY, 2000; ROMERO et al., 2014). Em suma, os comportamentos se dão de acordo com o que o agente percebe que está acontecendo no seu entorno, não são feitas modelagens ou representações do ambiente externo, apenas medições locais e orientadas a comportamentos.

Em decorrência da exclusão da etapa de planejamento, robôs desenvolvidos sob o paradigma reativo costumam ser simples e apresentam respostas rápidas (ROMERO et al., 2014). Com boas práticas de projeto é possível construir um robô com: alta coesão, pois comportamentos podem ter acesso direto aos sensores de que necessitam para tomar suas decisões - o que possibilita um alto grau de independência em relação a operações e dados externos entre diferentes módulos ou subsistemas do robô; e baixo acoplamento, pois comportamentos são independentes entre si e, portanto, há pouca ou nenhuma dependência de ligações e interfaces externas a um dado módulo (MURPHY, 2000).

2.2 Arquitetura MOSA

Arquitetura que propõe dividir o sistema aéreo de navegação autônoma em dois módulos: aeronave e MOSA (PIRES et al., 2011).

O primeiro constitui a porção crítica do sistema embarcado, i.e. segmento cuja falha pode resultar em ao menos um dos seguintes desastres: morte ou lesão de pessoas; destruição ou danos a propriedades, patrimônios ou equipamentos; danos ambientais (STOREY, 1996). Veículos Aéreos Não Tripulados, VANTs, apresentam a tolerância de um erro grave a cada 10^5 ou 10^9 horas de voo (DILLINGHAM, 2008), o que os caracteriza como sistemas computacionais de tempo real do tipo *hard*. Maiores esclarecimentos acerca destes jargões podem ser encontrados no apêndice.

O segundo corresponde à parte não crítica à segurança, encarregada do controle da navegação e, por conseguinte, da determinação da maior parte dos parâmetros de

voo. É caracterizado como um conjunto de sensores inteligentes capazes de cumprir uma missão específica, ou seja, existe uma relação biunívoca entre missão e MOSA, dado que ele consiste no melhor arranjo de sensores para o cenário em questão. Neste contexto, a aeronave é vista unicamente como o meio de transporte dos sensores, enquanto que o módulo MOSA constituiria o ‘cérebro’ da plataforma, responsável pelo cumprimento da missão e por guiar a aeronave até a sua realização.

No entanto, como a aeronave é o elemento responsável pela garantia da segurança, cabe a ela acatar ou não os comandos do MOSA. E pode, inclusive, optar por readaptar a missão em tempo de voo para se ajustar ao cenário, o que inclui a seleção dos sensores que melhor se encaixam na dada conjuntura.

Isso se dá através de uma matriz de reconfiguração dinamicamente adaptável denominada *Knowledge Based Framework*, seu papel é comparável à expertise de um piloto. Ou seja, um elemento inteligente capaz de escolher o melhor serviço a ser executado com base em regras e critérios de seleção, tais quais resposta em tempo real, segurança e performance.

3 MATERIAIS

- 5 sensores ultrassônicos de distância HC-SR04
- 2 motores *brushless outrunner* Turnigy D2836/9 950KV
- 2 ESCs Hobby King com UBEC de 5.5V/4A: um de 35A e outro de 40A
- 2 módulos de rádio frequência baseados no *transceiver* Nordic nRF24L01+
- 1 bateria LiPo 30C de 2800 mAh
- 2 Arduino Pro Mini
- 1 Conversor/Adaptador USB-Serial PL2303
- 1 Carregador balanceador de bateria IMAX B6-AC

3.1 Motor *Brushless*

São motores síncronos¹ de corrente contínua cuja comutação é feita eletronicamente, e não mecanicamente por meio de escovas como nos motores CC comuns, por isso denominados *brushless*. Possui aplicações nas indústrias de automóveis, aeroespacial, médica, de equipamentos de automação industrial e instrumentação . Os motores BLDC apresentam algumas vantagens em relação aos de corrente contínua com escovas e de indução no que concerne a: resposta dinâmica, ruídos de operação, durabilidade (i.e. vida útil), assim como razão do torque pelas dimensões do motor (YEDAMALE, 2003).

O rotor consiste de um ímã permanente, já os pólos do estator são formados por enrolamentos, que precisam ser energizados na sequência correta para que um campo magnético girante seja criado. Nas máquinas CC isto é feito mecanicamente através das escovas mas, no caso do BLDC, é preciso que a posição do rotor em relação ao estator seja conhecida para que seja possível fazer o acionamento correta das bobinas. Existem dois meios de se obter esta informação: através de sensores de efeito hall, método empregado neste trabalho, ou processamento da força contra eletromotriz das bobinas do estator.

Sensores de efeito Hall são transdutores analógicos que relacionam a intensidade do campo magnético externo transversalmente disposto a ele em termos de tensão elétrica. Quando associado a um circuito comparador *schmitt trigger*, comportam-se como um sensor digital que aponta quando a intensidade do campo magnético atinge um valor de limiar pré-determinado. Ao dispor sensores deste tipo ao longo do estator, torna-se possível uma estimativa da posição do rotor ao ser feito um estudo comparativo da resposta de

¹ Motores Síncronos: o campo magnético girante do rotor e do estator têm a mesma frequência.

cada sensor, cruzando esta informação com a posição que cada um destes se encontra em relação ao estator (BROWN, 2002).

Há a possibilidade de fazer a comutação sem empregar qualquer tipo de sensor, logo, trata-se de um método mais barato. Nesse caso, a estimativa da posição do rotor se dá através do processamento das forças contra-eletromotriz de cada um dos enrolamentos do estator. No entanto, algumas limitações surgem: o motor deve operar acima de uma dada rotação, caso contrário o método não funciona; mudanças bruscas de carga não podem ocorrer; há discontinuidades na resposta do motor quando operando em velocidades acima da taxa de comutação ideal (BROWN, 2002).

3.2 ESC

Controlador responsável por processar as informações oriundas dos sensores de efeito Hall do motor BLDC e providenciar o acionamento correto dos enrolamentos do estator para que a velocidade angular se dê de acordo com o sinal de controle que é enviado a este dispositivo. No caso dos ESCs utilizados no presente trabalho, este sinal de controle é feito utilizando-se modulação por largura de pulso, i.e. PWM. A frequência de operação varia de acordo com o modelo do controlador e para o caso deste projeto é de 400Hz.

3.3 Sensor Ultrassônico

3.3.1 Princípio de Funcionamento

Utiliza o método *time of flight*, que consiste na medição do intervalo de tempo, igualmente denominado *time of flight*, que uma onda ou partícula leva para percorrer uma determinada distância em um dado meio. Pode ser utilizado para medir: distância, velocidade (COTTER, 1994) e propriedades do meio de propagação ou da partícula propagante (AXEL; SHIMAKAWA; MACFALL, 1986; HAYASHI; YOSHINO; INUISHI, 1975).

Para medidores de proximidade, como é o caso de sonares e lasers, um transdutor emissor faz a conversão do sinal elétrico, denominado *trigger*, em um pulso de ondas (acústicas para o caso do sonar e eletromagnéticas para o laser), dando início à medição de tempo. Quando esta onda propagante encontra um objeto que a reflita de volta ao sensor e a intensidade deste sinal recebido, denominado *echo*, está acima de um determinado valor de limiar, o transdutor receptor envia um sinal elétrico que interrompe a contagem de tempo, obtendo-se assim a medida do *time of flight*, τ . Com isso, supondo que a velocidade de propagação, ν , desta onda no meio seja conhecida. De acordo com Siegwart, Nourbakhsh e Scaramuzza (2011), pode-se calcular a distância, Δ , entre o sensor e o objeto que reflete o pulso de ondas pela Eq.3.1:

$$\Delta = \frac{\nu \times \tau}{2} \quad (3.1)$$

Quanto ao sensor ultrassônico especificamente, temos que as ondas sonoras utilizadas estão usualmente situadas entre 40kHz e 180kHz, sendo emitidas no formato de pacotes compostos por uma série de pulsos; no caso do sonar utilizado neste trabalho, 8 pulsos de 40kHz. Por se tratarem de ondas mecânicas, é importante que a tensão de limiar, do inglês *threshold*, comporte-se ao longo do ciclo de leitura da seguinte forma (SIEGWART; NOURBAKHS; SCARAMUZZA, 2011): durante o período denominado *blanking time* (SIEGWART; NOURBAKHS; SCARAMUZZA, 2011) ou *dead time* (MURPHY, 2000), o qual engloba o intervalo de emissão das ondas sonoras até o momento em que o diafragma para de oscilar (o que pode constituir alguns milissegundos após a cessação do sinal de *trigger*), a tensão de limiar é muito alta no intuito de eliminar leituras inválidas decorrentes de interferência entre emissor e receptor; em seguida, a tensão de *threshold* se reduz a um valor que permita a detecção de obstáculos e vai sendo continuamente decrementada com o passar do tempo. Isso se dá pelo fato de que a intensidade do sinal acústico, i.e. potência por ângulo sólido, sofre atenuações atmosféricas que variam com a distância percorrida, conforme a equação 3.2 (EVERETT, 1995), que leva em consideração somente efeitos da divergência esférica e absorção molecular.

$$I = \frac{I_0 e^{-2\alpha R}}{4\pi R^2} \quad (3.2)$$

Em que: α é o coeficiente de atenuação do meio, associado às absorções moleculares, o qual varia em função da frequência da onda emitida assim como de propriedades do meio, e.g. umidade e poeira contida no ar. Para ondas de 40kHz: $0,197 \text{ dB/m} < \alpha < 0,295 \text{ dB/m}$.

3.3.2 Limitações

3.3.2.1 Variação na velocidade de propagação da onda acústica

Como citado anteriormente, a medição da distância pressupõe que a velocidade de propagação da onda no meio é conhecida. No entanto, mudanças na temperatura e umidade do fluido em que a onda se propaga podem causar erros de medida não desprezíveis (EVERETT, 1995).

3.3.2.2 Direcionalidade

O emissor da radiação acústica ultrassônica apresenta um padrão de radiação (BALANIS, 2016; POZAR, 2009) composto por lobos laterais (BALANIS, 2016; POZAR, 2009) que não são levados em conta, pois a maioria dos sistemas supõem toda radiação recebida como oriunda do lobo central (BALANIS, 2016; POZAR, 2009), usualmente modelado como um cone de aproximadamente 30° que varre até 5 metros (MURPHY, 2000). De acordo com ElecFreaks (2016), para o dispositivo utilizado nesse trabalho o ângulo de abertura do feixe é de 15° e o alcance, 4 metros.

Além deste problema, o próprio fato de que a direcionalidade do sensor é baixa, i.e. o lobo central é largo, implica numa imprecisão na medida obtida, pois não é possível

associar a distância lida a um lugar específico, mas sim a uma região no espaço coberta pelo lobo central (SIEGWART; NOURBAKHSH; SCARAMUZZA, 2011).

3.3.2.3 Resposta no Ambiente Alvo

Por ser um sensor refletivo, a performance do sonar é significativamente afetada pelas características do alvo (EVERETT, 1995). Um dos problemas decorrentes desse fato é que determinados objetos apresentam elevada taxa de absorção ou, ao contrário, são atravessados pela radiação, resultando, em ambos os casos, em pouca ou nenhuma energia retornando ao sensor. Dessa forma, estes objetos são invisíveis para o dado método de medição; materiais como espuma, pele e roupas podem absorver as ondas acústicas (SIEGWART; NOURBAKHSH; SCARAMUZZA, 2011) enquanto objetos com áreas superficiais pequenas, e.g. mesas e cadeiras, podem não ser detectados (MURPHY, 2000). Vale ressaltar que as propriedades de reflexão, absorção e transmissão são variáveis de acordo com a frequência e com o tipo de radiação, esta podendo ser acústica ou eletromagnética. Existem outros problemas relativos ao ambiente alvo que não são relacionados à absorção ou transmissão da radiação, mas sim à reflexão e que serão tratados nas seções subsequentes separadamente.

3.3.2.4 *Foreshortening*

Como a direcionalidade dos sensores ultrassônicos é baixa, isto é a largura de feixe do lobo central é alta, aproximadamente 30° , quando o alvo a ser detectado não está perpendicularmente posicionado em relação ao eixo acústico do sensor, o cone que formado pelo lobo principal atinge o objeto em instantes diferentes. Consequentemente, retorna ao sensor em instantes diferentes provocando um desvio na leitura da distância, fazendo com que o obstáculo pareça estar mais próximo do que está na realidade. Por isso este problema é denominado *foreshortening*

3.3.2.5 Reflexão especular e *Crosstalk*

Analisando ainda a situação em que o obstáculo não está perpendicular ao eixo acústico do sonar, a onda emitida pode ser refletida de tal forma que não retorne ao sensor, caso este em que o obstáculo não é percebido; outra possibilidade é de que esta onda atinja outras superfícies até que por fim retorne ao sensor, desta forma a medida obtida indica que o alvo encontra-se mais distante do que realmente está, fenômeno denominado reflexão especular (ROMERO et al., 2014; SIEGWART; NOURBAKHSH; SCARAMUZZA, 2011; EVERETT, 1995).

Quando utiliza-se uma matriz de sonares, este problema é agravado, pois pode provocar interferência entre sensores ou, do inglês, *crosstalk*. De modo que além da medida obtida estar errada, o posicionamento estimado do obstáculo será também errôneo

(MURPHY, 2000), afinal pressupõe-se que o sinal de *echo* é oriundo do pulso de ondas emitido pelo próprio dispositivo. No entanto, diferentemente da reflexão especular, este problema pode ser amenizado de diferentes maneiras, vide Borenstein e Koren (1995), Shoval e Borenstein (2001).

3.4 Módulo de rádio frequência

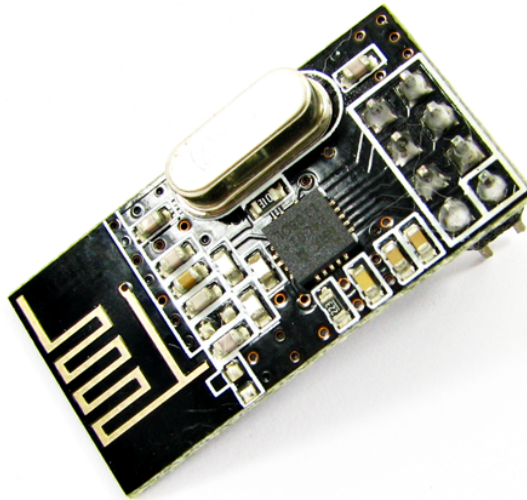


Figura 1 – Módulo de Rádio Frequência baseado no *transceiver* da Nordic nRF24L01+

Módulo de rádio frequência, vide Fig. 1 obtida de GHI Eletronics (2017), de baixo custo e consumo cuja faixa de operação situa-se na banda S das ondas UHF (*Ultra High Frequency*), com uma porção dentro da banda ISM ². Algumas informações técnicas (SEMICONDUCTOR, 2008) de interesse estão listadas abaixo:

- Tensão de alimentação: 1,9V - 3,6V
- Antena em circuito impresso do tipo MIFA (*Meandered Inverted-F Antenna*) (CY-PRESS SEMICONDUCTOR CORPORATION, 2016)
- Frequência de operação: 2,4GHz - 2,525GHz
- Modulação digital do tipo GFSK
- Apresenta até 126 canais de comunicação ³
- Taxas de bits: 250kbps, 1Mbps ou 2Mbps

² maiores informações no apêndice

³ Válido apenas para as taxas de 250kbps e 1 Mbps; a 2Mbps este valor cai à metade, i.e. 63 canais.

- Potências de saída de transmissão: 0dBm, -6dBm, -12dBm e -18dBm
- Interface com o microcontrolador por SPI à taxa de até 10Mbps
- Pinos de entrada tolerantes a até 5V
- Pacotes recebidos verificados automaticamente, certificando-se da validade do endereço apontado e legitimando a integridade do pacote via CRC(*Cyclic Redundancy Check*)⁴, antes de serem movidos às filas de dados recebidos (*RX FIFO*)
- Receptor envia ao transmissor um pacote de confirmação de recepção dos dados pelo mesmo canal (*acknowledgment packet*).

3.5 Arduino

Trata-se de uma plataforma de prototipação eletrônica aberta, i.e. *open-source hardware*, baseada no microcontrolador de 8 bits da Atmel ATmega328 ([ATMEL CORPORATION, 2015](#)), programável via serial (ICSP) através de um microcomputador, por exemplo, por meio do ambiente de desenvolvimento *Arduino Software IDE*, *open-source software* e encontra-se no GitHub ([ARDUINO, 2016a](#)). Para programar este dispositivo, foi utilizado um módulo baseado na ponte USB-Serial PL-2303, cuja descrição detalhada pode ser encontrada em [Prolific Technology Inc. \(2005\)](#).

Algumas informações técnicas ([ARDUINO, 2016b](#)) de interesse estão listadas abaixo:

- Dimensões: 17,78mm x 33mm
- Tensão de alimentação recomendável: 5V - 12V
- Memória
 - Flash: 32kB
 - SRAM: 2kB
 - EEPROM: 1kB
- 20 portas digitais de entrada/saída, das quais 6 podem ser usadas como saídas PWM
- 6 portas de entrada analógicas
- *clock* de 16MHz

⁴ Vide apêndice para uma breve explanação sobre CRC

3.6 Bateria

Baterias do tipo LiPo são uma das mais indicadas para veículos elétricos e híbridos, tanto quanto para equipamentos eletrônicos portáteis; no entanto, alguns cuidados precisam ser tomados ao manipulá-la por serem sensíveis a sobrecarga ou descarga abrupta. Logo, por questões de segurança e eficiência é necessário haver um sistema eletrônico para gerenciar a recarga deste dispositivo, o qual monitora a tensão de cada uma das células assim como a temperatura em pontos específicos (BARONTI et al., 2011). Neste trabalho foi utilizado o carregador IMAX B6-AC para fazer este serviço.

3.6.1 *C rate*

É um parâmetro que descreve a corrente de descarga da bateria em relação à sua capacidade nominal (TEAM, 2008). Vide a Eq. 3.3 para um exemplo ilustrativo baseado na bateria utilizada neste projeto.

$$30C = \frac{I_{descarga}}{2.800mAh} \Rightarrow I_{descarga} \approx 10.7A \quad (3.3)$$

4 MÉTODO

4.1 Estratégia *bottom-up*

A estratégia gerencial e organizacional *bottom-up* foi utilizada no desenvolvimento deste projeto. Em função da natureza modular e orientada a comportamentos de arquiteturas reativas (MURPHY, 2000), a adoção deste método de gerenciamento é quase que uma escolha natural. O robô foi dividido em quatro subsistemas, desenvolvidos e testados separadamente: percepção, locomoção, comunicação e navegação (que, no caso deste projeto, consiste no desvio de obstáculos em si). Nesta fase de implementação, boas práticas de engenharia de software foram prioridade, buscando uma implementação que apresente baixo acoplamento e alta coesão com a expectativa de desenvolver um código que possa ser facilmente entendido e reutilizado em futuros trabalhos afins. Em seguida se deu a etapa de integração das partes para, a posteriori, serem feitos testes no conjunto, conforme ilustra o diagrama 2.

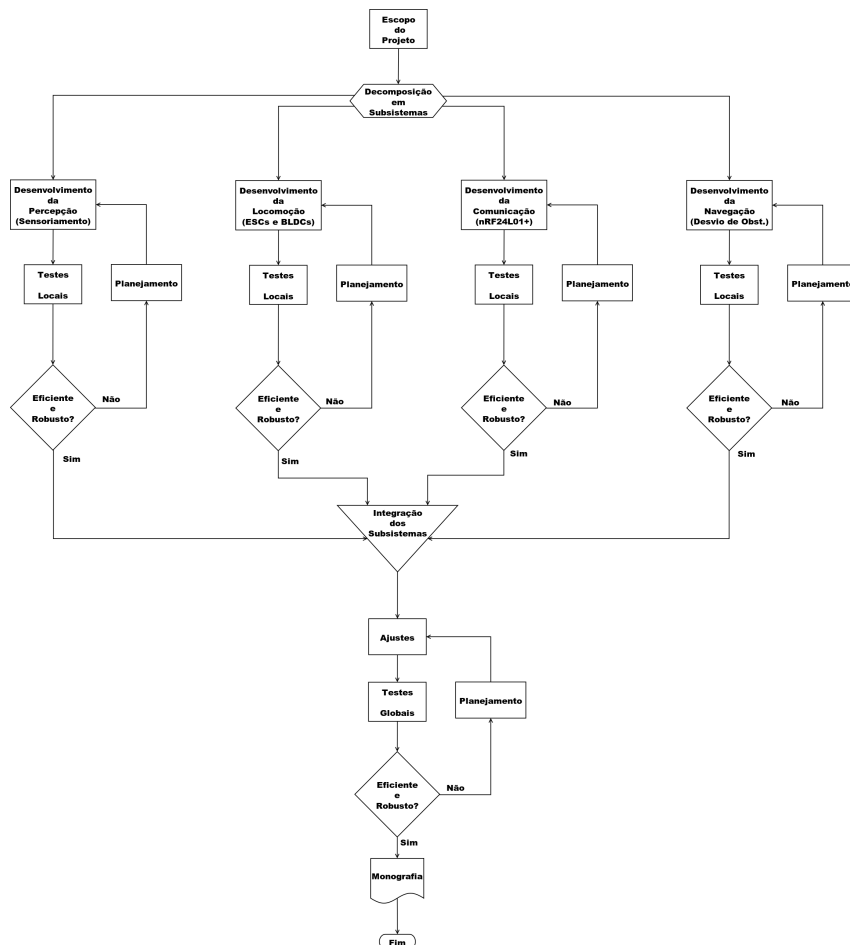


Figura 2 – Estrutura Analítica do Projeto

4.2 Arquitetura Reativa

Optou-se por uma arquitetura de controle fortemente baseada nas informações sensoriais, sem delongas em processamento de sinal para ajustar os dados dos sensores a um modelo ou representação de mundo preconcebido. A razão dessa escolha é decorrência da necessidade de uma resposta rápida do sistema, vantagem da arquitetura reativa em função da sua simplicidade ([ROMERO et al., 2014](#)).

A latência inerente à obtenção dos dados dos sonares ([JONES; FLYNN, 1993](#)) associada à alta velocidade de operação do robô é a causa desta restrição temporal. Como é imprescindível colher dados do ambiente externo a uma taxa que dê um panorama atualizado do que está se passando ao redor do robô ([BROOKS, 1991](#)), reduzir o tempo de resposta do sistema possibilita que o desvio de obstáculos ocorra de maneira mais suave. Haja vista que se a detecção for feita com antecedência, medidas menos bruscas podem ser adotadas; em contraste com o caso em que a latência é alta a ponto de que a percepção das barreiras no caminho se dê na proximidade do veículo.

Os comportamentos implementados no robô se restringem às diferentes manobras de evasão, adotadas com base na proximidade de obstáculos dos cinco sensores, vide Tabela 1. Os estímulos reguladores consistem na recepção, via RF, de um comando que incite o robô a navegar e do aval mediante recebimento de uma mensagem nos últimos 500ms informando se o botão de segurança foi acionado.

4.3 Subsistema de Locomoção

Numa visão geral, temos que o Arduino é responsável por emitir um sinal de controle, modulado em largura de pulso, ao ESC. Este, por sua vez, é incumbido de energizar os devidos enrolamentos do estator a fim de que o motor BLDC atinja, o mais breve possível, a velocidade desejada, expressa pelo sinal de controle. Resumidamente: o Arduino comanda, o ESC acata a ordem e conduz o motor a cumpri-la utilizando os recursos da bateria. O robô apresenta tração dianteira e os motores estão fixos no chassi, logo, faz curvas quando há diferença de velocidade entre os motores.

O código fonte responsável pela produção do pulso PWM nas portas do Arduino foi desenvolvido por Sam Knight e disponibilizado ao público para utilização e modificações de qualquer natureza. Esta biblioteca, denominada PWM, pode ser encontrada no GitHub ([MANIACBUG, 2016a](#)).

4.4 Subsistema de Percepção

O *software* que manipula os sensores ultrassônicos foi aperfeiçoado aos poucos. Primeiramente, buscou-se fazer o dispositivo funcionar, utilizando funções prontas e, portanto, não otimizadas de bibliotecas do Arduino. Em seguida, foi construída a matriz

de sensores que, conforme a Fig. 3, tem o pino de *trigger* comum a todos sonares; no entanto, a priori, a leitura dos sonares era feita sequencialmente utilizando o código citado. O próximo passo, naturalmente, foi fazer com que os cinco sensores fossem lidos paralelamente, aproveitando o fato de todos dispararem juntos, a fim de minimizar o tempo de resposta na leitura da matriz. Em seguida, a fim de reduzir a latência inerente dos sensores ultrassônicos, optou-se por implementar intervalos dinâmicos de medição, isto é, o tempo gasto na percepção dependeria do meio no qual o veículo está inserido.

Foram feitos testes mais rigorosos nessa última configuração com o objetivo de certificar se há de fato a necessidade de estipular um intervalo mínimo entre leituras sucessivas dos sonares ou se seria possível que esta latência fosse dinâmica, atrelada ao sensor cujo obstáculo detectado encontra-se mais distante. Em suma, foi verificado se ciclos de leitura menores do que os 60ms sugeridos em [ElecFreaks \(2016\)](#) realmente ocasionam aumento na incidência de erros nas medidas. Os detalhes acerca destes testes constam na seção de resultados.

A decisão de disparar todos os sonares simultaneamente foi feita com o intuito de reduzir o número de portas utilizadas no Arduino, assim como aumentar a taxa de obtenção dos dados, i.e. a largura de banda, conforme a terminologia adotada em ([ROMERO et al., 2014](#)). No entanto, as consequências desta deliberação são severas: agravamento dos fenômenos de *foreshortening* e *crosstalk* ([SHOVAL; BORENSTEIN, 2001](#)).

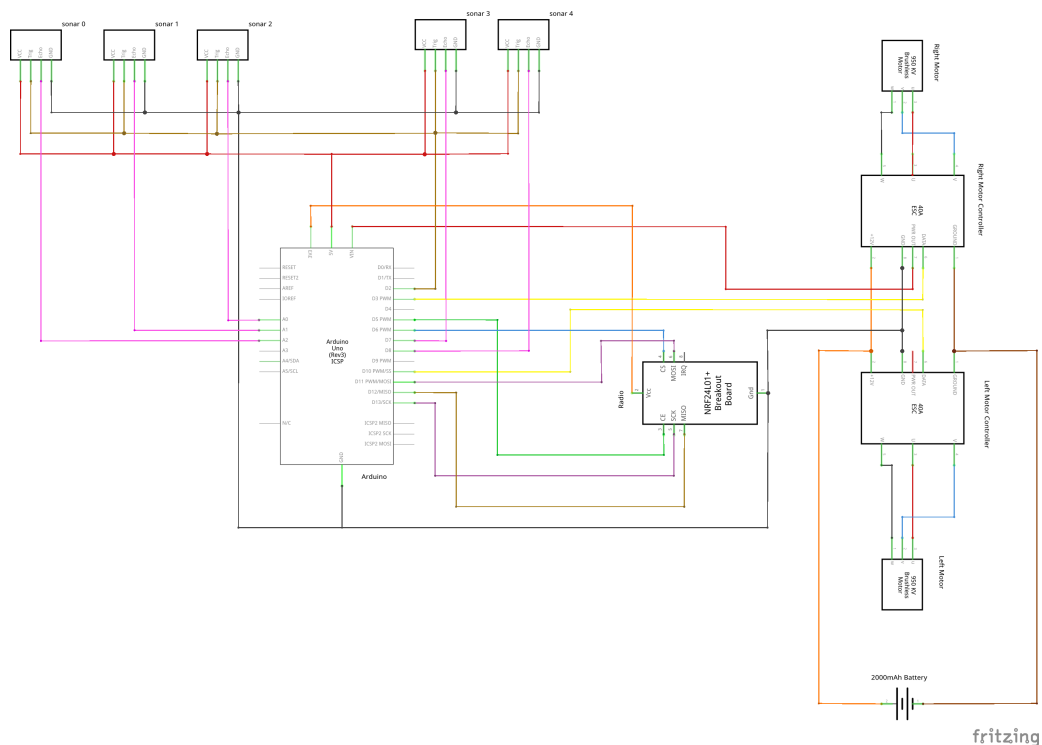


Figura 3 – Diagrama Elétrico

4.5 Subsistema de Comunicação

Este segmento teve como alicerce a biblioteca denominada RF24, disponível em ([MANIACBUG, 2016b](#)), responsável por todo o controle em baixo nível do *transceiver* nRF24L01+. Foi implementada em C++ e consiste numa única classe, RF24 (vide Fig.4), que provê acesso às funcionalidades básicas do *transceiver* como controle da potência de transmissão do sinal e escolha do canal a ser utilizado, tanto quanto funções que permitem enviar dados por um canal previamente aberto e ler dos canais em que o dispositivo se comporta como receptor; a documentação completa da classe pode ser encontrada em [ManiacBug \(2016c\)](#). Assim como todos os códigos de terceiros e programas utilizados nesse projeto, sua utilização é aberta ao público gratuitamente, conforme os termos de uso.

Na definição do escopo do projeto, o papel do módulo de radiofrequência seria de simplesmente garantir a segurança e integridade do robô. Neste caso, uma comunicação *simplex* seria suficiente para cumprir a tarefa. O módulo transmissor, localizado no acionador remoto, enviava ao robô o nível lógico lido do botão de segurança. O *transceiver* do robô assumia o papel de receptor e enviava os dados recebidos por comunicação serial ao Arduino, que ordenava a parada dos motores caso a mensagem indicasse que o botão estava desligado ou se nenhum pacote fosse detectado num período pré-determinado de 1 segundo.

No entanto, após concluir o sistema de acionamento sem fio, concebeu-se a ideia de sofisticar a utilização do módulo de radiofrequência, implementando uma interface de comando capaz de alterar e supervisionar os parâmetros e dados sensoriais do robô, com o intuito de facilitar a etapa de testes com o veículo em movimento, objetivando evitar ao máximo a necessidade de reprogramá-lo.

Ao adicionar essa funcionalidade, surge a necessidade de que ambas partes, i.e. robô e sistema de controle remoto, possam receber e enviar informações um ao outro. Como o *transceiver* utilizado tem a funcionalidade de estabelecer comunicação *half-duplex* para cada canal, i.e. bidirecional mas não simultaneamente, pois o receptor pode inserir dados no pacote de confirmação de recepção, *acknowledgment packet* ([SEMICONDUCTOR, 2008](#)), e a biblioteca RF24 apresenta funções prontas que facilitam o emprego deste recurso, foi possível adicionar essa funcionalidade ao projeto sem a necessidade de utilizar dois canais de comunicação.

A interface de comando implementada abrange as seguintes funções:

- Ajustar a frequência do PWM de cada um dos motores.
- Ajustar a velocidade angular dos motores, que corresponde ao *duty cycle* do sinal de controle, modulado em largura de pulso.
- Enviar parâmetros do robô ao controlador remoto: frequência dos PWMs, velocidades

dos motores, leituras dos sensores ultrassônicos, *status* do botão de segurança de acordo com o veículo.

- Energizar os motores na velocidade estipulada enquanto o botão de segurança estiver acionado e não houver obstáculos que representem perigo ao robô.
- Acionar o sistema de navegação autônoma, também subordinado ao botão de segurança, com tentativas de envio das informações sensoriais e comportamentais a cada tomada de decisão do veículo ao controlador remoto sem suspender a movimentação do robô.
- Acionar o sistema de navegação autônoma por um número pré-estabelecido de leituras dos sonares, seguido de envio de todos dados coletados ao controlador remoto com o robô parado.



Figura 4 – Diagrama da Classe RF24

4.6 Subsistema de Navegação

Consiste na inteligência do robô, isto é, trata-se do conjunto de comportamentos adotados pelo veículo, através dos quais ele é capaz de desempenhar sua função de desvio de obstáculos. Tal qual foi feito em [Gageik, Müller e Montenegro \(2012\)](#), a área coberta por um dado sensor ultrassônico foi dividida em três regiões: distante, próxima e perigo. Quando a leitura de todos os sonares indica região distante, i.e. obstáculos distam mais do que 3 metros, considera-se que o robô está seguro e pode andar em velocidade máxima;

em futuros trabalhos, corresponderá à situação em que o controle do veículo é cedido ao MOSA. Caso a medida de algum dos sensores seja menor do que 1 metro - região de perigo - entende-se que o robô está na iminência de uma colisão e deve freiar imediatamente. Quando nenhuma destas situações citadas ocorre, isto é, nenhum dos sonares da matriz está na região de perigo, mas há ao menos um deles que não está na região distante, por conseguinte na região próxima, entende-se que há um obstáculo passível de ser contornado.

A estratégia de desvio de obstáculos é semelhante à desenvolvida em (DONGYUE; YUANHANG; YUTING, 2013) e define comportamentos bem simples e diretos, como atos reflexos nos animais, garantindo rapidez de resposta uma vez que as leituras dos sensores já foram feitas, vide Fig. 5. Analisa-se cada um dos cinco sonares quanto à região em que se encontra a barreira identificada: 0 para região distante e 1, próxima; cada uma das 32 combinações possíveis apresenta um comportamento correspondente: seguir em frente, fazer uma curva aberta, moderada ou brusca. Na Tabela 1 utiliza-se ‘E’ e ‘D’ para designar curvas à esquerda e direita, respectivamente; enquanto os índices ‘L’, ‘M’ e ‘F’ caracterizam o quão acentuada vai ser a curva: leve, moderada ou forte.

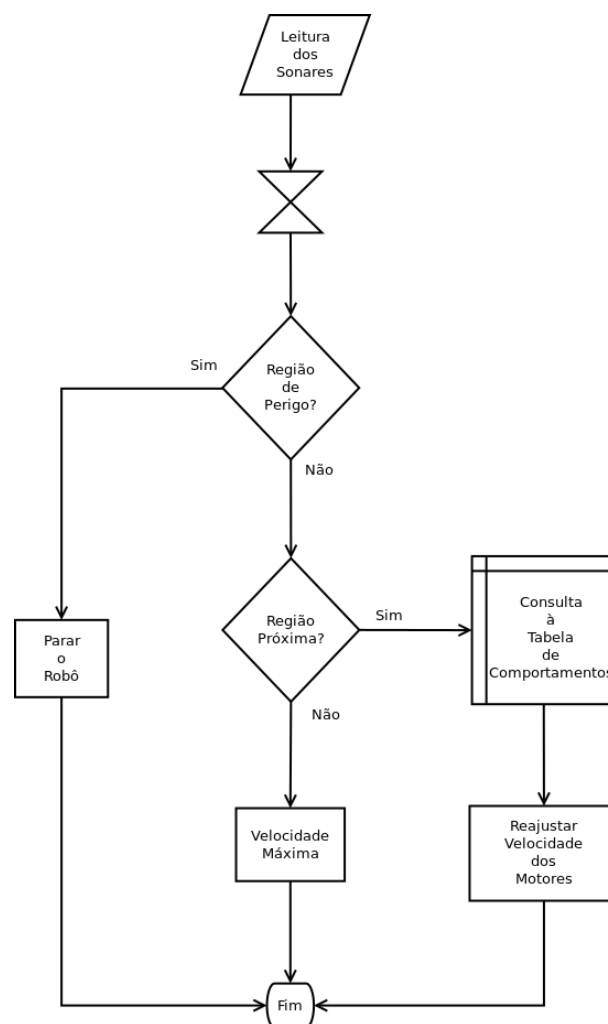


Figura 5 – Fluxograma da Rotina de Desvio de Obstáculos

4.7 Integração dos Subsistemas

Assim que todos os subsistemas foram implementados, testados e operavam isoladamente de maneira satisfatória, foram feitos testes no conjunto, que indicaram novos problemas a serem tratados. A maioria deles de ordem prática e facilmente contornáveis, no entanto um é digno de nota, pois implicou em uma mudança na disposição física dos componentes do veículo que acabou não solucionando o problema. Maiores detalhes, vide seção de Resultados.

5 RESULTADOS

5.1 Testes Unitários

5.1.1 Leituras Espúrias nos Sonares

Ao serem feitos testes unitários no *software* de controle dos sensores ultrassônicos, notou-se a existência de leituras espúrias, em condições em que não havia obstáculos dentro da região visível do dispositivo. A fim de documentar o problema, posicionou-se o veículo num ambiente em que não havia qualquer obstáculo num raio de 5 metros e foram feitas medições com intervalos de 30ms, 45ms e 60ms; no caso deste teste, não faz diferença se as leituras são dinâmicas ou estáticas pois em todas leituras ao menos um dos sonares não conseguia detectar obstáculos, fazendo com que os intervalos de medida estático e dinâmico fossem iguais sempre.

Os resultados obtidos no teste mostraram que as leituras espúrias são esparsas e, em sua maioria, apontam valores menores do que 10cm. A solução concebida para remediar este problema foi basear o comportamento a ser adotado pelo veículo na média aritmética das últimas 5 leituras, excluindo os valores extremos. Desta forma, reduz-se problemas de leituras errôneas em que o sensor falha em detectar o obstáculo dentro do alcance tanto quando detecta-se empecilhos onde não há. Com este novo comportamento, houve redução de mais de 40% do número de medidas espúrias, conforme ilustra a Tabela 2.

Tabela 2 – Teste sem Obstáculos ao Alcance

Dados	Contagem	Intervalo	Sensor 0	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
crus	$\neq 400$	30ms	0%	1,22%	0%	1,48%	0%
		45ms	0,67%	0,92%	0%	1,58%	0%
		60ms	3,17%	0,58%	0%	2,67%	0%
	< 10	30ms	0%	0%	0%	0,78%	0%
		45ms	0,67%	0%	0%	0,83%	0%
		60ms	3,17%	0%	0%	1,08%	0%
processados	$\neq 400$	30ms	0%	0,70%	0%	0,35%	0%
		45ms	0%	0,25%	0%	0,33%	0%
		60ms	0%	0,08%	0%	1,09%	0%
	< 10	30ms	0%	0%	0%	0%	0%
		45ms	0%	0%	0%	0%	0%
		60ms	0%	0%	0%	0%	0%

Uma outra solução plausível para remediar as medidas espúrias que apontam valores muito próximos ao veículo seria aumentar o *blanking time* dos sonares, conforme Siegart, Nourbakhsh e Scaramuzza (2011).

5.1.2 Comparação entre Intervalos de Medição Dinâmico e Estático

A fim de verificar a viabilidade de empregar-se intervalos dinâmicos na percepção do veículo, este foi disposto de frente a uma quina, buscando manter o sensor frontal o mais alinhado ao plano bissetor da junção das duas paredes, perpendiculares entre si, de forma que os sensores das extremidades estivessem aproximadamente equidistantes da respectiva parede mais próxima. Para isso, foram marcados com uma trena pontos no chão que distavam de ambas paredes 30cm, 50cm, 100cm, 150cm e 200cm; para valores maiores do que 200cm não era possível sensibilizar todos sonares ao mesmo tempo, de modo que ao menos um deles não conseguia detectar obstáculos, o que não faria sentido para o teste em questão. Em cada um destes pontos foram feitas medições estáticas e dinâmicas com intervalos de 30ms, 45ms e 60ms. Numa situação ideal, em que todos sonares conseguissem sempre encontrar os obstáculos, não faria diferença para as medidas dinâmicas qual o intervalo estipulado, pois a medição seria encerrada assim que todos sonares houvessem sido sensibilizados; no entanto, em algumas leituras houve falhas na detecção, apontando erroneamente a inexistência de obstáculo. Em cada um dos testes foram armazenadas 150 leituras consecutivas em um *buffer* local que, ao ser preenchido, cessava o acionamento dos sonares e imprimia os dados via interface serial antes de começar a próxima medição. Nos dados obtidos em cada uma dessas medições foram feitos cálculos de média e desvio padrão sujos e limpos¹, contagem dos resultados, e expresso em termos percentuais nas tabelas a seguir, que desviassem em mais do que 15 centímetros em relação à média limpa das leituras, exceto para o caso do teste feito a 30cm das paredes, em que foram contadas medidas que desviaram mais do que 5 centímetros da média limpa.

5.1.2.1 Teste 30cm

Neste teste as leituras dinâmicas se mostraram consideravelmente mais imprecisas, chegando a apresentar mais de 10% de erros em alguns testes; no entanto, é preciso levar em consideração o quão mais rápidas são as medições dinâmicas que, no caso deste teste, durariam por volta de 2ms. Apesar de todas as leituras de todos sonares terem encontrado obstáculo, o desvio padrão das leituras com intervalo dinâmico chegou a mais de 8cm para o sensor frontal em decorrência da aparição de medidas espúrias bem abaixo da média, da ordem de grandeza de 10cm. Este tipo de erro de leitura constitui um problema sério para a aplicação em pauta neste projeto, pois a detecção de falsos obstáculos tão próximos do veículo causaria o desligamento dos motores para, logo em seguida, serem ligados novamente como consequência das leituras corretas; como resultado deste erro, a trajetória acaba sendo imprevisível, pois os motores reagiriam diferentemente ao comando de parada, já que podem estar em velocidades diferentes entre si. Isto é, caso no momento

¹ Medidas limpas são aquelas cuja métrica foi calculada descartando-se as leituras em que o respectivo sonar falhou em encontrar o obstáculo. No caso do teste de 30cm, foram excluídas medidas abaixo de 10cm também.

dessa leitura espúria um dos motores esteja com a rotação mais baixa, pode ser que ele trave a roda mais rapidamente do que o outro, fazendo com que o veículo faça uma curva brusca que possa causar uma colisão, por exemplo.

Tabela 3 – 30cm

Medida	Intervalo	Leitura	Sensor 0	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
Média [cm]	30ms	Est.	26,43	30,13	31,14	35,62	37,19
		Din.	26,58	30,57	30,55	35,67	37,51
		Est.	26,37	30,12	30,99	35,66	37,21
		Din.	26,42	30,60	32,17	35,61	37,52
	45ms	Est.	26,36	30,51	32,61	35,67	37,34
		Din.	26,39	30,86	32,31	35,76	37,73
		Est.	26,45	30,26	31,59	35,75	37,17
		Din.	26,42	30,29	29,11	35,65	37,36
	60ms	Est.	26,41	30,12	31,28	35,67	37,21
		Din.	26,72	30,48	31,11	35,71	37,65
		Est.	26,46	30,01	30,38	35,61	37,15
		Din.	26,52	30,35	28,47	35,50	37,33
Média Limpa [cm]	30ms	Est.	26,43	30,13	31,14	35,62	37,19
		Din.	26,58	30,57	31,16	35,67	37,51
		Est.	26,37	30,12	30,99	35,66	37,21
		Din.	26,42	30,60	32,69	35,61	37,52
	45ms	Est.	26,36	30,51	32,61	35,67	37,34
		Din.	26,39	30,86	32,82	35,76	37,73
		Est.	26,45	30,26	31,59	35,75	37,17
		Din.	26,42	30,29	31,91	35,65	37,36
	60ms	Est.	26,41	30,12	31,28	35,67	37,21
		Din.	26,72	30,48	31,59	35,71	37,65
		Est.	26,46	30,01	30,38	35,61	37,15
		Din.	26,52	30,35	30,84	35,50	37,33

Tabela 3 – 30cm

Continua na próxima página.

Desvio Padrão [cm]	30ms	Est.	0,50	0,34	1,51	0,49	0,41
		Din.	0,50	0,50	4,19	0,55	0,53
		Est.	0,48	0,33	1,19	0,48	0,43
		Din.	0,50	0,49	4,35	0,59	0,55
	45ms	Est.	0,48	0,50	1,68	0,47	0,52
		Din.	0,49	0,35	4,12	0,54	0,62
		Est.	0,50	0,44	1,63	0,44	0,41
		Din.	0,50	0,46	8,18	0,48	0,63
	60ms	Est.	0,49	0,33	1,42	0,47	0,41
		Din.	0,45	0,50	4,10	0,50	0,69
		Est.	0,50	0,12	0,70	0,49	0,38
		Din.	0,50	0,48	7,47	0,50	0,49
<avg - 15	30ms	Est.	0,00%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	2,67%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	2,00%	0%	0%
	45ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	2,00%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	11,33%	0%	0%
	60ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	2,00%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	10,00%	0%	0%
>avg + 15	30ms	Est.	0%	0%	1,33%	0%	0%
		Din.	0%	0%	4,00%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0,67%	0%	0%
		Din.	0%	0%	4,67%	0%	0%
	45ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	1,33%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	6,67%	0%	0%
	60ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	7,33%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	6,67%	0%	0%

Tabela 3 – 30cm

Continua na próxima página.

= 400	30ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
	45ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
	60ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%

5.1.2.2 Teste 50cm

Neste teste, houve grande incidência de medidas espúrias da ordem de grandeza de 100cm no sensor mais à direita do veículo, denominado Sensor 4 na Tabela 4, causando desvios padrão maiores do que 25cm para determinados testes, mesmo tendo sido encontrado obstáculo em todas medidas. Para os demais sensores, os resultados obtidos foram satisfatórios, pois as medidas espúrias que surgiram foram esparsas e, desta vez, apareceram mais frequentemente nos testes com leituras estáticas.

Tabela 4 – 50cm

Medida	Intervalo	Leitura	Sensor 0	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
Média [cm]	30ms	Est.	44,80	47,77	50,86	48,39	53,25
		Din.	44,57	47,87	50,13	48,59	53,65
		Est.	45,21	47,91	50,86	48,35	52,49
		Din.	44,95	47,83	50,65	48,77	52,65
	45ms	Est.	45,35	47,46	50,45	48,53	53,61
		Din.	44,85	47,85	52,61	48,92	63,21
		Est.	44,70	47,72	51,35	48,56	53,06
		Din.	44,79	47,91	50,87	48,67	60,42
	60ms	Est.	45,86	47,76	50,81	48,49	51,69
		Din.					
		Est.					
		Din.					

Tabela 4 – 50cm

Continua na próxima página.	
-----------------------------	--

		Din.	45,27	47,85	50,74	48,94	52,55
		Est.	45,68	47,89	51,54	48,61	53,26
		Din.	44,78	47,63	51,29	48,73	51,33
Média Limpa [cm]	30ms	Est.	44,80	47,77	50,86	48,39	53,25
		Din.	44,57	47,87	50,13	48,59	53,65
		Est.	45,21	47,91	50,86	48,35	52,49
		Din.	44,95	47,83	50,65	48,77	52,65
	45ms	Est.	45,35	47,46	50,45	48,53	53,61
		Din.	44,85	47,85	52,61	48,92	63,21
		Est.	44,70	47,72	51,35	48,56	53,06
		Din.	44,79	47,91	50,87	48,67	60,42
	60ms	Est.	45,86	47,76	50,81	48,49	51,69
		Din.	45,27	47,85	50,74	48,94	52,55
		Est.	45,68	47,89	51,54	48,61	53,26
		Din.	44,78	47,63	51,29	48,73	51,33
Desvio Padrão [cm]	30ms	Est.	0,65	0,42	0,74	0,50	11,99
		Din.	0,56	0,33	1,48	0,53	12,93
		Est.	2,96	0,29	0,74	0,48	11,24
		Din.	1,00	0,37	1,17	0,49	11,11
	45ms	Est.	3,38	0,50	0,97	0,51	13,46
		Din.	0,63	0,36	1,16	0,54	28,66
		Est.	0,76	0,45	0,81	0,50	12,03
		Din.	0,53	0,28	0,70	0,51	26,26
	60ms	Est.	7,40	0,43	0,87	0,50	7,44
		Din.	2,98	0,35	0,81	0,48	8,89
		Est.	6,25	0,31	0,81	0,50	11,92
		Din.	0,53	0,48	1,30	0,49	5,41
<avg - 15	30ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
	45ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
	60ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 4 – 50cm

Continua na próxima página.

		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
>avg + 15	30ms	Est.	0%	0%	0%	0%	4,00%
		Din.	0%	0%	0%	0%	5,33%
		Est.	0,67%	0%	0%	0%	2,67%
		Din.	0%	0%	0%	0%	2,67%
	45ms	Est.	0,67%	0%	0%	0%	4,00%
		Din.	0%	0%	0%	0%	16,00%
		Est.	0%	0%	0%	0%	3,33%
		Din.	0%	0%	0%	0%	12,67%
	60ms	Est.	1,33%	0%	0%	0%	1,33%
		Din.	0,67%	0%	0%	0%	2,67%
		Est.	1,33%	0%	0%	0%	4,67%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0,67%
= 400	30ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
	45ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
	60ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%

5.1.2.3 Teste 100cm

Neste teste, não houve diferença significativa dos resultados obtidos anteriormente, houve apenas uma leitura destoante de mais do que 15cm da média limpa: 116cm.

Tabela 5 – 100cm

Medida	Intervalo	Leitura	Sensor 0	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
Média [cm]	30ms	Est.	102,49	106,83	96,83	92,05	94,19
		Din.	102,71	107,05	97,07	92,46	94,74
		Est.	102,41	106,85	96,83	92,21	94,49
		Din.	102,46	106,91	97,19	92,54	94,54
	45ms	Est.	102,78	106,86	96,96	92,05	94,29
		Din.	102,31	106,82	97,10	92,37	94,49
		Est.	102,41	106,89	97,07	92,20	94,27
		Din.	102,37	106,83	97,07	92,23	94,20
	60ms	Est.	102,63	106,96	97,46	92,14	94,24
		Din.	102,34	106,81	97,23	92,46	94,53
		Est.	102,59	106,90	97,07	92,43	94,60
		Din.	102,07	106,77	97,18	92,51	94,65
Média Limpa [cm]	30ms	Est.	102,49	106,83	96,83	92,05	94,19
		Din.	102,71	107,05	97,07	92,46	94,74
		Est.	102,41	106,85	96,83	92,21	94,49
		Din.	102,46	106,91	97,19	92,54	94,54
	45ms	Est.	102,78	106,86	96,96	92,05	94,29
		Din.	102,31	106,82	97,10	92,37	94,49
		Est.	102,41	106,89	97,07	92,20	94,27
		Din.	102,37	106,83	97,07	92,23	94,20
	60ms	Est.	102,63	106,96	97,46	92,14	94,24
		Din.	102,34	106,81	97,23	92,46	94,53
		Est.	102,59	106,90	97,07	92,43	94,60
		Din.	102,07	106,77	97,18	92,51	94,65
Desvio Padrão [cm]	30ms	Est.	0,66	0,39	0,78	0,24	1,02
		Din.	0,99	0,44	0,73	0,53	1,12
		Est.	0,66	0,38	0,77	0,41	1,01
		Din.	0,66	0,29	0,75	0,57	0,98
	45ms	Est.	0,83	0,35	0,72	0,33	1,01
		Din.	0,60	0,39	0,78	0,56	0,99
		Est.	0,66	0,31	0,77	0,42	0,83
		Din.	0,66	0,40	0,81	0,44	0,62

Tabela 5 – 100cm

Continua na próxima página.

	60ms	Est.	0,69	0,33	2,52	0,37	1,07
		Din.	0,61	0,39	0,76	0,54	0,95
		Est.	0,73	0,34	0,72	0,50	1,22
		Din.	0,53	0,42	0,71	0,58	0,99
<avg - 15	30ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
	45ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
	60ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
>avg + 15	30ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
	45ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
	60ms	Est.	0%	0%	0,67%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
= 400	30ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
	45ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 5 – 100cm

Continua na próxima página.

		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
	60ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%

5.1.2.4 Teste 150cm

Pela primeira vez surgiram leituras em que algum sonar não encontrou obstáculos, todas ocorreram no sensor da extremidade direita, no entanto, não houve distinção notória de incidência deste fenômeno dos intervalos de medições fixos em relação aos variáveis, de modo que, para a discussão em pauta, essas medidas não agregam valor significativo. Tal qual ocorreu no teste de 100cm, as leituras de intervalo dinâmico apresentaram um desempenho levemente superior em relação a medidas destoantes.

Tabela 6 – 150cm

Medida	Intervalo	Leitura	Sensor 0	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
Média [cm]	30ms	Est.	148,52	152,17	152,97	156,65	230,77
		Din.	148,70	153,18	153,45	156,41	174,46
		Est.	148,97	153,53	153,65	156,53	196,81
		Din.	149,05	153,01	153,63	156,95	176,01
	45ms	Est.	149,13	153,13	153,95	156,42	184,03
		Din.	148,62	153,01	153,10	156,97	226,32
		Est.	148,63	151,45	153,23	157,11	210,04
		Din.	148,90	153,04	154,24	157,13	192,36
	60ms	Est.	148,84	153,09	153,42	156,79	256,77
		Din.	148,53	152,96	153,33	157,28	161,61
		Est.	148,49	152,95	153,03	156,81	164,53
		Din.	148,45	152,57	152,18	156,33	229,58
Média Limpa [cm]	30ms	Est.	148,52	152,17	152,97	156,65	158,25
		Din.	148,70	153,18	153,45	156,41	158,35
		Est.	148,97	153,53	153,65	156,53	158,10
		Din.	149,05	153,01	153,63	156,95	158,28
	45ms	Est.	149,13	153,13	153,95	156,42	158,25
		Din.	148,62	153,01	153,10	156,97	158,78

Tabela 6 – 150cm

Continua na próxima página.

Desvio Padrão [cm]		Est.	148,63	151,45	153,23	157,11	158,53
		Din.	148,90	153,04	154,24	157,13	158,56
	60ms	Est.	148,84	153,09	153,42	156,79	158,60
		Din.	148,53	152,96	153,33	157,28	158,39
		Est.	148,49	152,95	153,03	156,81	158,08
		Est.	0,60	7,48	6,44	0,76	111,16
	30ms	Din.	0,63	0,39	0,64	0,88	60,49
		Est.	0,52	0,50	0,65	0,68	88,98
		Din.	0,47	0,08	0,61	0,68	63,23
	45ms	Est.	0,42	0,33	0,73	0,74	74,88
		Din.	0,63	0,23	0,86	0,82	108,67
		Est.	0,61	9,46	0,89	0,64	99,26
		Din.	0,47	0,30	6,01	0,72	84,06
	60ms	Est.	0,57	0,28	0,63	0,57	118,98
		Din.	0,62	0,20	0,62	0,65	27,81
		Est.	0,54	0,21	0,68	0,61	39,11
		Din.	0,59	4,90	5,68	0,89	110,18
<avg - 15	30ms	Est.	0%	1,33%	0,67%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
	45ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	2,67%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
	60ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0,67%	1,33%	0%	0%
>avg + 15	30ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
	45ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%

Tabela 6 – 150cm

Continua na próxima página.

	60ms	Din.	0%	0%	0,67%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
= 400	30ms	Est.	0%	0%	0%	0%	30,00%
		Din.	0%	0%	0%	0%	6,67%
		Est.	0%	0%	0%	0%	16,00%
		Din.	0%	0%	0%	0%	7,33%
	45ms	Est.	0%	0%	0%	0%	10,67%
		Din.	0%	0%	0%	0%	28,00%
		Est.	0%	0%	0%	0%	21,33%
		Din.	0%	0%	0%	0%	14,00%
	60ms	Est.	0%	0%	0%	0%	40,67%
		Din.	0%	0%	0%	0%	1,33%
		Est.	0%	0%	0%	0%	2,67%
		Din.	0%	0%	0%	0%	29,33%

5.1.2.5 Teste 200cm

No teste em que o carrinho estava a 200 cm das paredes, foram registradas no sensor frontal, em sua grande maioria, medidas em dois intervalos estreitos: entre 185cm e 195cm, e de 265cm a 275cm, o que fez com que as medidas de desvio padrão fossem bem altas, chegando a mais de 40cm. No entanto, é interessante notar que o segundo intervalo é aproximadamente o primeiro multiplicado pela raiz quadrada de dois, logo, é possível que as medidas obtidas no segundo intervalo sejam dos pacotes de ondas acústicas emitidas pelo sonar frontal, enquanto as do primeiro intervalo seriam decorrência de *crosstalk*. De qualquer forma, neste teste, no que se refere ao sensor frontal, não é possível extrair grandes informações no que concerne a qual tipo de medição é melhor, logo, ele será desconsiderado na análise a seguir.

No sensor da extremidade esquerda, denominado Sensor 0 na Tabela 7, houve diversas medidas em que não foi detectado o obstáculo, no entanto, não houve discrepância considerável na ocorrência deste fenômeno dentre os dois tipos de intervalos de medição.

De um modo geral, a partir dos dados coletados neste teste, nota-se que não há deterioração das medidas obtidas dos sonares quando utiliza-se intervalos dinâmicos que, no caso deste, durariam em média menos do que 15ms por leitura, o que possibilitaria pelo menos o dobro de medidas para um mesmo período.

Tabela 7 – 200cm

Medida	Intervalo	Leitura	Sensor 0	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
Média [cm]	30ms	Est.	197,58	189,40	192,26	182,45	182,72
		Din.	209,51	189,56	213,76	182,13	182,67
		Est.	216,61	189,42	206,54	182,01	182,48
		Din.	191,33	189,25	202,63	182,43	182,72
	45ms	Est.	196,53	189,63	220,25	182,33	182,75
		Din.	239,21	189,51	208,81	182,87	183,20
		Est.	201,98	189,55	209,55	182,76	183,12
		Din.	242,49	188,22	192,27	182,97	183,50
	60ms 30ms	Est.	199,45	189,49	189,49	182,46	186,07
		Din.	197,21	189,61	212,97	182,71	183,24
		Est.	237,66	189,77	196,97	182,60	182,85
		Est.	194,84	189,40	192,26	182,45	182,72
		Din.	200,18	189,56	211,24	182,13	182,67
		Est.	194,72	189,42	206,54	182,01	182,48
		Din.	191,33	189,25	202,63	182,43	182,72
Média Limpa [cm]	45ms	Est.	196,53	189,63	220,25	182,33	182,75
		Din.	197,32	189,51	208,81	182,87	183,20
		Est.	193,73	189,55	209,55	182,76	183,12
		Din.	198,06	188,22	192,27	182,97	183,50
	60ms	Est.	191,09	189,49	189,49	182,46	183,18
		Din.	191,65	189,61	212,97	182,71	183,24
		Est.	190,08	189,77	196,97	182,60	182,85
		Din.	189,75	188,77	192,45	182,79	182,97
Desvio Padrão [cm]	30ms	Est.	25,47	0,51	16,06	0,56	0,72
		Din.	43,75	0,50	42,00	0,65	0,71
		Est.	64,48	0,51	32,18	0,74	0,66
		Din.	5,85	0,43	28,28	0,82	0,77
	45ms	Est.	10,08	0,49	39,51	0,48	0,69
		Din.	82,97	0,53	34,85	0,75	0,93
		Est.	41,49	0,53	33,54	0,65	0,90
		Din.	84,75	9,48	14,72	0,79	1,24
	60ms	Est.	41,69	0,53	6,76	0,54	24,97
		Din.	33,94	0,50	35,49	0,64	1,14

Tabela 7 – 200cm

Continua na próxima página.

		Est.	88,21	0,42	22,80	0,67	0,83
		Din.	41,38	7,62	13,07	0,70	0,90
<avg - 15	30ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	71,33%	0%	0%
		Est.	0%	0%	54,00%	0%	0%
		Din.	0%	0%	1,33%	0%	0%
	45ms	Est.	0%	0%	62,00%	0%	0%
		Din.	0%	0%	73,33%	0%	0%
		Est.	0%	0%	75,33%	0%	0%
		Din.	0%	2,67%	0%	0%	0%
	60ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	72,00%	0%	0%
		Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	2,00%	0%	0%	0%
>avg + 15	30ms	Est.	18,67%	0%	4,00%	0%	0%
		Din.	0,67%	0%	26,67%	0%	0%
		Est.	16,00%	0%	20,00%	0%	0%
		Din.	4,67%	0%	14,67%	0%	0%
	45ms	Est.	25,33%	0%	38,00%	0%	0%
		Din.	11,33%	0%	24,00%	0%	0%
		Est.	10,00%	0%	22,67%	0%	0%
		Din.	15,33%	0%	3,33%	0%	0%
	60ms	Est.	6,00%	0%	0,67%	0%	0%
		Din.	2,67%	0%	27,33%	0%	0%
		Est.	0%	0%	8,67%	0%	0%
		Din.	0%	0%	2,67%	0%	0%
= 400	30ms	Est.	1,33%	0%	0%	0%	0%
		Din.	4,67%	0%	1,33%	0%	0%
		Est.	10,67%	0%	0%	0%	0%
		Din.	0%	0%	0%	0%	0%
	45ms	Est.	0%	0%	0%	0%	0%
		Din.	20,67%	0%	0%	0%	0%
		Est.	4,00%	0%	0%	0%	0%
		Din.	22,00%	0%	0%	0%	0%
	60ms	Est.	4,00%	0%	0%	0%	1,33%
		Din.	2,67%	0%	0%	0%	0%

Tabela 7 – 200cm

Continua na próxima página.

		Est.	22,67%	0%	0%	0%	0%
		Din.	4,00%	0%	0%	0%	0%

5.2 Testes de Integração

5.2.1 Interferência dos BLDC nos Sonares

Notou-se que em determinadas condições o robô ia de encontro ao obstáculo ao invés de efetuar o desvio. Após serem analisados os dados dos sensores nessas circunstâncias, observou-se a existência de ruídos nos sensores, que causavam a adoção destes comportamentos errados.

Ao perceber o problema, novos testes foram engendrados a fim de descobrir a natureza da falha. As hipóteses concebidas eram as seguintes: *crosstalk*, curto circuito entre pinos do Arduino, falha na lógica do *software* ou interferência dos motores nos sensores.

Para eliminar a possibilidade de que uma das portas da placa de prototipação estivesse interferindo na outra de alguma maneira, a ligação dos sensores ultrassônicos no Arduino foram mudadas mas o problema se manteve. O mesmo foi feito no *software*, i.e. foi alterada a disposição dos sensores ultrassônicos no código. Especificamente falando, foram trocados os parâmetros que correlacionam a ligação física do pino de *echo* dos dispositivos a sua variável correspondente na matriz de estruturas do tipo *sensor_t*, denominada no programa por USS, e, mais uma vez, o defeito persistiu. Adicionalmente a essa modificação no *software*, foram feitas medições com os motores desligados, nas quais a falha em questão não ocorreu, evidenciando que a natureza do problema não era do código e nem os pinos da placa de prototipação.

O teste seguinte consistiu em desacoplar os sensores ultrassônicos da carcaça do veículo apontando-os para um lugar livre de obstáculos e ligar os motores com os sonares sendo segurados na mão. No resultado, observou-se a desapareição total das leituras espúrias, confirmando a hipótese de que os BLDC causavam de alguma maneira a distorção na percepção do robô. Em vista disso, supôs-se que a natureza da interferência seria em razão da proximidade entre os dispositivos, como interferência eletromagnética nos pinos de *echo* dos sonares ou então de ondas acústica na banda de operação dos sensores, e optou-se por erguer os sensores a uma altura na qual não houvesse interferência suficiente a ponto de provocar erros de medição.

Em seguida foram feitas modificações na estrutura do veículo para distanciar os sonares dos motores: foram fixadas três hastes metálicas de 30 centímetros na carcaça do veículo, nestas foram fixados suportes nos quais foi parafusado o para-choque do veículo, onde estavam colados com cola epóxi os 5 sensores ultrassônicos. Além disso, as ligações

dos sonares entre si e com o Arduino foram refeitas, soldando de fato os fios ao invés de serem utilizados *jumpers* como outrora, com o intuito de reduzir ao máximo qualquer tipo de ruído causado por mal contato.

Após isso, foi engendrado um novo teste a fim de constatar se com a nova disposição o problema havia sido sanado: cada uma das combinações de velocidades dos motores foi mantida por dez segundos enquanto os sonares faziam as medições. Os dados obtidos, vide Tabela 8, apontaram que o problema persistia, apresentando inclusive detecções espúrias de obstáculos a mais do que 400cm, distância que se encontra além do alcance dos sonares.

Tabela 8 – Teste com os Sonares Acoplados ao Veículo

Motores	Medida	Sensor 0	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
STP	Média	400	400	400	398	400
	<400	0,23%	0%	0%	0,70%	0%
	>400	0%	0%	0%	0%	0%
E_L	Média	163	222	400	90	232
	<400	91,58%	66,34%	0%	98,51%	71,29%
	>400	3,47%	0%	0%	0%	4,46%
E_M	Média	143	196	400	90	209
	<400	98,48%	77,78%	0%	100%	83,33%
	>400	1,01%	0%	0%	0%	4,55%
E_F	Média	176	198	400	91	250
	<400	93,43%	77,27%	0%	100%	61,62%
	>400	2,02%	0%	0%	0%	2,53%
D_L	Média	174	229	400	84	238
	<400	89,95%	62,81%	0%	100%	66,33%
	>400	2,51%	0%	0%	0%	4,02%
D_M	Média	180	332	400	99	369
	<400	94,95%	27,27%	0%	100%	21,21%
	>400	1,52%	0%	0%	0%	3,03%
D_F	Média	292	386	400	132	380
	<400	50,25%	6,03%	0%	99,50%	14,57%
	>400	5,53%	0%	0%	0,50%	2,01%
FS	Média	192	232	400	90	253
	<400	77,89%	60,80%	0%	99,50%	57,29%
	>400	0,50%	0%	0%	0,50%	0,50%
Fre	Média	181	252	400	86	274
	<400	81,82%	53,03%	0%	100%	56,06%
	>400	2,02%	0%	0%	0%	2,53%
TOTAL	Média	233	287	400	160	302
	Desvio Padrão	132	134	0	128	128
	<400	66,80%	42,45%	0%	78,62%	42,50%
	>400	1,83%	0%	0%	0,10%	2,33%

Enquanto era realizado o teste, notou-se que os fios oscilavam em decorrência da vibração dos motores, o que levou a cogitar a hipótese de que essa seria de fato a natureza

da interferência entre os sensores ultrassônicos e os motores, i.e. as vibrações mecânicas dos BLDC ressoavam nos fios provocando alguma espécie de mal contato, seja pela solda mal feita ou fios partidos. Diante desse cenário, foi realizado um novo teste nas mesmas condições em que desparafusou-se o para-choque no qual os sensores estão fixos, das hastes metálicas e foram colhidos dados com ele apoiado no chão. Nestas circunstâncias houve redução considerável do ruído que, de um modo geral, se restringiu a um único sonar, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 – Teste com os Sonares Apoiados no Chão

Motores	Medida	Sensor 0	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
STP	Média	400	373	400	400	400
	<400	0%	11,09%	0%	0%	0%
	>400	0%	0%	0%	0%	0%
E_L	Média	400	141	400	400	400
	<400	0%	89,55%	0%	0%	0%
	>400	0%	0%	0%	0%	0%
E_M	Média	400	121	400	400	400
	<400	0%	96,97%	0%	0%	0%
	>400	0%	0%	0%	0%	0%
E_F	Média	400	116	400	400	400
	<400	0%	98,48%	0%	0%	0%
	>400	0%	0%	0%	0%	0%
D_L	Média	400	207	400	400	400
	<400	0%	67,84%	0%	0%	0%
	>400	0%	0%	0%	0%	0%
D_M	Média	400	148	400	400	400
	<400	0%	87,94%	0%	0%	0%
	>400	0%	0%	0%	0%	0%
D_F	Média	400	242	400	400	400
	<400	0%	56,57%	0%	0%	0%
	>400	0%	0%	0%	0%	0%
FS	Média	400	218	400	400	400
	<400	0%	64,65%	0%	0%	0%
	>400	0%	0%	0%	0%	0%
Fre	Média	400	123	400	400	400
	<400	0%	96,48%	0%	0%	0%
	>400	0%	0%	0%	0%	0%
TOTAL	Média	400	210	400	400	400
	Desvio Padrão	0	135	0	0	0
	<400	0%	66,83%	0%	0%	0%
	>400	0%	0%	0%	0%	0%

6 CONCLUSÃO

Com o processamento dos dados lidos pelos sonares, foi possível reduzir os efeitos de falsas detecções de obstáculos. Quanto à decisão entre optar por intervalos estáticos ou dinâmicos de medição, foi comprovado que há de fato menor confiabilidade nas medidas obtidas utilizando-se intervalos dinâmicos no que concerne a obstáculos mais próximos ao veículo enquanto que, para obstáculos mais longínquos, a diferença não é tão notória. De forma que a diminuição no tempo de resposta dos sonares acaba sendo maior do que o aumento da incidência de erros de leitura, o que faz com que seja melhor se sujeitar a obtenção de dados menos confiáveis porém mais atualizados, pois é possível tratar esses eventuais erros utilizando métodos estatísticos como a teoria Dempster-Shafer, conforme foi feito em [Zou et al. \(2000\)](#), ou inferência Bayesiana, conforme [Budiharto, Purwanto e Jazidie \(2011\)](#).

No entanto, o problema da interferência dos motores nos sonares ainda não foi resolvido e constitui um contratempo grave ao bom funcionamento do veículo e que, portanto, precisa ser resolvido para poder dar prosseguimento ao projeto. É preciso reduzir o impacto das vibrações mecânicas dos BLDC no circuito que liga a placa de prototipação aos sonares. Uma abordagem que poderia mitigar o fenômeno seria fazer uma placa de circuito impresso, na qual os sonares seriam soldados diretamente, eliminando totalmente a utilização de fios para fazer contato entre os dispositivos.

Quanto ao subsistema de comunicação, por se tratar de um módulo de baixo consumo de potência, há uma limitação no alcance do dispositivo. No entanto, apesar de perceptível, essa restrição não constituiu um problema nos testes feitos no veículo, que manteve a comunicação funcionando mesmo em distâncias de aproximadamente 10 metros as custas de um aumento na perda de pacotes.

O subsistema de navegação ainda tem muito o que melhorar pois, como há uma gama de apenas 8 possíveis medidas de evasão, a resposta do veículo é pouco adaptável ao ambiente externo, de modo que muitas vezes o comportamento adotado é muito suave, causando colisões, ou muito brusco, causando desvios de rota desnecessários. Utilizando-se estratégias de desvio de obstáculos em que a rotação dos motores é obtida por meio de um controlador PID, ou Virtual Force Field Method, conforme [Borenstein e Koren \(1989\)](#).

REFERÊNCIAS

ARDUINO. 2016. Disponível em: <<https://github.com/arduino/Arduino>>. Acesso em: 05/10/2016.

_____. 2016. Disponível em: <<http://www.arduino.org/products/boards/arduino-uno>>. Acesso em: 07/10/2016.

ATMEL CORPORATION. **ATMEL 8-BIT MICROCONTROLLER WITH 4/8/16/32KBYTES IN-SYSTEM PROGRAMMABLE FLASH - DATASHEET**. [S.l.], 2015. Disponível em: <http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Complete.pdf>. Acesso em: 05/10/2016.

AXEL, L.; SHIMAKAWA, B. A.; MACFALL, J. A time-of-flight method of measuring flow velocity by magnetic resonance imaging. **Magnetic resonance imaging**, Elsevier, v. 4, n. 3, p. 199–205, 1986.

BALANIS, C. A. **Antenna theory: analysis and design**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2016.

BARONTI, F.; FANTECHI, G.; LEONARDI, E.; RONCELLA, R.; SALETTI, R. Hierarchical platform for monitoring, managing and charge balancing of lipo batteries. In: IEEE. **2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference**. [S.l.], 2011. p. 1–6.

BORENSTEIN, J.; KOREN, Y. Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots. **IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics**, IEEE, v. 19, n. 5, p. 1179–1187, 1989.

_____. Error eliminating rapid ultrasonic firing for mobile robot obstacle avoidance. **IEEE Transactions on Robotics and automation**, IEEE, v. 11, n. 1, p. 132–138, 1995.

BROOKS, R. A. Intelligence without representation. **Artificial intelligence**, Elsevier, v. 47, n. 1, p. 139–159, 1991.

BROWN, W. **AN857 - Brushless DC Motor Control Made Easy**. 2002. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00857B.pdf>>. Acesso em: 12/10/2016.

_____. **Analog Pulse Width Modulation**. 2013. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ug/slau508/slau508.pdf>>. Acesso em: 03/04/2017.

BUDIHARTO, W.; PURWANTO, D.; JAZIDIE, A. A robust obstacle avoidance for service robot using bayesian approach. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 8, n. 1, p. 5, 2011.

COTTER, R. J. Time-of-flight mass spectrometry. In: **Time-of-Flight Mass Spectrometry**. [S.l.: s.n.], 1994.

CYPRESS SEMICONDUCTOR CORPORATION. **AN91445 - Antenna Design and RF Layout Guidelines**. [S.l.], 2016. Rev. D. Disponível em: <<http://www.cypress.com/documentation/application-notes/an91445-antenna-design-and-rf-layout-guidelines>>. Acesso em: 07/10/2016.

DILLINGHAM, G. L. **Unmanned Aircraft Systems: Federal Actions Needed to Ensure Safety and Expand Their Potential Uses Within the National Airspace System**. [S.l.]: DIANE Publishing, 2008.

DONGYUE, Q.; YUANHANG, H.; YUTING, Z. The investigation of the obstacle avoidance for mobile robot based on the multi sensor information fusion technology. **Int. J. Mat. Mech. Manuf**, v. 1, p. 366–370, 2013.

ELECFREAKS. 2016. Disponível em: <<http://www.micropik.com/PDF/HCSR04.pdf>>. Acesso em: 18/10/2016.

EVERETT, H. **Sensors for mobile robots: theory and application**. [S.l.]: AK Peters, Ltd., 1995.

GAGEIK, N.; MÜLLER, T.; MONTENEGRO, S. Obstacle detection and collision avoidance using ultrasonic distance sensors for an autonomous quadrocopter. **University Of Würzburg, Aerospace Information Technology (Germany), Würzburg September**, 2012.

GHI ELETRONICS. 2017. Disponível em: <<https://www.ghielectronics.com/community/codeshare/entry/848>>. Acesso em: 26/06/2017.

HAYASHI, K.; YOSHINO, K.; INUISHI, Y. Carrier mobilities in insulating polymers measured by time of flight method. **Japanese Journal of Applied Physics**, IOP Publishing, v. 14, n. 1, p. 39, 1975.

JONES, J. L.; FLYNN, A. M. **Mobile robots: inspiration to implementation**. [S.l.]: AK Peters, Ltd., 1993.

MANIACBUG. 2016. Disponível em: <<https://github.com/kmark/Captain/tree/master/CaptainShip/PWM>>. Acesso em: 17/10/2016.

_____. 2016. Disponível em: <<https://github.com/maniacbug/RF24>>. Acesso em: 16/10/2016.

_____. 2016. Disponível em: <<https://github.com/maniacbug/RF24>>. Acesso em: 19/10/2016.

MURPHY, R. **Introduction to AI robotics**. [S.l.]: MIT press, 2000.

PETERSON, W. W.; BROWN, D. T. Cyclic codes for error detection. **Proceedings of the IRE**, v. 49, n. 1, p. 228–235, 1961.

PIRES, R.; RODRIGUES, D.; BRANCO, K.; JR, O. T. Mosa-mission oriented sensor array: A proposal. In: **Proceedings of the XXXVII Conferencia Latinoamericana de Informática–CLEI**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1309–1318.

POZAR, D. M. **Microwave engineering**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.

PROLIFIC TECHNOLOGY INC. **PL-2303 Edition USB to Serial Bridge Controller Product Datasheet**. [S.l.], 2005. Rev. 1.6. Disponível em: <<http://www.electronicaestudio.com/docs/PL2303.pdf>>. Acesso em: 07/10/2016.

ROMERO, R. A. F.; PRESTES, E.; OSÓRIO, F.; WOLF, D. **Robótica Móvel**. [S.l.]: SÃO PAULO: LTC, 2014.

SEMICONDUCTOR, N. nrf24l01+ single chip 2.4 ghz transceiver product specification v1. 0. **nRF24L01+ datasheet**, 2008. Disponível em: <<http://www.nordicsemi.com/eng/Products/2.4GHz-RF/nRF24L01>>. Acesso em: 05/10/2016.

SHOVAL, S.; BORENSTEIN, J. Using coded signals to benefit from ultrasonic sensor crosstalk in mobile robot obstacle avoidance. In: IEEE. **Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on**. [S.l.], 2001. v. 3, p. 2879–2884.

SIEGWART, R.; NOURBAKHSH, I. R.; SCARAMUZZA, D. **Introduction to autonomous mobile robots**. [S.l.]: MIT press, 2011.

SILBERSCHATZ, A.; GALVIN, P. B.; GAGNE, G.; SILBERSCHATZ, A. **Operating system concepts**. [S.l.]: Addison-Wesley Reading, 1998. v. 4.

STIGGE, M.; PLÖTZ, H.; MÜLLER, W.; REDLICH, J.-P. Reversing crc—theory and practice. Citeseer, 2006.

STOREY, N. R. **Safety critical computer systems**. [S.l.]: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1996.

TEAM, M. **A Guide to Understanding Battery Specifications**. [S.l.]: December, 2008.

YEDAMALE, P. **AN885 - Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals**. 2003. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>>. Acesso em: 12/10/2016.

ZOU, Y.; HO, Y. K.; CHUA, C. S.; ZHOU, X. W. Multi-ultrasonic sensor fusion for autonomous mobile robots. **Sensor fusion: Architectures, algorithms, and applications IV**, p. 314–321, 2000.

7 APÊNDICES

7.1 Sistemas de Tempo Real

São sistemas computacionais que dependem não somente da correção dos dados computados, mas que sejam obtidos dentro de um intervalo de tempo pré determinado, que pode ser maior ou menor de acordo com a aplicação. Na literatura, este período em que se espera que a resposta do sistema se dê é denominado *deadline*. Sistemas de tempo real podem ser classificados em dois tipos: *soft* ou *hard*.

Sistemas *soft* são menos restritivos, tolerando eventuais perdas de *deadline*; ao contrário dos sistemas *hard*, em que estas perdas não são aceitáveis.

Algumas características típicas, apesar de não obrigatórias, de sistemas de tempo real são limitações com relação ao tamanho, propósito específico e baixo custo (SILBERS-CHATZ et al., 1998).

7.2 CRC

Método de detecção de erros aleatórios, isto é, de dados corrompidos ao longo do processo de transmissão ou armazenamento da informação por exemplo por ruídos, mas não por um agente ‘inteligente’ externo que modifique os dados transmitidos, tal qual um *malware* (STIGGE et al., 2006).

Consiste essencialmente em uma divisão polinomial (STIGGE et al., 2006), logo, pode ser implementado em *hardware*, utilizando-se apenas registradores de deslocamento com conexões realimentadas (PETERSON; BROWN, 1961), assim como em *software*. Em suma, trata-se de acrescentar à mensagem digital original um sufixo, que tem seu valor definido por operações realizadas em função da mensagem binária que se intenta enviar e de um polinômio gerador. Para o *transceiver* nRF24L01+, dois polinômios geradores são utilizados: Eq. 7.1 quando o dado cíclico adicionado é de 1 *byte*, e Eq. 7.2, para 2 *bytes* (SEMICONDUCTOR, 2008).

Para uma descrição completa de como é implementado este método, vide Stigge et al. (2006), Peterson e Brown (1961).

$$G(X) = X^8 + X^2 + X + 1 \quad (7.1)$$

$$G(X) = X^{16} + X^{12} + X^5 + 1 \quad (7.2)$$

7.3 PWM

A modulação por largura de pulso é uma técnica de modulação que consiste em amostrar e codificar o sinal correspondente à mensagem na largura de um trem de pulsos de amplitude fixa, i.e. cada amostra da mensagem é convertida em um pulso retangular cuja duração expressa a amplitude do sinal modulante.

Um modulador PWM pode ser implementado utilizando-se um circuito comparador não inversor cuja entrada inversora liga-se à saída de um gerador de ondas tipo dente de serra (*trailing edge modulation*), dente de serra invertida (*leading edge modulation* ou triangular (*modulation on both edges*) e na entrada não inversora, o sinal modulante. Desta forma, quando a tensão da mensagem excede a amplitude da onda gerada, observa-se um sinal alto na saída, caso contrário, baixo, conforme ilustra a Fig. 6.

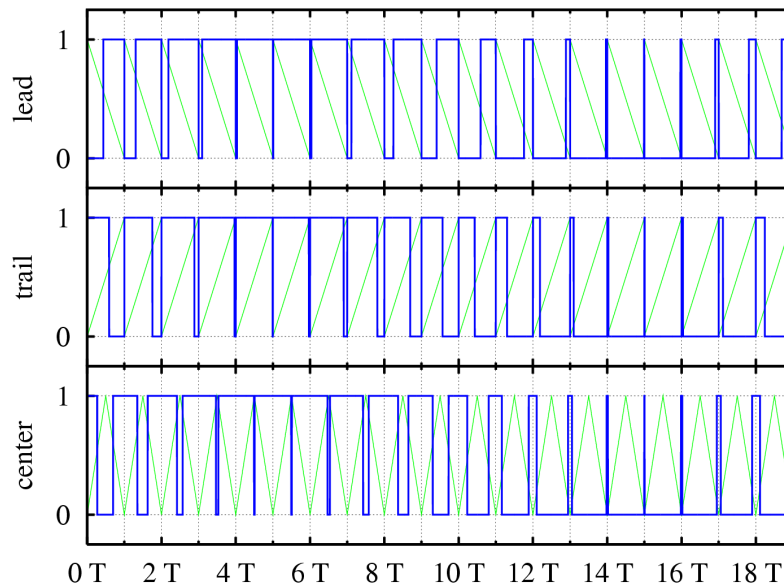


Figura 6 – Três tipos de modulação PWM: *trailing edge*, *leading edge* e *both edges*, de cima pra baixo, respectivamente.

para uma descrição detalhada do circuito e simulações vide [Brown \(2013\)](#)