

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

Vinicius Mateus Maurer Melara

ASSISTENTE ULTRASSÔNICO PARA DEFICIENTES
VISUAIS

Passo Fundo

2019

Vinicius Mateus Maurer Melara

ASSISTENTE ULTRASSÔNICO PARA DEFICIENTES VISUAIS

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Dr. Carlos Alberto Ramirez Behaine.

Passo Fundo

2019

Vinicius Mateus Maurer Melara

Assistente Ultrassônico para Deficientes Visuais

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura, da Universidade de Passo Fundo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista, sob orientação do professor Dr. Carlos Alberto Ramirez Behaine.

Aprovado em ____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Alberto Ramirez Behaine – UPF

Prof. Dr. Fernando Passold – UPF

Prof. Dr. Mikhail Polonskii – UPF

RESUMO

Deficientes visuais formam uma grande parcela da população mundial e em resposta a isso, diversos pesquisadores vêm desenvolvendo tecnologias de auxílio a essas pessoas. Desde o surgimento da eletrônica, equipamentos de diversos níveis de complexidade se tornaram itens fundamentais no cotidiano desse grupo. O protótipo foi criado com o intuito de detectar objetos através de sensores ultrassônicos, similarmente ao que se faz em robótica móvel, e alertar o usuário sobre a presença de um obstáculo através de micromotores de vibração, não comprometendo a audição, como é comum de ver em outros trabalhos, sabendo que esse sentido é muito importante aos deficientes visuais nas suas locomoções. A lógica de funcionamento remete aos sensores de estacionamento presentes em veículos, que se baseiam na relação entre a distância do obstáculo e a intensidade do alerta que é percebido pelo usuário, ou seja, a intensidade de vibração dos motores é inversamente proporcional à distância do obstáculo. Para melhor usabilidade e praticidade, ele foi feito para ser “vestido” na cabeça e sua estrutura pode ser acoplada a um acessório, como um chapéu, por exemplo, deixando assim, livres as mãos para usufruir de outros métodos de percepção de obstáculos. Para controlar os periféricos, foram utilizados dois microcontroladores, que são responsáveis por tratar os sinais relacionados aos sensores e controlar os micromotores de vibração. Nos testes realizados, foi possível notar que o dispositivo, apesar de ser de baixo custo, é bastante eficiente em ambientes abertos, onde não existe eco. Em locais mais fechados, pode-se ter algumas más interpretações. O protótipo, desde o início do desenvolvimento, foi pensado para detectar obstáculos à altura da cabeça, mas, devido ao ângulo de detecção dos sensores, o mesmo é capaz de detectar objetos mais baixos, apesar de não ser tão eficiente nessas situações.

Palavras-Chave: deficiente visual, sensor ultrassônico, micromotores de vibração, microcontrolador.

ABSTRACT

Visually impaired people make up a large part of the world's population and in response to this, several researchers have been developing technologies to aid them. Since the emergence of electronics, equipment of various levels of complexity have become fundamental items in the daily lives of such people. The prototype created aims to detect objects through ultrasonic sensors, similarly to what is done in mobile robotics, and alert the user to the presence of an obstacle through vibration motors, not compromising the hearing, which is quite usual to see in other projects, as it is a very important sense to the blind people's commute. The operating logic refers to the parking sensors present in vehicles, which are based on the relationship between the distance of the obstacle and the intensity of the alert that is noticed by the user, it means that the vibration amplitude is proportionally inverted to the distance of the obstacle. Aiming a better usability and practicality, it was made to be worn on the head and its structure could be attached to an accessory, such as a hat, for example, leaving the user's hands free to enjoy other methods of obstacle detection. To control the peripherals, two microcontrollers were used, which are responsible for handling the signals related to the sensors and controlling the vibration motors. During the test session, it was noticeable that the device, despite being low budget, turned out to be highly efficient in outdoor environments, where there is no echo. In indoor or more closed environments, some misread might happen. The prototype, since the beginning of its development, was thought out to detect obstacles at head height, but, as the sensors have an angle of detection, the device proved to be able to detect lower obstacles, although it is not that efficient in these situations.

Keywords: visually impaired, ultrasonic sensor, vibration motors, microcontroller.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Versão final da bengala laser	17
Figura 2 – Área de proteção da bengala laser	18
Figura 3 – Comparação entre a aplicação em robótica e em humanos	19
Fotografia 1 – Protótipo final do <i>NavBelt</i> sendo testado	20
Figura 4 – Sistema de som binaural	21
Fotografia 2 – Um dos responsáveis pelo projeto fazendo o teste do protótipo final	22
Fotografia 3 – Módulo do <i>Andha Asthra</i>	23
Fotografia 4 – Exemplo de sinalização tátil em uma calçada	25
Fotografia 5 – Display atualizável em braille	26
Fotografia 6 – Exemplo de aplicação do semáforo sonoro	28
Figura 5 – Funcionamento do sensor por triangulação	30
Figura 6 – Funcionamento do PSD	30
Figura 7 – Funcionamento do sensor por ToF	31
Figura 8 – Emissão da onda ultrassônica	32
Figura 9 – Modo de operação difuso	33
Figura 10 – Modo de operação retro reflexivo	33
Figura 11 – Modo de operação oposto	34
Figura 12 – Motores ERM cilíndricos	35
Fotografia 7 – Motor ERM moeda	36
Figura 13 – Composição motor de vibração ERM	36
Gráfico 1 – Desempenho dos motores ERM	37
Fotografia 8 – Motor de vibração LRA	38
Figura 14 – Composição motor de vibração LRA	38
Gráfico 2 – Resposta em frequência do motor LRA	39
Figura 15 – Diagrama funcional do projeto	40
Figura 16 – Ilustração dos componentes no protótipo	41
Figura 17 – Área de detecção do protótipo	42
Figura 18 – Diagrama de blocos do sistema	42
Figura 19 – HC-SR04	43
Figura 20 – Diagrama de estados do HC-SR04	44
Fotografia 9 – Teste do ângulo de medição dos sensores	45

Fotografia 10 – Teste de qualidade da medição de distância do sensor	46
Figura 21 – Captura no osciloscópio de uma das medições	48
Fotografia 11 – Módulo motor de vibração	49
Figura 22 – Motor aberto	50
Figura 23 – Diagrama de blocos do módulo frontal do protótipo	52
Figura 24 – Diagrama de pinos PIC16F628A	52
Gráfico 3 – <i>Duty cycle</i> em função da distância	53
Gráfico 4 – Registrador de <i>duty cycle</i> em função da distância	55
Figura 25 – Diagrama de blocos dos módulos laterais do protótipo	56
Figura 26 – Diagrama de pinos PIC16F886	57
Figura 27 – Fluxograma do módulo frontal	58
Figura 28 – Fluxograma dos módulos laterais	60
Gráfico 5 – Frequência em função da distância	62
Figura 29 – “Echo” 1	62
Figura 30 – “Echo” 2	63
Figura 31 – “Echo” 3	64
Figura 32 – Circuito do regulador de tensão	65
Figura 33 – PCI do regulador de tensão	65
Fotografia 12 – Componentes de fixação dos sensores	66
Fotografia 13 – Placas na estrutura	66
Fotografia 14 – Protótipo final	67
Figura 34 – Microcontroladores e regulador na estrutura	67
Figura 35 – Protótipo final 2	68
Fotografia 15 – Bateria na estrutura	68
Figura 36 – Parede em ângulo ao sensor	70
Figura 37 – Visão lateral	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados obtidos das aferições de distância

46

LISTA DE SIGLAS

[S. d.] – Sem data

[S. p.] – Sem página

Ampop – Amplificador Operacional

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CI – Circuito Integrado

cm – Centímetro

CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito

DAC – *Digital Analogic Converter* (Conversor Digital Analógico)

DC – *Duty Cycle* (Ciclo de Trabalho)

DEMUX – demultiplexador

ERM – *Eccentric Rotating Mass* (Massa Giratória Excêntrica)

ETA – *Electronic Travelling Aid* (Equipamento Eletrônico de Auxílio a Locomoção)

g/W – Eficiência de Aceleração

g – Amplitude de Vibração

GPS – *Global Positioning System* (Sistema de Posicionamento Global)

Hz – Hertz

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IR – Infravermelho

kHz – Kilohertz

LED – *Light Emitting Diode* (Diodo Emissor de Luz)

LRA – *Linear Resonant Actuator* (Atuador Ressonante Linear)

m/s – Metro por segundo

m – Metro

mA – Miliampere

mAh – Miliampere-hora

MHz – Megahertz

mm – Milímetro

ms – Milissegundo

mW – Miliwatt

OEM – Onda Eletromagnética

OMS – Organização Mundial da Saúde (WHO – *World Health Organization*)

PCI – Placa de Circuito Impresso

PSD – *Position Sensing Device* (Sensor de Posição)

PWM – *Pulse Width Modulation* (Modulação por Largura de Pulso)

RPM – Rotação por minuto

ToF – *Time of Flight* (Tempo de Voo)

V – Volt

WDT – Watchdog Timer

CONTEÚDO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO GERAL.....	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.3 JUSTIFICATIVA	14
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 DISPOSITIVOS DE AUXÍLIO A DEFICIENTES VISUAIS	16
2.1.1 The C-5 Laser Cane.....	16
2.1.2 The NavBelt.....	19
2.1.3 Andha Asthra.....	21
2.2 DEFICIENTES VISUAIS E SENTIDOS: TATO E AUDIÇÃO.....	23
2.2.1 O Tato como Grande Aliado do Deficiente Visual	24
2.2.1.1 <i>Representação do Conhecimento de Objetos através do Tato</i>	25
2.2.1.2 <i>Exemplos de Auxílios Táteis Presentes no Ambiente</i>	25
2.2.2 A Audição como Forma de Visão.....	26
2.3 DETECÇÃO DE OBJETOS: SENSORES ÓPTICOS OU ULTRASSÔNICOS	29
2.3.1 Funcionamento de Sensores Ópticos a Laser e Infravermelho	29
2.3.2 Sensores Ultrassônicos	31
2.3.3 Modos de Funcionamento de Sensores	32
2.3.3.1 <i>Difuso</i>	32
2.3.3.2 <i>Retro Reflexivo</i>	33
2.3.3.3 <i>Oposto.....</i>	34
2.4 INTRODUÇÃO À MICROMOTORES DE VIBRAÇÃO	35
2.4.1 ERM – Eccentric Rotating Mass.....	35
2.4.1.1 <i>Controle de Motores ERM.....</i>	37

2.4.2 LRA – Linear Resonant Actuator	37
<i>2.4.2.1 Controle de Motores LRA</i>	<i>39</i>
3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	40
3.1 SENSOR ULTRASSÔNICO HC-SR04.....	43
3.1.1 Testes com o HC-SR04	44
3.2 MÓDULO MOTOR DE VIBRAÇÃO	48
3.2.1 Testes com o Módulo	49
3.3 MICROCONTROLADOR.....	50
3.3.1 Módulo Frontal com PIC16F628A	51
<i>3.3.1.1 Controle do motor com PWM</i>	<i>53</i>
3.3.2 Módulos Laterais com PIC16F886	56
3.4 SOFTWARE.....	57
3.4.1 Watchdog Timer	60
3.4.2 Frequências de Medição e as Relações com a Distância	61
3.5 FONTE DE ALIMENTAÇÃO.....	64
3.6 ESTRUTURA MECÂNICA	66
4 RESULTADOS	69
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
REFERÊNCIAS	73
APÊNDICE A – PROGRAMA PIC16F628A	76
APÊNDICE B – PROGRAMA PIC16F886	78

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), em 2018, estimava-se que, globalmente, aproximadamente 1,3 bilhão de pessoas sofriam com algum tipo de problema de visão, sendo que 36 milhões eram completamente cegas. Conjuntamente, estima-se que, ainda hoje, 90% dos casos de cegueira ocorrem nos países em desenvolvimento, e que 80% são evitáveis. (WHO, 2018).

As principais causas de cegueira evitável são catarata, tracoma, oncocerquiase, certos transtornos que atingem as crianças, incluindo a deficiência de vitamina A e retinopatia, doença degenerativa não inflamatória da retina e da falta de óculos e instrumentos para ajudar a baixa visão (CELESTINO, 2009, p. 18).

Ainda, conforme salienta Celestino (2009, p. 18), “No Brasil, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2000, existiam 148 mil pessoas cegas e 2,4 milhões com grande dificuldade de enxergar.”.

Apesar dos inúmeros avanços tecnológicos, a cegueira ainda permanece sendo uma das doenças mais sérias nos dias de hoje. Essas pessoas não são aptas a interagir com o ambiente e são incapazes de se locomover ou identificar objetos independentemente. Com isso, os deficientes visuais vêm usando bastões guia como forma de auxílio nos seus deslocamentos diários. Com o treinamento adequado, essas pessoas podem desfrutar de uma relativa segurança, conseguindo detectar desníveis no solo, degraus e obstáculos no seu caminho. Ou seja, o bastão guia os deu a liberdade de trafegar independentemente para seus destinos e participar mais da vida em comunidade. (KUMAR, 2014).

Tipicamente, o bastão guia é a ferramenta mais popular para detectar obstáculos e objetos devido a sua simplicidade, baixo custo e portabilidade. O grande problema com esse equipamento, é que ele só é capaz de detectar obstáculos baixos, até a altura do joelho. Seu alcance também é limitado, na maioria dos casos, de 50 a 100 cm. Certos obstáculos, como janelas, plataformas, galhos de árvores e plantas, por exemplo, não conseguem ser detectados, e têm certo potencial a serem perigosos para o deficiente. (LAKDE, 2015; FRENKEL, 2006).

Além dos bastões, cães e outras pessoas são usados por deficientes visuais como guia. Porém, o custo de contratar um guia é muito alto, e os menos favorecidos não conseguem ter esse privilégio. Da mesma forma, os cães-guia devem receber um treinamento extensivo antes de poderem ser usados como guia nos deslocamentos dessas pessoas, e também, eles não podem ser usados por mais de 5 ou 6 anos nessa tarefa. Outro fato importante, é que como os próprios

donos dos cães são deficientes, é comum de os cães não receberem os cuidados necessários. (KUMAR, 2014).

Para superar as desvantagens citadas acima, os ETAs (*Electronic Travelling Aids*), ou dispositivos eletrônicos de auxílio a locomoção, foram inventados para reforçar a independência e segurança dos deficientes visuais durante seus deslocamentos. Esses dispositivos ajudam as pessoas a adquirir informações sobre o ambiente e através de áudio ou tato, são capazes de informar o usuário sobre o melhor caminho a seguir. A maioria desses dispositivos é muito similar a sonares e radares, um feixe de laser ou ultrassom é emitido, e, se a onda é refletida de volta ao sensor, significa que um objeto foi detectado. Com isso, é possível calcular a distância de tal objeto, de acordo com a diferença do tempo de enviar e receber o sinal refletido. Vários tipos de dispositivos já foram propostos e alguns chegaram a ser comercializados, como será mostrado mais adiante. (KUMAR, 2014; SHOVAL, 1998).

1.1 OBJETIVO GERAL

O trabalho tem como objetivo apresentar o projeto e construção de um dispositivo ultrassônico de auxílio a deficientes visuais capaz de detectar objetos e informar o usuário, por meio de motores de vibração, a presença de um obstáculo no seu caminho. O dispositivo deve ser usado na cabeça, dessa forma, o usuário não tem compromisso algum com as mãos, tendo a liberdade de utilizar um bastão guia em conjunto, por exemplo. Por conseguinte, o deficiente visual poderá se locomover de maneira mais segura e independente durante suas atividades diárias, proporcionando uma melhor qualidade de vida.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Contextualizar a preocupação que se tem com deficientes visuais no mundo e como os dispositivos eletrônicos vieram para ajudar;
- b) Entender como funcionam os componentes principais do projeto;
- c) Projetar e desenvolver o sistema de detecção (*hardware e firmware*);
- d) Projetar e desenvolver o sistema de alerta (*hardware e firmware*);
- e) Desenvolver uma estrutura mecânica que seja prática e viável para uso;
- f) Manter o custo do projeto o mais baixo possível.

1.3 JUSTIFICATIVA

Como visto anteriormente, as alternativas mais comuns ao bastão são o cão-guia e um guia humano. Contratar um guia se torna inviável para a maioria dos deficientes visuais devido ao elevado custo. Os cães-guia, além da necessidade de passarem por treinamento, têm um tempo limitado nessa função, e também, muitas vezes foi constatado que eles não recebem os devidos cuidados pelo fato de seus donos serem deficientes.

O dispositivo criado não requer qualquer tipo de treinamento por parte do usuário, apenas um período de adaptação, tem baixo custo de produção e constitui uma importante obra de cunho social, criando um equipamento funcional e prático para uma notória parcela da população mundial.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 1 apresenta dados globais importantes para dar uma noção da grande preocupação que se tem com a cegueira, mostra alguns dos principais métodos de auxílio a locomoção que deficientes visuais utilizam, apontando também algumas desvantagens e os principais problemas enfrentados. Além de definir e introduzir o tema do trabalho.

No capítulo 2, se discute de maneira mais profunda alguns dispositivos de auxílio para deficientes visuais já inventados. Também, são mostradas maneiras em que, no mundo de hoje, os deficientes visuais são auxiliados pelo próprio ambiente, fazendo uma comparação entre alertas sonoros e táteis, desta forma, é discutida a melhor forma de notificação ou alerta para detecção de obstáculos. São, também, discutidas as vantagens e desvantagens de utilizar sensores ultrassônicos ou a laser em dispositivos eletrônicos de auxílio. Por último, é feita a revisão de literatura sobre os micromotores de vibração.

O capítulo 3 aborda as características de desenvolvimento do projeto, introduzindo como o dispositivo funciona, apresentando os diagramas de blocos do projeto, os componentes escolhidos, bem como os critérios que levaram as escolhas dos mesmos, e ainda, são feitos testes de desempenho de cada componente. O software desenvolvido também é detalhado, com fluxogramas e os devidos cálculos utilizados no projeto. Também, são feitas análises de características de funcionamento do dispositivo através de gráficos e testes práticos. Ainda, é feita uma breve explanação sobre a fonte de alimentação do projeto e, por fim, sendo de grande importância, são descritos detalhes a respeito da estrutura mecânica do protótipo, incluindo como cada componente foi agregado à estrutura

No capítulo 4 são apresentados resultados obtidos dos testes realizados e particularidades de funcionamento.

O capítulo 5 apresenta as considerações finais sobre o protótipo e sugere algumas possíveis soluções visando otimizar o mesmo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 DISPOSITIVOS DE AUXÍLIO A DEFICIENTES VISUAIS

Muitos pesquisadores vêm trabalhando há muitos anos para criar equipamentos capazes de auxiliar deficientes visuais em sua locomoção, com o uso de sensores de presença ou movimento, e em alguns estudos mais avançados, pesquisadores estão tentando uma maneira de transplantar os olhos deficientes por olhos robóticos capazes de traçar as imagens captadas diretamente na retina do paciente utilizando tecnologias biomédicas. Neste capítulo, apresentam-se alguns trabalhos de pesquisadores que concentram esforços na busca por soluções ligadas ao tema de auxílio no deslocamento de deficientes visuais através de sensoramento. (LAKDE, 2015).

2.1.1 The C-5 Laser Cane

Benjamin (1973), conta que em 1952, Thomas A. Benham, um ilustre físico e engenheiro cego, da faculdade de Haverford, nos EUA, definiu os critérios básicos de design do que se pode chamar de primeiro dispositivo de auxílio a mobilidade para deficientes visuais, o *Laser Cane*, em tradução literal, Bengala Laser. O Professor Benham definiu o seguinte:

1. O protótipo deveria detectar obstáculos e degraus;
2. Deveria ser silencioso, exceto quando estivesse dando aviso;
3. Necessitaria ser simples de usar, o usuário não teria de “vestir” o equipamento;
4. A saída do dispositivo deveria ser tátil, se possível; e
5. Se fosse audível, não poderia bloquear outros sons.

O primeiro protótipo só ficou pronto em 1974, feito pela empresa que, na época, era conhecida como Bionic Instruments. Os 30 anos que antecederam essa data foram de muita pesquisa e contemplaram mais de 30 tentativas de criar um equipamento útil e prático. Durante todo esse período, diversas dificuldades tiveram de ser superadas e muitas mudanças na eletrônica ocorreram. No início do projeto, por volta de 1953, os transistores ainda não estavam disponíveis para qualquer pessoa, então linhas de vácuo tiveram de ser usadas, junto com alguns transistores especiais obtidos diretamente dos laboratórios que os estavam desenvolvendo. Uma situação parecida ocorreu com as baterias de níquel cádmio. Ainda, os primeiros anos do projeto foram gastos para desenvolver fontes de luz, para obter fotodetectores de baixo ruído e alta sensibilidade, e também, circuitos eletrônicos de alta eficiência, que eram pouco usuais para a

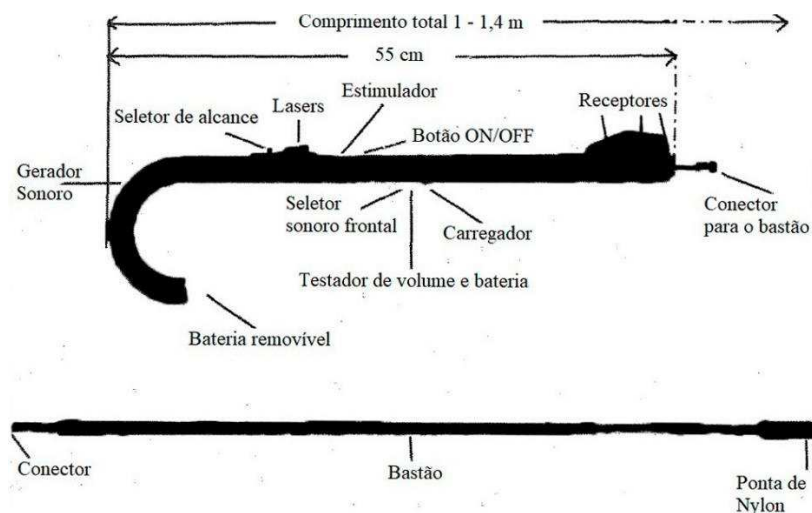
época, tudo foi desenvolvido tipicamente com a ajuda das fabricantes de componentes até então. (BENJAMIN, 1973).

O ano de 1964 deu início a segunda década de desenvolvimento, onde os lasers e as baterias de níquel cádmio começaram a aparecer, os transistores eram dispositivos de dia-a-dia, e os primeiros diodos emissores de luz (LED) estavam começando a se tornar comercializáveis. Agora, a ideia de um dispositivo de auxílio para deficientes visuais começou a parecer factível. Trabalhando com essas novas tecnologias, foi possível desenvolver 3 protótipos. Eles foram apresentados a aproximadamente 15 instituições, incluindo 100 cegos e 50 treinadores de orientação e mobilidade, onde tais pessoas testaram e fizeram observações sobre os protótipos. (BENJAMIN, 1973).

Em 1971 foi decidido que o protótipo estava pronto para ser testado em um período maior, por usuários experientes de bastões-guia de centros de apoio a deficientes visuais. Os testes iniciaram com 8 protótipos, onde após um ano, 7 usuários continuaram a utilizá-los. As novas bengalas laser foram tão bem aceitas, que os centros de apoio fizeram um pedido de mais 35 bengalas. Com esse pedido, os engenheiros da Bionic Instruments remodelaram o protótipo, testaram, e em março de 1974, entregaram as 35 bengalas laser, onde, na Figura 1 é possível observar como ficou o projeto final. A versão final, denominada como C-5, emitia pulsos de luz infravermelha, que, quando refletida pelo objeto na sua frente, era detectada por um fotodiodo posicionado atrás da lente de recepção. O ângulo da reflexão da luz que atravessava as lentes indicava a distância do objeto detectado. (BENJAMIN, 1973).

O protótipo emitia 3 feixes de IR (infravermelho), um apontado para o chão, um para frente, e outro para cima.

Figura 1 – Versão final da bengala laser



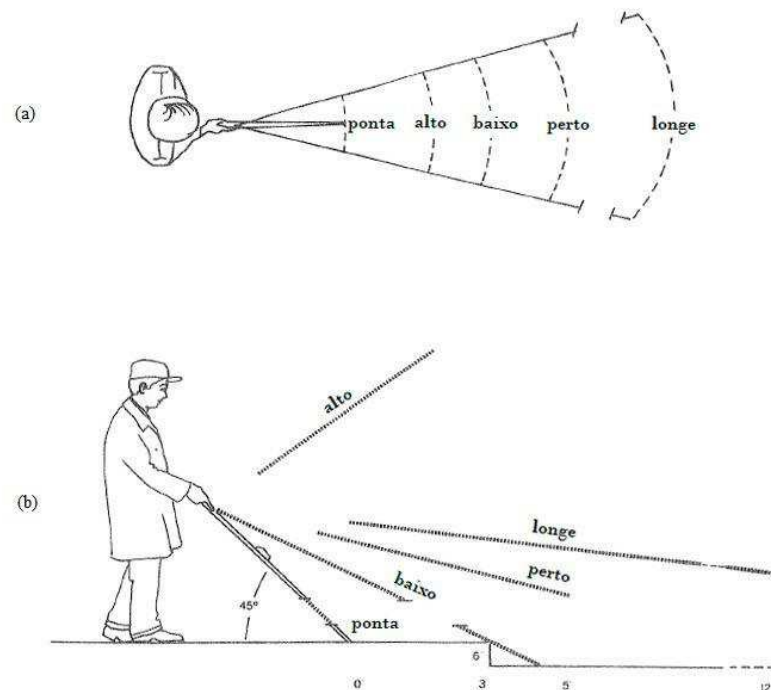
Fonte: Adaptado de Benjamin (1973, p. 447)

O feixe que apontava para o chão servia para avisar o usuário caso houvesse algum degrau maior que 15 cm. O usuário era alertado através da emissão de um som de 200 Hz. Degraus mais rasos podiam ser detectados, porém, neste caso, um bastão guia comum proporcionava maior proteção. (BENJAMIN, 1973).

O feixe apontado para frente ficava em torno de 60 cm do chão e era capaz de detectar objetos a uma distância de 1,5 m ou 3,6 m. A distância de operação deste feixe pode ser escolhida pelo usuário através de uma chave logo acima do laser. Qualquer objeto detectado por esse sensor iria gerar um estímulo no dedo indicador, e também existia a opção de ativar um alerta sonoro, de 1600 Hz, caso, por exemplo, o usuário estivesse vestindo uma luva e não percebesse o estímulo no dedo indicador. (BENJAMIN, 1973).

O feixe que aponta para cima detectava objetos a altura da cabeça, em uma distância de 60 cm além da ponta do bastão. Este sensor era capaz de detectar galhos de árvore e placas, por exemplo, coisa que um bastão guia comum não é capaz de fazer. O alerta era feito através de um “beep” de 2600 Hz. Na Figura 2 é possível observar as direções dos feixes, bem como a área que eles cobrem. (BENJAMIN, 1973).

Figura 2 – Área de proteção da bengala laser



Fonte: Adaptado de Benjamin (1973, p. 449)

Em (a), a visão de cima da área de proteção, e em (b) a visão lateral. Cada feixe possuía 2,5 cm de largura a uma distância de 3 metros, isso significa que objetos podiam ser detectados

e medidos em largura com uma precisão considerável. O procedimento correto para escanear uma área seria mover o bastão laser em forma de arco, da direita para a esquerda. (BENJAMIN, 1973).

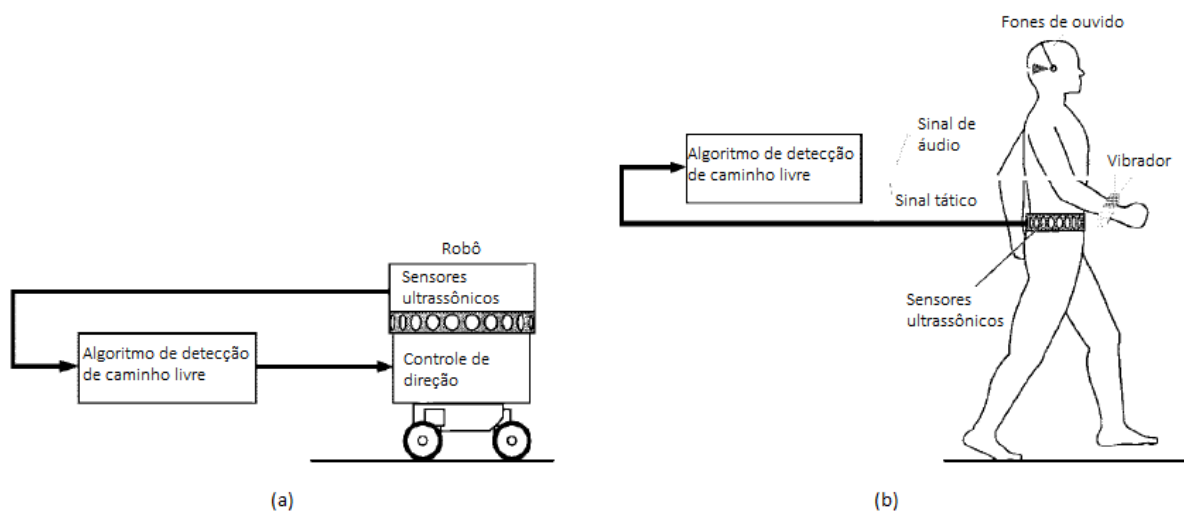
As saídas dos três fotodiodos eram amplificadas e filtradas para evitar ruídos da luz do sol, outro bastão laser ou qualquer tipo de fonte de luz, e então eram utilizadas para acionar o gerador de som ou estimulador apropriado. O consumo médio de potência era de 600 mW de uma bateria de níquel cádmio recarregável de 6 V, o suficiente para dar ao bastão 3 horas de uso contínuo em uma carga. (BENJAMIN, 1973).

Um cuidado especial foi tomado para manter o peso do bastão baixo, em torno de 450 gramas, e também com a distribuição de peso para que seja confortável e passe a sensação de um bastão guia comum. (BENJAMIN, 1973).

2.1.2 The NavBelt

O *NavBelt*, cujo nome é uma combinação das palavras *Navigation* e *Belt*, do inglês, navegação e cinto, respectivamente, sugerindo um cinto capaz de ajudar na locomoção. É baseado no conceito de desvio de objetos, uma ideia originalmente desenvolvida para robôs, como é mostrado em na Figura 3 (a), com a diferença que, neste dispositivo, os sinais elétricos que guiam o usuário, são acústicos, como mostra a Figura 3 (b). De qualquer forma, computacionalmente, a detecção de objetos ou de um caminho livre é similar em ambas as aplicações. (SHOVAL, 1998).

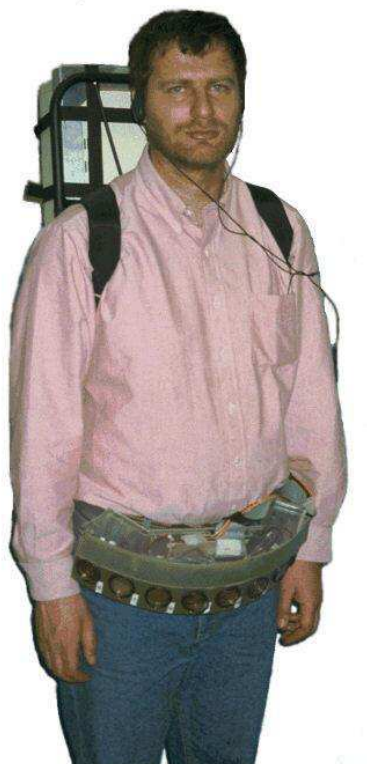
Figura 3 – Comparação entre a aplicação em robótica e em humanos



Fonte: Adaptado de Shoval (1998, p. 1377)

A ideia inicial do projeto veio do israelense Johann Borenstein, em 1989, mas o primeiro protótipo só ficou pronto em 1992, quando o também israelense, Shraga Shoval, o construiu durante sua graduação. A Fotografia 1 exibe o protótipo sendo testado. O protótipo consistia em oito sensores ultrassônicos instalados na parte frontal de um cinto, cada um cobrindo uma área de 15°, resultando em um ângulo total de detecção de 120°. (SHOVAL, 1998).

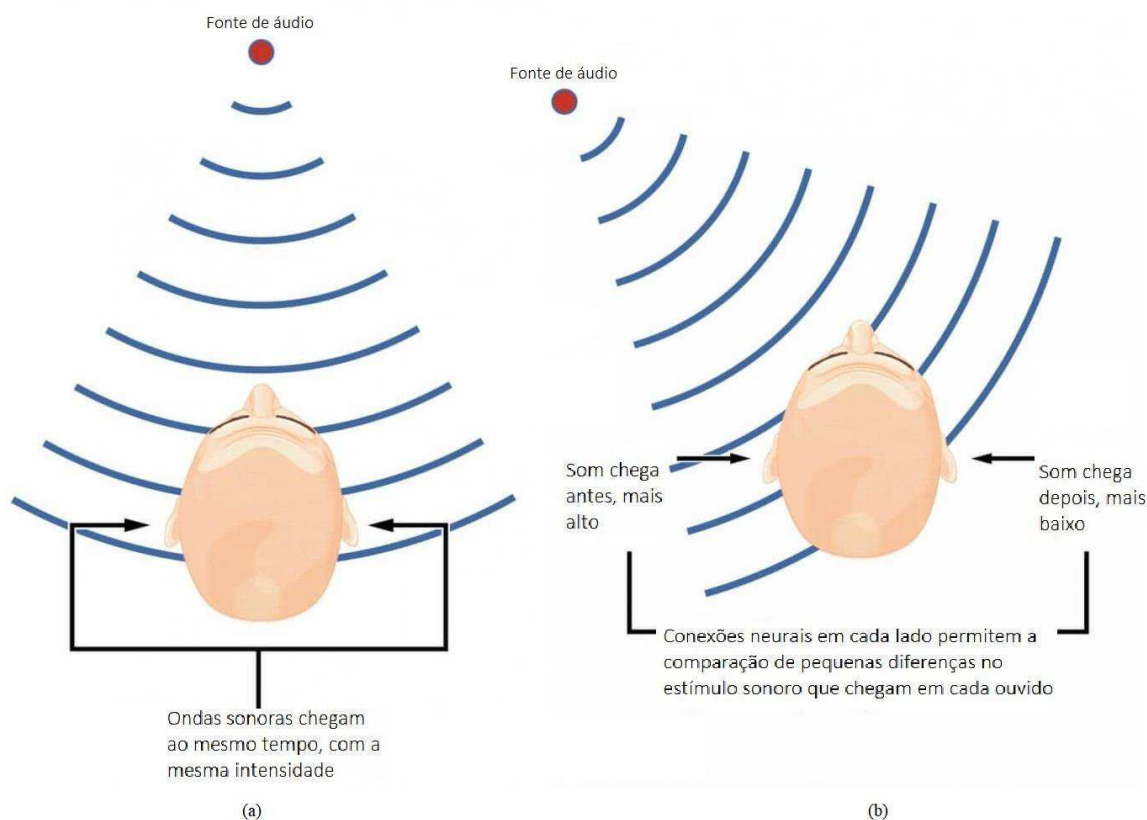
Fotografia 1 – Protótipo final do *NavBelt* sendo testado



Fonte: Shoval (1998, p. 1378)

Fones de ouvido eram utilizados para alertar o usuário da presença de algum objeto próximo. Um sistema de som binaural, de dois canais, baseado na diferença de tempo e amplitude dos sinais sonoros percebidos por cada ouvido, criava um efeito virtual de ambientação. Uma visualização do funcionamento de um sistema de som binaural pode ser vista na Figura 4, onde em (a), a fonte de áudio está posicionada diretamente à frente do ouvinte, e em (b) a fonte está na diagonal do ouvinte. (SHOVAL, 1998).

Figura 4 – Sistema de som binaural



Fonte: Adaptado de Hooke ([S. d.], [S. p.])

A direção de um objeto era indicada pela direção espacial do sinal dos fones de ouvido, e a distância era representada pela frequência e volume. Um computador portátil era utilizado como se fosse uma mochila para processar os dados adquiridos pelos sensores, aplicar o algoritmo de desvio de objetos e reproduzir os sons nos fones de ouvido stereo. Resultados experimentais com o protótipo mostraram que o usuário podia trafegar seguramente em ambientes desorganizados e irregulares em velocidades de até 0,8 m/s. (SHOVAL, 1998).

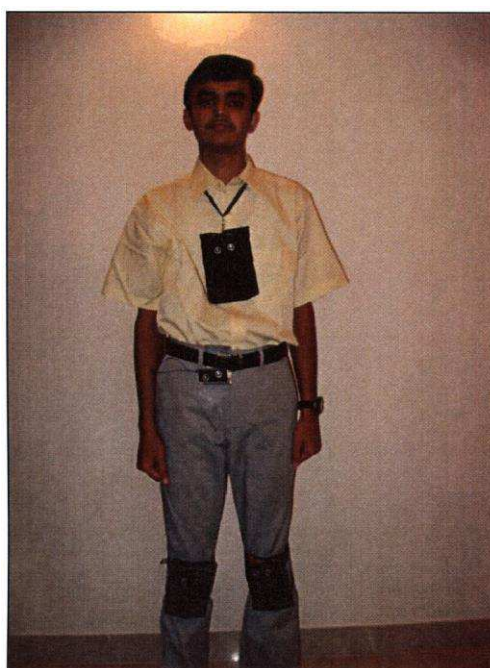
2.1.3 Andha Asthra

Andha Asthra, em sânscrito, se refere a um dispositivo de proteção para cegos. Em tradução livre, *Andha* significa cego, e *Asthra* dispositivo. Três pessoas são responsáveis pelo projeto, o professor Dr. S. Sethu Selvi, e dois alunos, Umanath R. Kamath e Sudhin M. A., todos do Instituto de Tecnologia Ramaiah, em Karnataka, na Índia. Os criadores enaltecem algumas características deste protótipo que não são encontradas em outros dispositivos similares, como por exemplo, capacidade de detectar degraus, objetos à altura da cabeça e objetos baixos, além de manter as mãos do usuário livre, e, por ser um projeto simples, não necessita de qualquer tipo de treino por parte do usuário, e ainda, possui um custo baixo de

produção. Por usar a lógica de detecção de movimento, e não de presença, o *Andha Asthra* possui outra vantagem interessante, o usuário consegue conversar com outra pessoa, ou mesmo ficar parado próximo a uma parede, sem que o dispositivo fique emitindo um alerta continuamente, o que não é possível quando se usa um algoritmo de detecção de presença. O algoritmo pega a distância em um tempo T1 e compara com a distância em um tempo T2, se forem diferentes, um alerta é gerado. (SELVI, 2008).

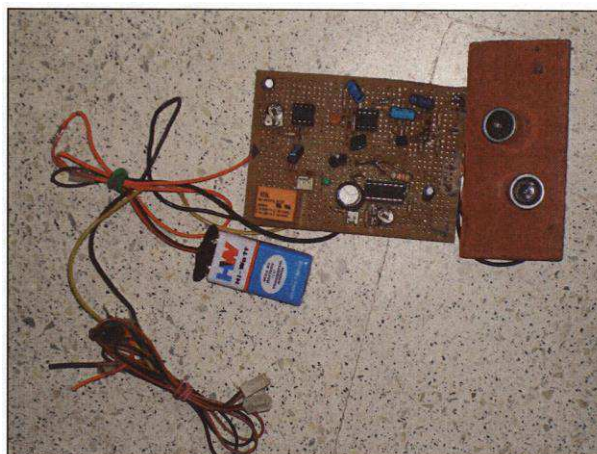
O *Andha Asthra* alerta o usuário através de motores de vibração, e utiliza sensores ultrassônicos para fazer a detecção. Dois módulos são colocados, um em cada joelho, para detectar objetos baixos. Outro módulo é pendurado no pescoço, para detectar objetos altos. Mais um módulo é posicionado na cintura para detectar irregularidades no piso. Na Fotografia 2 é possível ver todos os módulos sendo testados no usuário. Cada módulo possui seu motor de vibração. (SELVI, 2008).

Fotografia 2 – Um dos responsáveis pelo projeto fazendo o teste do protótipo final



Fonte: Selvi (2008, p. 140)

Um ponto interessante deste protótipo, é que, apesar de ser relativamente recente, sendo projetado no ano de 2008, os criadores não utilizaram qualquer tipo de computador ou microcontrolador para fazer a lógica de detecção e acionamento dos motores, o circuito completo de cada módulo é mostrado na Fotografia 3. Devido a isso, os módulos de detecção são relativamente grandes, como pôde ser visto na Fotografia 2.

Fotografia 3 – Módulo do *Andha Asthra*

Fonte: Selvi (2008, p. 138)

O circuito de oscilação para o transmissor ultrassônico é feito a partir de um oscilador RC com schmitt trigger, onde a frequência de oscilação pode ser controlada através de um potenciômetro. O receptor utiliza um circuito parecido, os sinais que ele recebe são amplificados através de um transistor, e depois, levados a entrada de um amplificador operacional (ampop), este, operando como um detector de pico, é ligado a entrada não inversora de um segundo ampop. (SELVI, 2008).

As ondas refletidas por objetos diferentes chegam no receptor em fases diferentes. Se elas estão em fase, elas se somam e formam um sinal de maior amplitude, se estão fora de fase, elas se cancelam e geram um sinal menor. Quando um objeto se move a favor ou contra a o receptor em uma distância pequena (aproximadamente 1 cm), o sinal do receptor oscila em um ciclo de alto-baixo, e essa oscilação ativa o circuito de trigger dos motores de vibração. (SELVI, 2008).

2.2 DEFICIENTES VISUAIS E SENTIDOS: TATO E AUDIÇÃO

Grande parte da materialização da realidade se encontra em propriedades visuais que são inacessíveis ao cego, porém, isso não quer dizer que não há como compreender a representação do mundo físico e visual. Nesses casos, deve-se potencializar a utilização de outros sistemas sensoriais. Dois sentidos mostram-se especialmente importantes para a compreensão desse mundo: o sistema háptico e a audição. Cada um destes sentidos possui características informativas peculiares, que provém da própria estrutura anatômica dos receptores sensoriais e do desenvolvimento das habilidades perceptivas correspondentes. Isto faz com que os objetos físicos do mundo tenham uma perceptividade diferente da visual. Dada a importância que esses sentidos assumem para os deficientes visuais, e como visto nos exemplos de trabalhos

anteriormente, em que há a possibilidade de utilizar ambos os sentidos nos dispositivos eletrônicos auxiliares, cada um será abordado de maneira distinta, para que seja possível a compreensão e que se chegue a uma conclusão sobre qual seria a forma mais adequada de alertar um deficiente visual sobre obstáculos presentes no ambiente. (OCHAITA, 1995).

2.2.1 O Tato como Grande Aliado do Deficiente Visual

O sistema sensorial mais importante que a pessoa cega possui para conhecer o mundo, é o sistema háptico ou tato ativo. Como será mostrado ao longo deste capítulo, muitas das peculiaridades do desenvolvimento cognitivo das pessoas cegas podem ser explicadas em relação às características da captação e processamento da informação mediante o tato. É, portanto, necessário diferenciar entre tato passivo e tato ativo ou sistema háptico. Enquanto no primeiro a informação tátil é recebida de forma não intencional ou passiva (como a sensação que a roupa ou o calor produz na pele), no tato ativo, a informação é buscada de forma intencional pelo indivíduo. Assim, no tato ativo encontram-se envolvidos não somente os receptores da pele e os tecidos subjacentes (como ocorre no tato passivo), mas também a excitação correspondente aos receptores dos músculos e dos tendões, de maneira que o sistema perceptivo háptico capta a informação articulatória motora e de equilíbrio. Quando um cego está explorando com as mãos um objeto estranho, para reconhecê-lo, ocorre algo parecido a quando um vidente olha uma forma complexa e desconhecida para posteriormente projetá-la em sua mente e compreender o que está sendo visto. As mãos, como os olhos, embora de forma mais lenta e sucessiva, movem-se de forma intencional para buscar as peculiaridades da forma e poder, assim, obter uma imagem dela. (OCHAITA, 1995).

Não obstante, existe diferenças significantes entre a percepção e o processamento da informação mediante o tato e a visão. A captação da informação mediante o tato é muito mais lenta que a proporcionada pelo sistema visual, o que traz consigo uma explicação de caráter sequencial. Isto dá lugar a uma maior carga na memória de trabalho, quando os objetos a serem explorados são grandes ou numerosos. Como exemplo, o tempo que um cego leva para explorar um objeto grande, como uma mesa, e a quantidade de pequenas percepções que deverá integrar até obter sua imagem, se comparado com a rapidez da exploração visual desta mesma mesa. Além disso, enquanto o tato pode somente explorar as superfícies situadas no ambiente que os braços alcançam, não servindo para conhecer espaços distantes, a visão é o sentido mestre por excelência para perceber objetos e sua posição espacial a grandes distâncias. (OCHAITA, 1995).

Portanto, o tato constitui um sistema sensorial que tem determinadas características e que permite captar diferentes propriedades dos objetos, tais como temperatura, textura, forma e relações espaciais. A textura parece ter, para o tato, uma saliência perceptiva semelhante à da cor para a visão, desta maneira, é possível se ter uma noção do quão importante é o tato para o deficiente visual. (OCHAITA, 1995).

2.2.1.1 Representação do Conhecimento de Objetos através do Tato

Sob a perspectiva de uma pessoa que enxerga, tende-se a considerar que o conceito de imagem mental coincide com o da imagem visual. No entanto, essas imagens não têm porquê serem as únicas. Todas as pessoas têm representações baseadas em outras modalidades sensoriais, como a audição, o olfato, o paladar ou até mesmo a propriocepção. Portanto, os indivíduos privados da visão dispõem de uma ampla gama de possibilidades de perceber o mundo que os cerca, utilizando as modalidades sensoriais de que dispõem. (OCHAITA, 1995).

2.2.1.2 Exemplos de Auxílios Táteis Presentes no Ambiente

Nota-se uma preocupação com a melhor qualidade de vida do deficiente, e esta preocupação pode ser percebida com as alterações propostas nos espaços públicos, como a instalação da sinalização tátil direcional, visto na Fotografia 4, que é um piso criado para orientar o deficiente visual, sinalizando o percurso correspondente a via em que os pedestres trafegam. Pode ser citada também a linha guia, que são elementos naturais ou edificados, que podem ser utilizados como guia de balizamento para pessoas com deficiência visual que utilizem bastão guia. (CELESTINO, 2009).

Fotografia 4 – Exemplo de sinalização tátil em uma calçada



Fonte: Wikipédia (2019, [S. p.]

O Braille é outro exemplo de sistema tátil disponível para deficientes visuais. Tradicionalmente, é escrito em papel relevo, mas pode ser implantado em sistemas eletrônicos. O Display Braille é bem tradicional, trata-se de um dispositivo que é ligado a um computador e transmite as informações deste em braille a partir de um painel. Normalmente, um Display Braille só transmite uma linha de informação por vez, entretanto, existem telas maiores capazes de trabalhar com mais dados, obviamente, com um custo mais elevado. (ALECRIM, 2016).

Na Fotografia 5 é possível visualizar o fruto do trabalho da professora Sile O’Modhrain, da Universidade de Michigan, e sua equipe. Trata-se de uma tela capaz de mostrar várias linhas de informação, sem ignorar o fator custo-benefício. O equipamento utiliza microflúidos para funcionar, sendo que a tela é composta por diminutas bolhas, que, quando preenchidas com pequenas quantidades de fluido, formam elevações. A combinação dessas elevações forma o conteúdo em braille. (ALECRIM, 2016).

Fotografia 5 – Display atualizável em Braille



Fonte: Alecrim (2016, [S. p.]

2.2.2 A Audição como Forma de Visão

Falar da importância da audição para uma pessoa vidente não constitui novidade alguma, porém poucos se dão conta que, para um deficiente visual, ela assume um papel transcendente, podendo significar a diferença até entre a vida e a morte. A audição é fundamental para várias tarefas na vida de deficientes visuais, desde a sua locomoção, tornando-os dependentes de alertas sonoros, gerados pelo movimento de veículos, pessoas, animais, etc., até a leitura de audiolivros, por exemplo, que facilitam a aproximação do deficiente a literatura, importante na vida de todo ser humano.

Como visto anteriormente, o fato de não se ter visão afeta diretamente os outros sentidos, tornando-os mais evoluídos comparativamente com uma pessoa provida de visão. Existem muitos casos de pessoas com uma audição tão avançada que conseguem se localizar e entender a dimensão e profundidade de obstáculos de maneira similar a animais como o morcego, por exemplo. Um estalo da língua é o suficiente para gerar o sinal do “sonar natural”. O sinal acústico produzido pela boca, mãos, pés, ou qualquer outro objeto reverbera nos objetos ao redor e informa ao cérebro informações valiosas, tal habilidade é conhecida como ecolocalização. Uma reportagem escrita por Alexandre Gonçalves e Clarissa Thomé, no site do jornal Estadão, onde foram entrevistados alguns deficientes visuais, um deles afirma o seguinte: “Basta colocar uma proteção de borracha na ponta da bengala de muitos cegos para deixá-los loucos [...] Eles usam aquele barulhinho da ponta rígida batendo no chão para identificar obstáculos.”.

Além das capacidades naturais dos seres humanos para se localizar no ambiente através do som, existem equipamentos eletrônicos com o propósito de ajudar cegos nas mais variadas tarefas. Uma ferramenta utilizada em grande escala nos dias de hoje é o elevador, sendo necessárias adaptações às normas para se adequar ao frequente uso por deficientes visuais. Podendo passar despercebidos por pessoas videntes, os sons produzidos pelos elevadores são de suma importância na vida dessas pessoas. Os elevadores mais modernos são projetados pensando no eventual uso por pessoas de baixa visão, eles emitem avisos sonoros diferentes de acordo com o sentido do elevador, ou seja, se o elevador está subindo, é emitido um som, se está descendo, é emitido um som diferente. Em alguns casos, é emitido um aviso sonoro caso o número de parada seja superior a dois andares, indicando o andar que o elevador está parado.

Outra ferramenta importantíssima, que inclusive pode evitar tragédias, é o semáforo sonoro para pedestres, que pode ser visto na Fotografia 6. “Em todo país, os semáforos sonoros devem ser instalados em vias públicas de grande circulação de acordo com *Resolução N° 704* do Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) até o dia 31 de dezembro de 2019.” (2 DEDOS, 2018, [S. p.]).

Fotografia 6 – Exemplo de aplicação do semáforo sonoro



Fonte: 2 Dedos (2018, [S. p.])

Esta resolução estabelece padrões e critérios para a sinalização semafórica, padronizando os sinais sonoros, visuais, vibratórios e modos de utilização do equipamento. A resolução considera que o trânsito seguro é um direito de todos, sendo responsabilidade dos órgãos que fazem parte do Sistema Nacional de Trânsito. (2 DEDOS, 2018).

A padronização e uniformização deste tipo de sinalização é uma ação importante, pois vai permitir com que o deficiente visual tenha a plena certeza de como o equipamento precisa ser acionado quando precisar fazer uma travessia em uma via grande e movimentada em qualquer lugar do país. Neste sentido, o semáforo sonoro terá a função de informar os períodos de verde, vermelho intermitente (quando falta pouco tempo para o sinal abrir para os carros) e vermelho fixo dos semáforos de pedestres e devem seguir o disposto na resolução. (2 DEDOS, 2018).

Por último, como qualquer cidadão, os deficientes visuais têm o direito e obrigação de adquirir conhecimento, cultura e senso crítico para não serem considerados ignorantes ou inferiores aos demais indivíduos. Visando isso, os audiolivros foram criados. A ideia é parecida com a de serviços de streaming populares, como rádio e televisão, e é uma ótima saída para aqueles que têm dificuldades para ler, sendo inclusive uma opção viável mesmo para pessoas que enxergam perfeitamente. Hoje, existem inúmeros softwares e aplicativos de celulares com uma audioteca enorme, com várias categorias de livros e textos.

Com as informações aqui apresentadas, pôde-se concluir que a **melhor** forma de alerta para um dispositivo móvel de assistência a deficientes visuais, é através do **tato**, utilizando

motores de vibração, deixando as mãos do usuário livres para usufruir maior da liberdade que esse sentido o proporciona. Os alertas sonoros do próprio ambiente, como carros e pedestres, ou emitidos por dispositivos eletrônicos, como elevadores e semáforos, são muito importantes e não devem ser atenuados por qualquer equipamento de auxílio. O fato de se ter muitas informações sonoras ao mesmo tempo pode tornar confusa a percepção de localização e movimentação do cego, podendo ser até perigoso em uma situação em que seja necessário atravessar uma via, por exemplo. Todas as formas de proteção possíveis para deficientes visuais devem ser utilizadas, visando maior segurança, com isso, pode-se afirmar que os dispositivos eletrônicos não foram inventados propriamente para substituir as formas tradicionais já existentes. O uso do dispositivo desenvolvido na cabeça do usuário, com alerta de vibração funciona como uma proteção extra, uma maneira de incrementar as possibilidades de detecção e percepção, conseguindo manter as mãos livres para o uso de uma bengala-guia, ou mesmo dos próprios braços e mãos para uma melhor localização. E, também, mantendo os ouvidos livres para ouvir quaisquer sinais de alerta sonoro emitidos seja por fontes veiculares, pessoas, obras, equipamentos eletrônicos, entre outras.

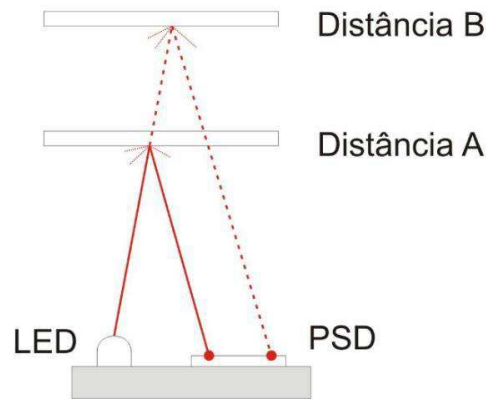
2.3 DETECÇÃO DE OBJETOS: SENSORES ÓPTICOS OU ULTRASSÔNICOS

Como visto anteriormente, os sensores mais habituais escolhidos para dispositivos de auxílio a deficientes visuais são ópticos ou ultrassônicos. Nesta parte do trabalho, se introduz os conceitos de sensores a laser, infravermelho e ultrassônicos, também, são apresentadas as principais vantagens e desvantagens de cada sensor de acordo com o tipo de aplicação, através de subcapítulos individuais, para, desta forma, compreender o motivo de se ter escolhido sensores ultrassônicos no protótipo.

2.3.1 Funcionamento de Sensores Ópticos a Laser e Infravermelho

Podem funcionar, dependendo do tipo de aplicação, baseados no princípio da triangulação como na Figura 5, ou *Time of Flight* (ToF). No primeiro, um feixe de luz é emitido por um diodo laser ou infravermelho e, ao ser refletido por um objeto, esse feixe é detectado por um PSD (*Position Sensing Device*, em português, sensor de posição). De acordo com a distância do objeto, a reflexão incide de modo diferente no PSD. Esse tipo de sensor costuma operar em distâncias pequenas. (PATSKO, 2006; WAUGH, [S. d.]).

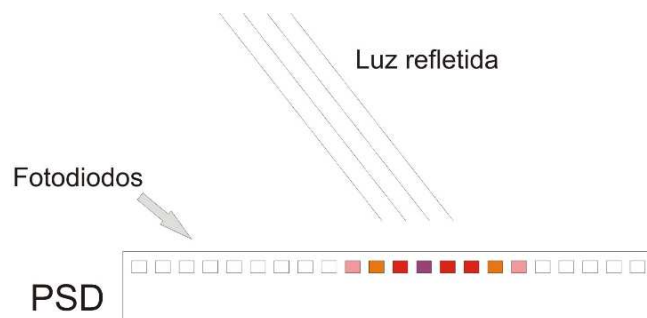
Figura 5 – Funcionamento do sensor por triangulação



Fonte: Adaptado de Patsko (2006, p. 40)

O PSD é composto por vários componentes sensíveis a luz (fotodiodos), como é possível observar em sua representação na Figura 6. Um módulo de processamento é responsável por monitorar a resposta do PSD (diferença de tempo entre emissão e reflexão e defasagem), sendo capaz de identificar a posição exata em que o raio incidiu no componente. Como essa posição depende da distância do objeto que refletiu o feixe de luz, o módulo processa esse sinal de modo a produzir uma saída correspondente a essa distância. (PATSKO, 2006).

Figura 6 – Funcionamento do PSD



Fonte: Adaptado de Patsko (2006, p. 40)

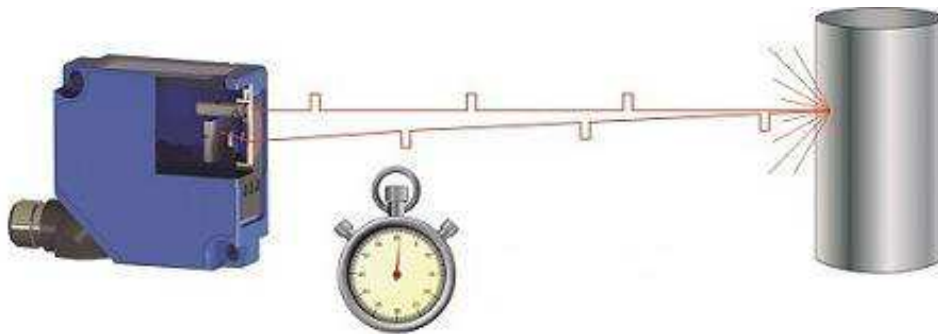
Por outro lado, os sensores que funcionam por ToF, geralmente são utilizados em aplicações de longa distância, desde 1 cm até 100 m. Esses sensores utilizam um diodo transmissor para gerar um pulso de curta duração de uma luz em uma faixa bem pequena do espectro do vermelho, infravermelho ou laser, que quando refletida por um objeto, é detectada por um diodo receptor muito sensível. Esse tipo de sensor tende a ser relativamente preciso e com boa resolução. O sensor mede o tempo que leva para o pulso que foi emitido ser detectado pelo receptor, e, como sensores a laser e IR radiam energia eletromagnética, e sabendo que a velocidade da luz será constante no meio em que o sensor irá propagar a onda (apesar da

intensidade do sinal refletido diminuir conforme aumenta-se a distância), o componente eletrônico do sensor faz a relação tempo x velocidade vista na equação (1), e calcula a distância do objeto, isso pode ser visualizado na Figura 7. (WAUGH, [S. d.]).

$$D = \frac{T*V}{2} \quad (1)$$

Onde D é a distância de deslocamento, T é o tempo e V é a velocidade. A divisão por 2 é feita porque o tempo total medido é respectivo a ida e vinda do sinal, ou seja, sem esse termo, a distância de detecção calculada seria o dobro e estaria errada.

Figura 7 – Funcionamento do sensor por ToF



Fonte: Waugh ([S. d.], [S. p.])

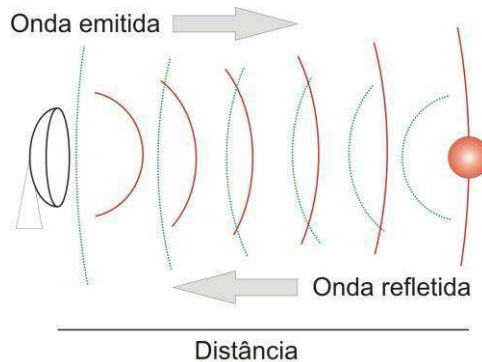
Ainda, segundo Waugh ([S. d.]), para melhorar a precisão da medição, várias medições são feitas, como desvantagem, isso acaba diminuindo o tempo de resposta do sensor para vários milissegundos, o que pode não ser ideal para uma aplicação que exige ser em tempo real.

2.3.2 Sensores Ultrassônicos

Sensores ultrassônicos de presença, movimento e distância funcionam por meio de transdutores ultrassônicos. Transdutores, por definição, são dispositivos que convertem uma informação de algum fenômeno físico captada por um sensor em um sinal detectável, que pode ser elétrico, mecânico, óptico, entre outros. Os transdutores ultrassônicos emissores transformam pulsos elétricos em ondas sonoras, e os receptores fazem o oposto. Existem vários tipos de transdutores de ultrassom, dentre eles o piezoelétrico, magnetostritivo, capacitivo e eletromagnético. O mais utilizado é o transdutor piezoelétrico, devido a ampla faixa de frequências de operação, e capacidade de operar em frequências de dezenas de MHz. O efeito piezoelétrico consiste em variar dimensões físicas de materiais quando sujeitos a campos elétricos e vice-versa, no caso de sensores ultrassônicos, quando é aplicado um sinal no

transdutor, o mesmo vibra gerando ondas sonoras. As ondas geradas pelos sensores ultrassônicos são transmitidas na forma de cone, como é possível observar na Figura 8. (CALEGARI, 2006; MAZZAROPPI, 2007).

Figura 8 – Emissão da onda ultrassônica



Fonte: Patsko (2006, p. 40)

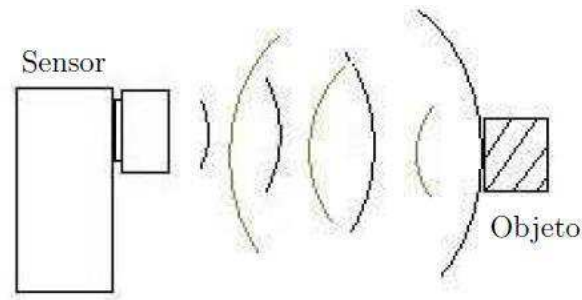
Ao interceptar um objeto, a onda é refletida de volta para o sensor, e, com o uso da eletrônica, é possível adquirir informações de distância e velocidade de deslocamento do objeto. Estas informações são extraídas respectivamente do intervalo de tempo entre a transmissão e recepção da onda sonora e da diferença entre as frequências das ondas emitida e retornada – efeito Doppler. Algumas variáveis podem afetar a propagação e reflexão das ondas sonoras causando distúrbios na detecção, como por exemplo, ângulo de superfície do alvo, a aspereza da superfície e menos significativamente, mudanças na temperatura e umidade. O formato do objeto afeta diretamente a quantidade de energia sonora refletida, porém, independentemente do formato do objeto, uma parcela da energia transmitida irá retornar ao sensor. Por isso os receptores são equipados com amplificadores operacionais, que aumentam o ganho à medida que o tempo passa até sua saturação. (MAZZAROPPI, 2007).

2.3.3 Modos de Funcionamento de Sensores

2.3.3.1 Difuso

O modo de funcionamento dos sensores mencionados acima, é chamado de difuso, onde a onda é emitida, reflete no objeto e retorna ao transdutor, ou seja, o modo difuso utiliza o mesmo encapsulamento para enviar e receber os sinais, sendo muito interessantes para aplicações em equipamentos eletrônicos que medem distância ou velocidade. Na Figura 9 é possível ver uma representação de como esse modo funciona.

Figura 9 – Modo de operação difuso



Fonte: Mazzaroppi (2007, p. 10)

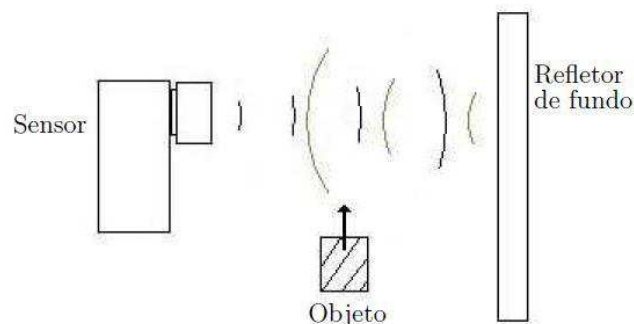
Outros modos de funcionamento existem, e, geralmente, são utilizados em aplicações industriais, onde, por vezes, se necessita detectar objetos que absorvem ou não refletem as ondas emitidas pelo sensor. Esses modos necessitam de um segundo transdutor, em outro encapsulamento, para servir de refletor ou receptor da onda emitida, o que acaba se tornando inviável em aplicações em dispositivos móveis e compactos.

Os sensores difuso a laser, por exemplo, têm grande problema para detectar objetos transparentes, como vidros, porque a onda atravessa o objeto e jamais volta ao sensor. Os ultrassônicos também possuem suas restrições com determinados tipos de materiais que absorvem ondas sonoras, como veludo, por exemplo.

2.3.3.2 Retro Reflexivo

O modo retro reflexivo utiliza também o mesmo encapsulamento com os transdutores, porém, necessita de um refletor para funcionar. Como é possível observar na Figura 10, o sensor está enviando e recebendo os sinais refletidos até o objeto interferir no caminho das ondas, desta forma, o objeto interrompe o sinal e o sensor detecta sua presença. (MAZZAROPPI, 2007).

Figura 10 – Modo de operação retro reflexivo

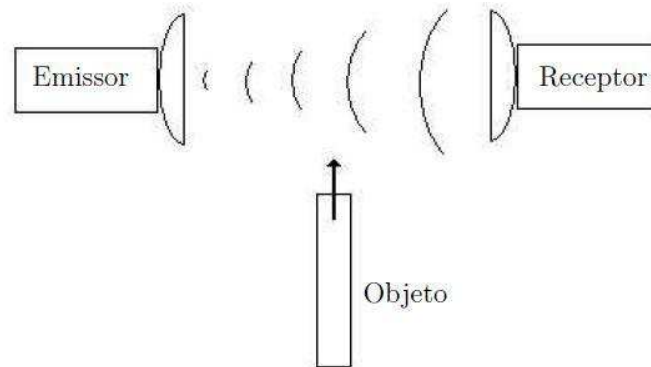


Fonte: Mazzaroppi (2007, p. 12)

2.3.3.3 Oposto

Já o modo de operação oposto, visto na Figura 11, possui os transdutores de transmissão e recepção em encapsulamentos separados, de modo que não necessita de um refletor. A detecção ocorre do mesmo modo que no retro reflexivo, quando o objeto interrompe o sinal.

Figura 11 – Modo de operação oposto



Fonte: Mazzaroppi (2007, p. 11)

E como conclusão desta parte, partindo de pesquisas realizadas em lojas e folhas de dados, serão citadas as divergências principais que levaram a escolha dos sensores do protótipo.

Têm-se opções de sensores ultrassônicos muito atrativas com um custo muito baixo comparativamente com os sensores ópticos (principalmente a laser), além da distância de detecção ser muito maior em sensores de preço similar. A área de detecção também é muito maior nos ultrassônicos, não sendo necessariamente uma vantagem, mas sim uma característica de cada sensor, desta forma, para se ter a mesma área de detecção de um sensor ultrassônico, seria preciso vários sensores a laser. Em contrapartida, pode-se afirmar que como o feixe emitido por esses sensores é mais focado, há menos problemas relacionados a detecção de mais de um objeto em uma distância parecida. Outro ponto negativo dos sensores ópticos a infravermelho, apesar de haver formas de compensar isso, é a maior vulnerabilidade a ruídos gerados pelo sol, lâmpadas fluorescentes e outros dispositivos que operam na faixa de frequência de IR e laser. Também, a detecção de vidros ou espelhos, por exemplo, pode se tornar um problema para sensores ópticos, apesar de ser possível resolver com “fusão sensorial”, utilizando sensores diferentes para compensar o problema e adequando o software. Os sensores ultrassônicos não têm esse problema, e, além disso, existem poucos materiais que absorvem ondas sonoras no perímetro urbano, tornando seu uso mais viável nesse sentido, porém, em ambientes fechados, o eco é um grande causador de confusões nas leituras. Um problema que também pode ocorrer nos ultrassônicos é o de interferências entre eles mesmos

quando se tem mais de um sensor operando na mesma frequência (como se fosse um eco gerado propositalmente por outro sensor), porém, isso pode ser compensado com software, mecanicamente no posicionamento dos sensores, ou utilizando sensores que operam em frequências diferentes.

2.4 INTRODUÇÃO À MICROMOTORES DE VIBRAÇÃO

Os micromotores de vibração vêm sendo usados desde os anos 60, onde, inicialmente, eram utilizados para massageadores. Com o passar do tempo, novas tecnologias foram surgindo e a partir dos anos 90, foi-se necessário acoplar esses motores a novos aparelhos que necessitavam de feedback tátil, como os celulares, por exemplo. Hoje, uma gama muito grande de equipamentos faz o uso desses motores, desde scanners, equipamentos médicos, GPS (*global positioning system*), controles remotos, *wearables*, e etc. Existem dois tipos básicos de motores de vibração: os ERM (*eccentric rotating mass*) e os LRA (*linear resonant actuator*). (PRECISION MICRODRIVES, [S. d.]a).

2.4.1 ERM – Eccentric Rotating Mass

Sendo os mais simples e comuns, os ERM são motores CC (corrente contínua) com uma massa desbalanceada e assimétrica colocada no eixo do motor, que, quando gira em rotações altas, cria uma força centrífuga que transmite a vibração ao objeto que o motor está acoplado. Como o objetivo dos motores é produzir força, existem várias formas físicas de se fazer isso, com diferentes encapsulamentos. O mais comum é o cilíndrico, exemplos são mostrados na Figura 12. Por serem muito versáteis, eles podem ser montados direto em PCIs (placas de circuito impresso), visto em (c), e também, ser encapsulados, visto em (b). (PRECISION MICRODRIVES, [S. d.]b).

Figura 12 – Motores ERM cilíndricos



(a) Cilíndrico

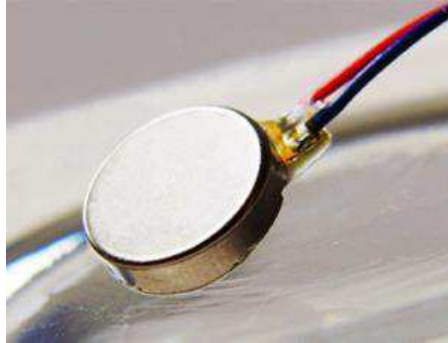
(b) Cilíndrico encapsulado

(c) Montado em PCI

Fonte: Adaptado de Precision Microdrives ([S. d.]a, [S. p.]

Outro formato muito utilizado é o de moeda, visto na Fotografia 7.

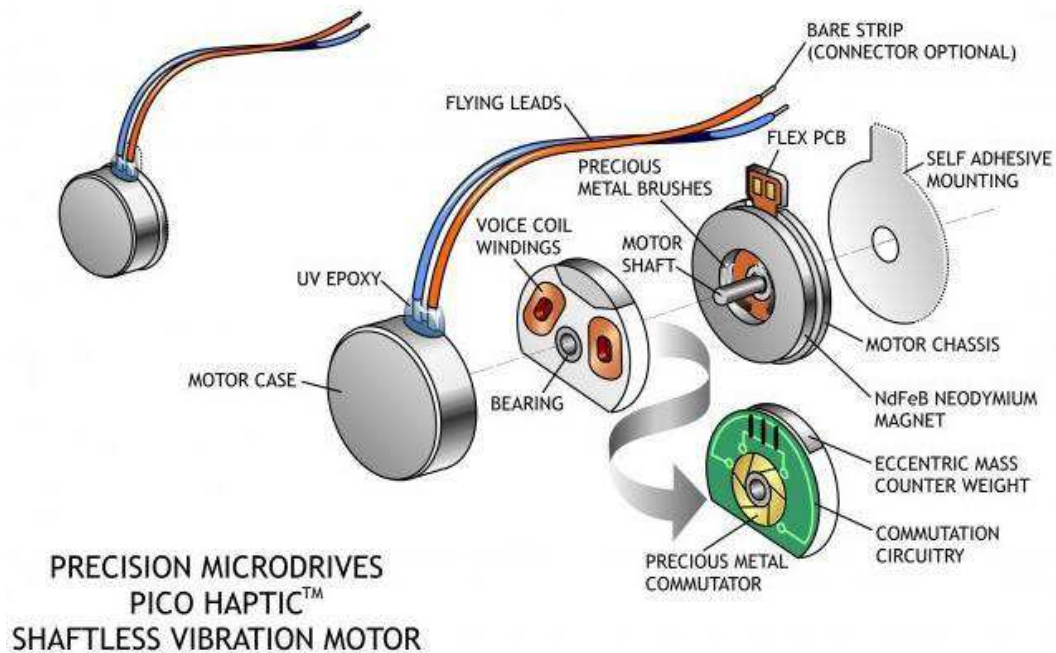
Fotografia 7 – Motor ERM moeda



Fonte: Precision Microdrives ([S. d.]a, [S. p.])

Funcionam da mesma forma que os cilíndricos, porém o motor com a massa desbalanceada fica no interior do encapsulamento, como é possível observar na Figura 13.

Figura 13 – Composição motor de vibração ERM



Fonte: Precision Microdrives ([S. d.]e, [S. p.])

A desvantagem desse formato, é que os motores são restritos na amplitude de vibração por serem muito compactos (possuem apenas alguns milímetros de altura), porém, o seu objetivo é operar em aplicações que o espaço é limitado. (PRECISION MICRODRIVES, [S. d.]a).

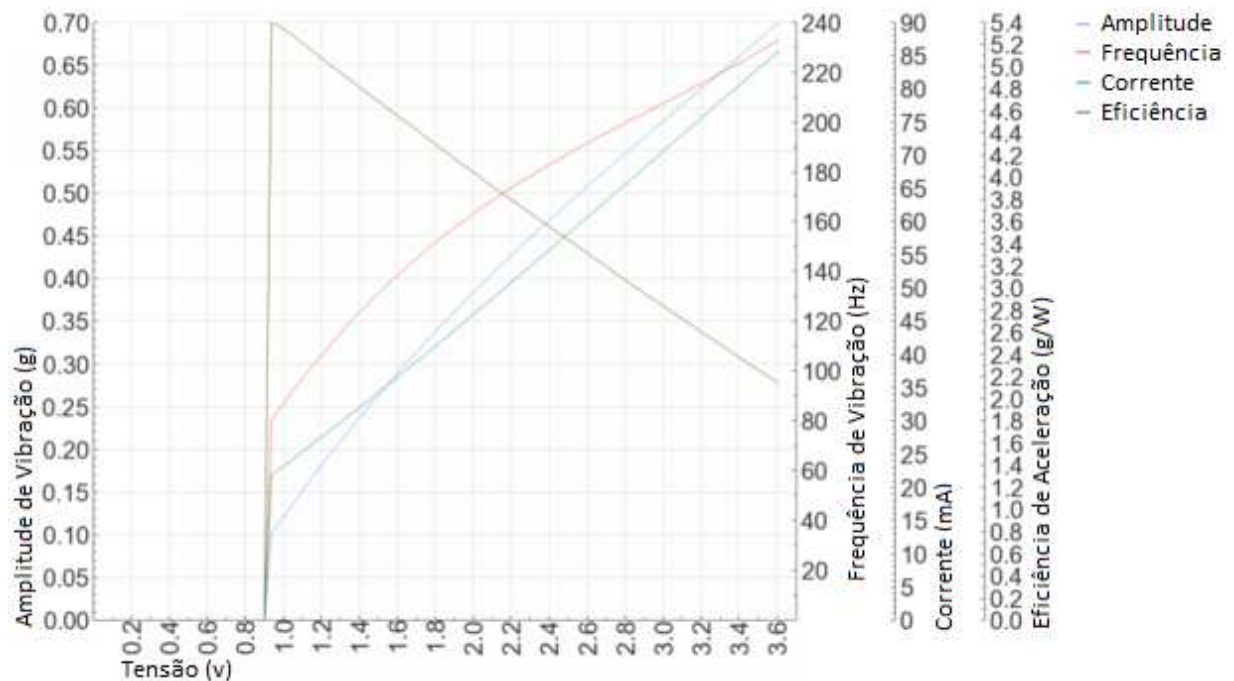
2.4.1.1 Controle de Motores ERM

A maneira mais simples de operar um motor ERM é alimentando-o com uma fonte CC. Uma tensão constante vai girar o motor a uma velocidade constante, e por consequência, a frequência e amplitude de vibração serão também constantes enquanto a fonte estiver ligada.

A corrente é proporcional ao torque de carga visto pelo motor. Quanto mais energia de vibração é “tirada” do motor, o torque requisitado para continuar girando a massa aumenta, aumentando também a corrente. Isso explica porque a corrente consumida por motores “presos” de maneira mais “solta” é maior que a consumida por motores “presos firmemente”, neste, menos energia vibratória é removida do motor. (PRECISION MICRODRIVES, [S. d.]b).

Os ERMs funcionam em uma grande faixa de tensões, porém, a tensão de partida deve ser observada para garantir que o motor vai ligar. No Gráfico 1 é possível observar o desempenho dos motores ERM, ao passo que a tensão de alimentação é incrementada, a frequência de vibração aumenta proporcionalmente, e a amplitude de vibração quadraticamente.

Gráfico 1 – Desempenho dos motores ERM



Fonte: Adaptado de Precision Microdrives ([S. d.]b, [S. p.]

2.4.2 LRA – Linear Resonant Actuator

Apesar de serem muito parecidos com ERMs no formato de moeda, como é possível ver na Fotografia 8, os LRAs não utilizam uma massa desbalanceada para criar a força necessária para vibrar, eles utilizam campos magnéticos e corrente elétrica para tal.

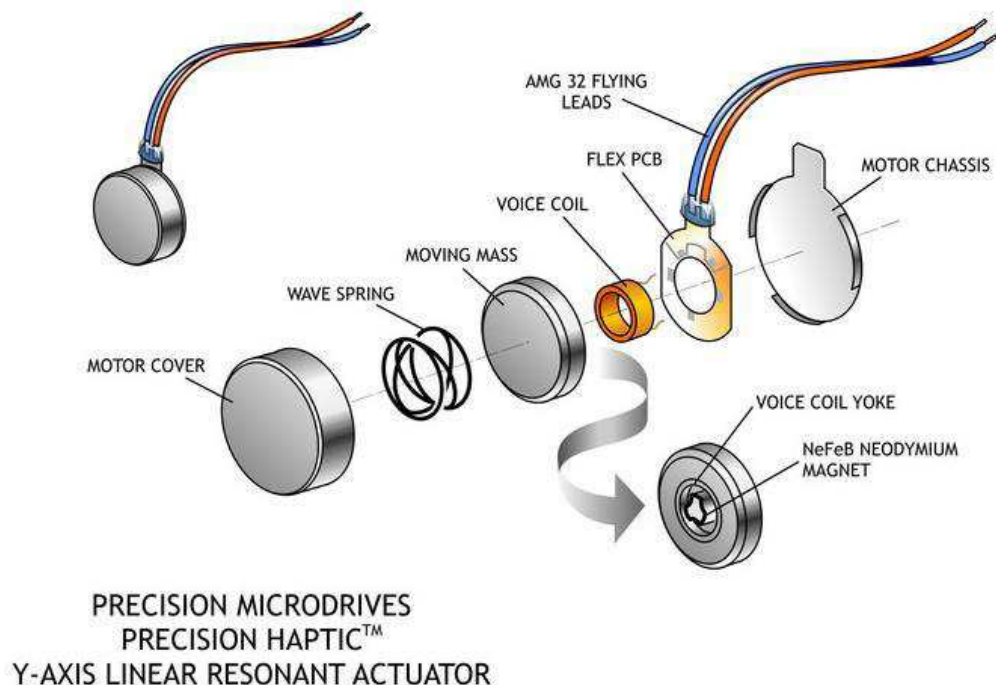
Fotografia 8 – Motor de vibração LRA



Fonte: Precision Microdrives ([S. d.]a, [S. p.])

Eles têm uma massa magnética acoplada a uma mola, controlada por uma bobina de voz, similar a um alto-falante, como é possível observar na Figura 14. A bobina se mantém estática e a massa magnética se move, e, como a massa está acoplada a mola, ela acaba retornando de volta a posição anterior. Esse deslocamento de massa gera a força de vibração. Isso implica que os LRAs sejam muito eficientes, tem excelente resposta, duram mais e são controlados de maneira diferente aos motores ERMs. (PRECISION MICRODRIVES, [S. d.]d).

Figura 14 – Composição motor de vibração LRA

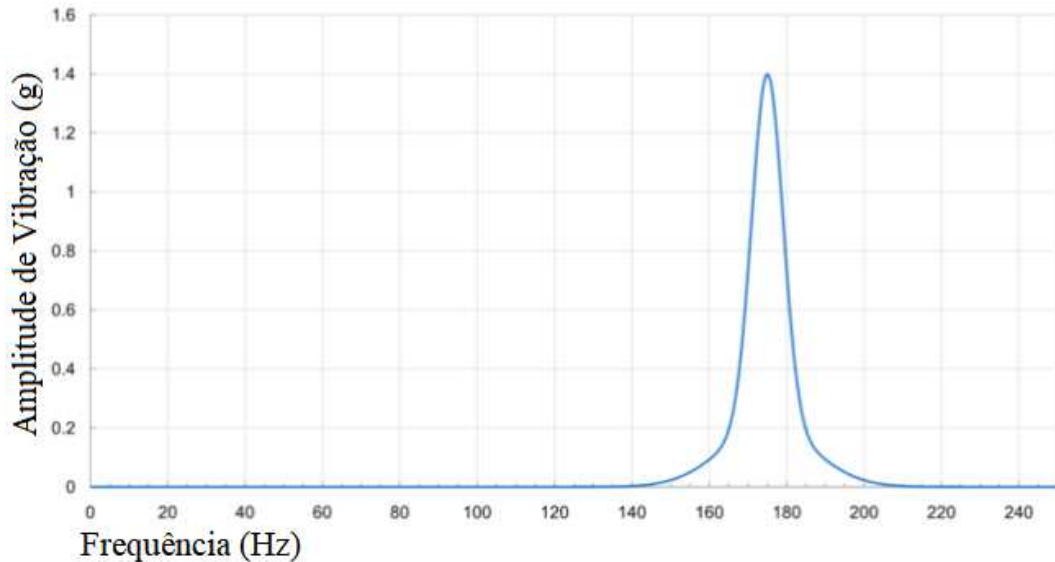


Fonte: Precision Microdrives ([S. d.]c, [S. p.])

Nota-se que, o fato de se ter um componente oscilando em uma mola gera uma frequência de ressonância. No Gráfico 2 é possível observar que a maior amplitude de vibração se dá na

frequência natural de ressonância, sendo o ponto em que o motor será mais eficiente. (PRECISION MICRODRIVES, [S. d.]c).

Gráfico 2 – Resposta em frequência do motor LRA



Fonte: Adaptado de Precision Microdrives ([S. d.]c, [S. p.])

2.4.2.1 Controle de Motores LRA

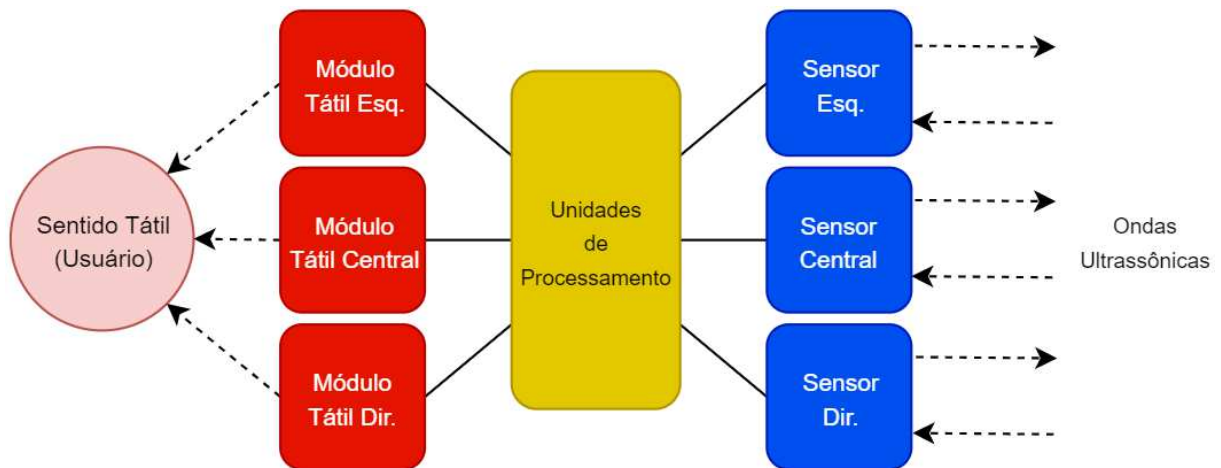
Os motores LRA requerem tensão CA (corrente alternada) para funcionar, e é preferível variar a intensidade de vibração através amplitude do sinal, ou seja, a frequência de vibração sempre será a mesma, só a amplitude da vibração irá mudar, diferentemente dos motores ERM, em que ambas são casadas. A frequência da tensão CA deve ser igual a da frequência natural de ressonância do motor. A maneira mais simples de controlar um LRA é com um gerador de sinais e um amplificador. Porém, devido a sua estrutura ser compacta, esses motores são escolhidos para operar em dispositivos que geralmente não possuem gerador de sinais. Para criar um sinal CA com eletrônica digital, utiliza-se um conversor digital-analógico (DAC) ou um sinal PWM (*pulse width modulation*) filtrado. (PRECISION MICRODRIVES, [S. d.]d).

Em geral, os LRAs são superiores que os ERMs, o grande porém, é tempo de parada. Os LRAs tendem a ser mais lentos, devido ao fato de que as molas são ótimas acumuladoras de energia e causam a massa magnética levar mais tempo para parar. Isso pode ser melhorado acrescentando 180° ao sinal senoidal de acionamento, criando uma força eletromagnética contrária a da rotação da massa, causando uma parada brusca (nos ERMs isso é feito revertendo a polaridade da alimentação). (PRECISION MICRODRIVES, [S. d.]d).

3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

O dispositivo compromete-se em detectar obstáculos utilizando sensores ultrassônicos e informar o usuário da presença dos mesmos através de motores de vibração, em uma estrutura mecânica posicionada em sua cabeça. Com isso, foram utilizados três “pares” de sensores e motores. Os componentes são casados no sentido de que quando, por exemplo, o sensor frontal detecta um objeto, o motor frontal vibra; quando o sensor da direita detecta um objeto, o motor da direita vibra; e a mesma lógica vale para o “par” da esquerda. Na Figura 15 é exibido o diagrama funcional do projeto.

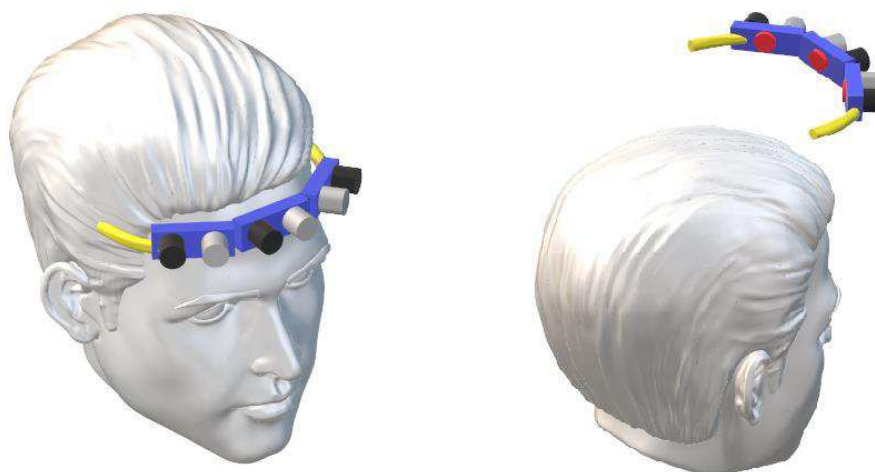
Figura 15 – Diagrama funcional do projeto



Fonte: O autor (2019)

No diagrama funcional, tem-se o bloco de “Sentido Tátil”, que, no caso, representa a cabeça do usuário, os “Módulos Táteis” são os motores de vibração que têm sua intensidade de vibração controlada pelas “Unidades de Processamento”, este bloco agrega todos os microcontroladores presentes (incluindo os microcontroladores internos dos módulos ultrassônicos), responsáveis por controlar todos os periféricos. Por último, estão retratados os três sensores ultrassônicos, com a emissão e reflexão das ondas ultrassônicas. Na Figura 16 são exibidas duas ilustrações da disposição de cada “casal” de sensor e motor do protótipo, visando entendimento do posicionamento deles na estrutura e como a mesma fica na cabeça do usuário.

Figura 16 – Ilustração dos componentes no protótipo



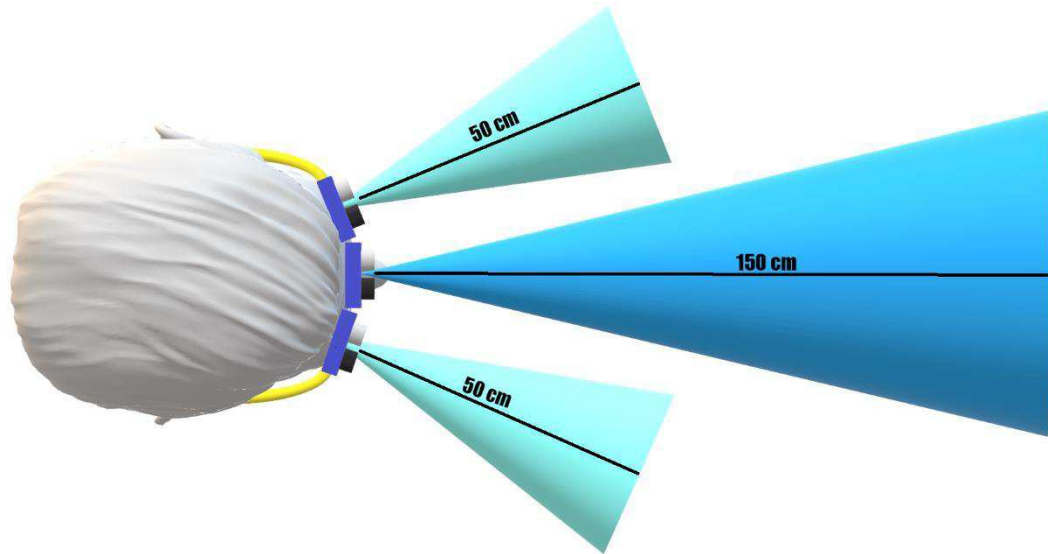
Fonte: O autor (2019)

Observa-se na Figura 16, os motores de vibração em **vermelho** e os módulos ultrassônicos em **azul**, com seus transdutores preto e cinza.

Em termos de projeto, foi definido que **apenas o motor frontal** deve variar sua intensidade de vibração de acordo com a distância do objeto detectado pelo seu respectivo sensor. Essa variação de intensidade da vibração do motor é inversamente proporcional à distância, ou seja, quanto menor a distância em que o objeto se encontra, mais o usuário deve sentir a vibração do motor.

Os motores “laterais”, somente alertam o usuário quando ele já está muito próximo a algum objeto. Na Figura 17 tem-se uma ilustração das áreas de detecção. Isso foi estabelecido pelo fato de que conforme se aumenta a distância de detecção desses sensores laterais, seus feixes de ultrassom acabam cruzando com o feixe do sensor frontal (devido a “imperfeições” na estrutura mecânica do protótipo), e desta forma, fica muito difícil perceber a posição do obstáculo detectado, porque mesmo que o obstáculo esteja na frente do usuário, os sensores laterais podem captá-lo e acabar confundindo o usuário enviando um *feedback* desnecessário pelos motores de vibração. Além do mais, esses alertas são estáticos, isto é, não variam conforme a distância. Isso foi determinado pela dificuldade em perceber o *feedback* de quais dos motores estão variando a intensidade de vibração, e, conseqüentemente, sabendo que somente o sensor frontal varia, o uso do protótipo se torna mais intuitivo. A ideia é que o usuário se guie pela resposta do sensor frontal, que já é relativamente confiável (considerando as limitações das ondas ultrassônicas), e, caso chegue muito próximo a um objeto, os sensores laterais devem entrar em ação, reforçando a detecção de tal objeto e ajudando a definir qual direção está livre.

Figura 17 – Área de detecção do protótipo

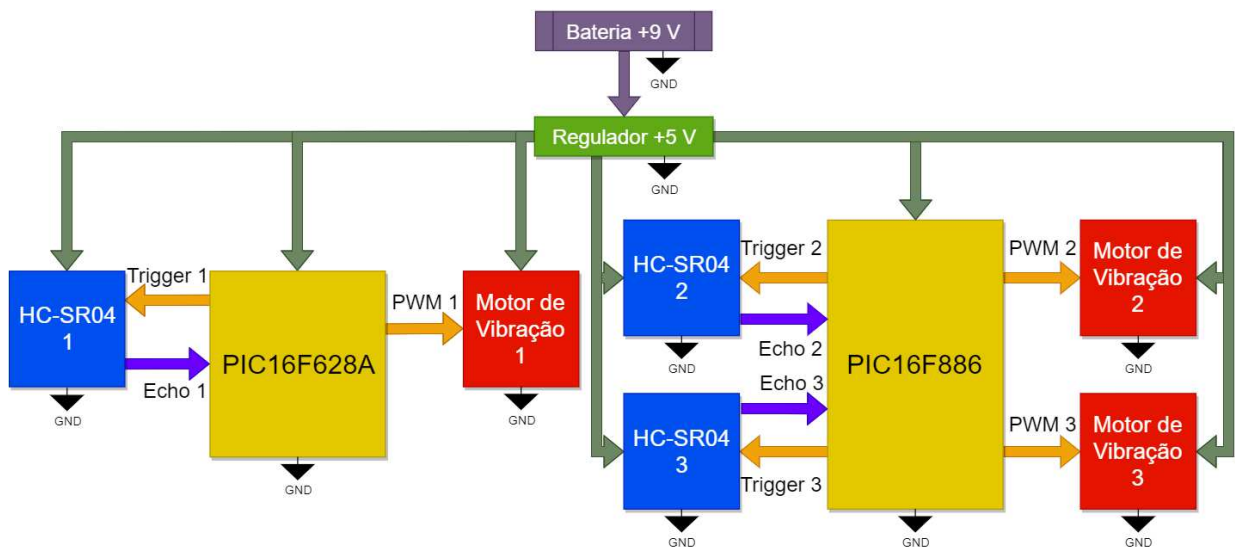


Fonte: O autor (2019)

A Figura 17 é uma representação da área de detecção do protótipo. Pode-se observar que a distância de detecção do sensor frontal é maior e foi estipulada em 150 cm, e as dos laterais, 50 cm. Mais adiante, no capítulo de Resultados, na parte em que se fala sobre os testes feitos com o protótipo, esse assunto é melhor clarificado.

Foram utilizados dois microcontroladores no projeto, um controla somente o “casal” sensor-motor frontal, e o outro é responsável pelos laterais. Na Figura 18 observa-se o diagrama de blocos do sistema, onde isso fica visível. O motivo dessa escolha ter sido feita é explicado no subcapítulo em que se fala dos microcontroladores.

Figura 18 – Diagrama de blocos do sistema



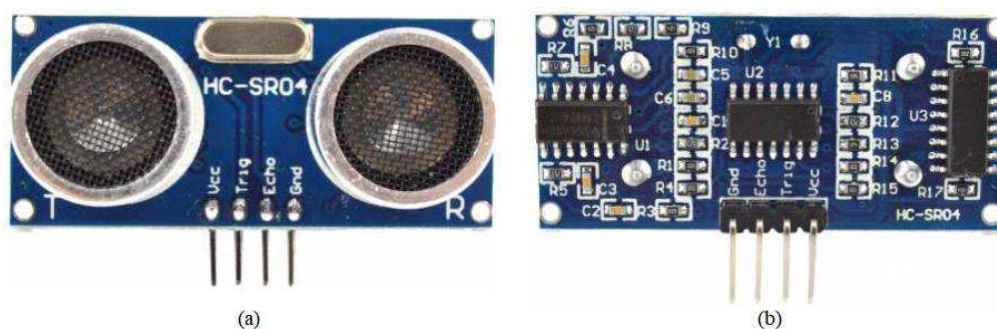
Fonte: O autor (2019)

Uma observação importante a ser feita sobre esses sensores em específico, é que, obrigatoriamente, pelo seu modo de funcionamento, eles detectam objetos a até 4 metros de distância em todas as medições. A “área de detecção” é definida via software, monitorando as distâncias detectadas e ativando os motores correspondentes com a intensidade programada de acordo com essas distâncias. Ou seja, não há como limitar a distância em que o sensor vai detectar, só a distância em que os motores começam a funcionar.

3.1 SENSOR ULTRASSÔNICO HC-SR04

Após avaliar alguns sensores disponíveis no mercado, tanto em lojas nacionais quanto estrangeiras, o custo e disponibilidade pesaram muito na escolha do HC-SR04, uma imagem do mesmo pode ser vista na Figura 19. Existem sensores que prometem ser mais capazes, com mais opções de comunicação, porém, mesmo na China, o mais barato encontrado, custava muito mais do que um HC-SR04 no Brasil. Ainda, como deve-se planejar possíveis adversidades em um projeto, foi optado por não arriscar depender de prazo de importação e assim, perder tempo. Também, sensores reserva deveriam ser comprados, tornando mais inviável ainda a compra de sensores mais caros. Portanto, foram comprados cinco HC-SR04, onde 3 iriam para o projeto e 2 seriam reserva.

Figura 19 – HC-SR04



Fonte: Adaptado de PC Services (2018, [S. p.]

Em (a) uma visão da parte frontal do módulo e em (b) a visão da parte de trás.

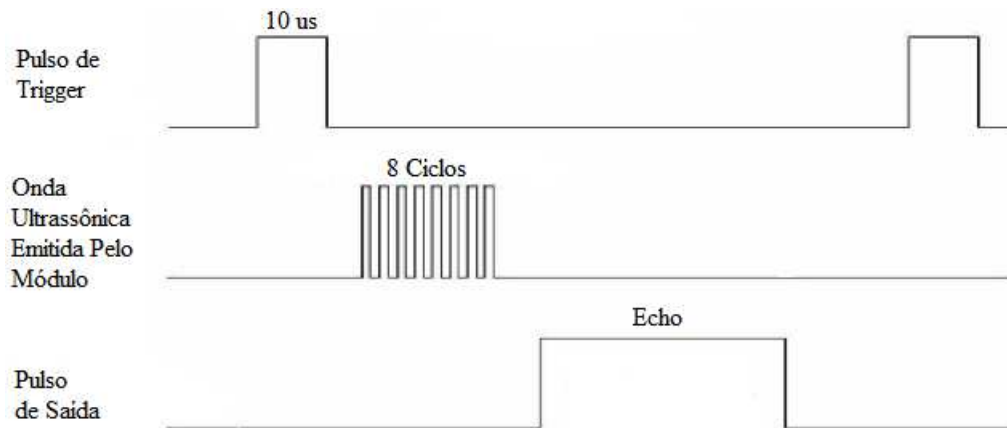
Segundo a folha de dados (Elec Freaks), o sensor possui as seguintes características:

- Tensão de funcionamento: 5 V;
- Consumo de corrente: 15 mA;
- Frequência de operação: 40 kHz;

- Distância mínima de detecção: 2 cm;
- Distância máxima de detecção: 4 m;
- Ângulo de medição: 15 graus (em formato de cone).

Um diagrama de estados do sensor é mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Diagrama de estados HC-SR04



Fonte: Adaptado de Elec Freaks ([S. d.], [S. p.]

Quando o pino “Trig” é mantido em nível lógico alto por 10 us, o sensor emite 8 pulsos de onda de 40 kHz e coloca o pino “Echo” em nível lógico alto. Quando um objeto é detectado, o pino “Echo” retorna para nível lógico baixo. Se nenhum objeto for detectado, deve-se respeitar o período completo até o pino de “Echo” retornar a nível lógico baixo. A distância do objeto é calculada através da equação (2). (PC SERVICES, 2018).

$$D = \frac{T_h * 340}{2} \quad (2)$$

Onde D é a distância em metros, T_h é o tempo em segundos que o pino “Echo” fica em nível lógico alto, 340 é a velocidade do som em m/s (em uma determinada altitude, temperatura e pressão atmosférica), e é dividido por 2 porque o tempo é referente a ida e vinda do sinal. A equação (2) é para um caso particular, o mais comum, onde são desprezadas outras variáveis que interferem na velocidade de propagação das ondas.

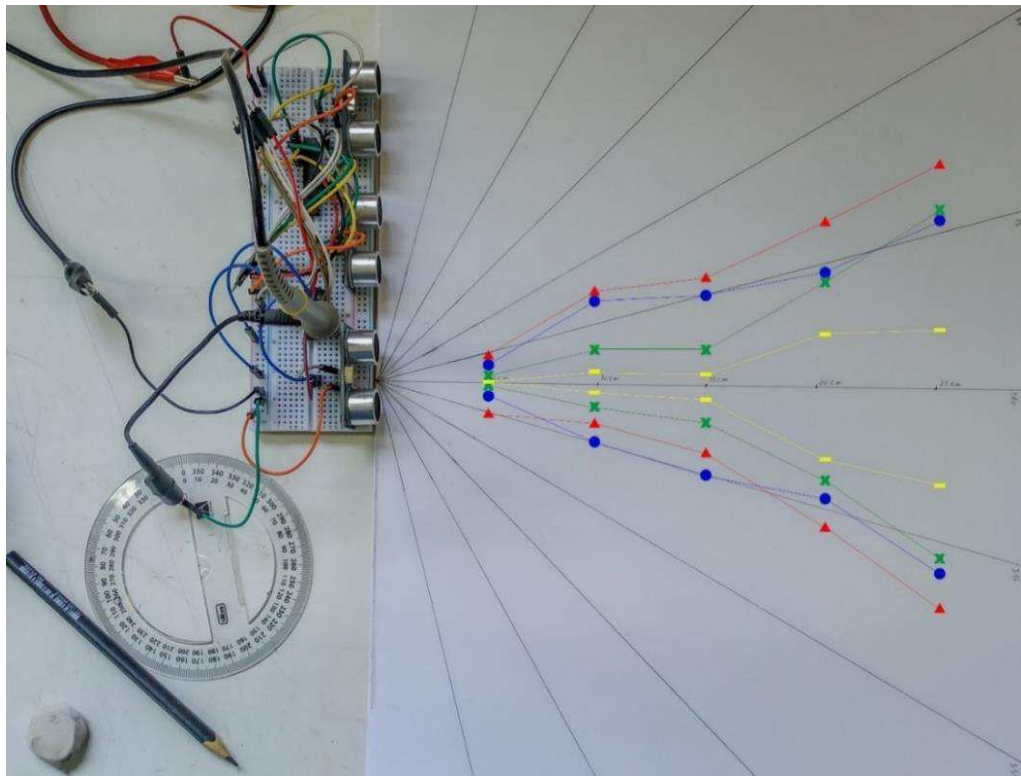
3.1.1 Testes com o HC-SR04

Embora o HC-SR04 esteja entre os sensores ultrassônicos mais utilizados na eletrônica, com inúmeros projetos disponíveis na internet, não há muitos documentos em que são

mostradas suas reais características e tolerâncias. O que é comum de acontecer, são relatos de usuários que obtiveram resultados diferentes do que dizem as folhas de dados. Também, a qualidade desses sensores é muito contestada, tanto em durabilidade quanto em precisão nas medições.

Não obstante, os cinco sensores adquiridos foram testados antes de iniciar qualquer teste com o projeto. Então, como a folha de dados diz que o ângulo de medição do sensor é de 15° , e, com diversos usuários contrariando isso, o primeiro teste realizado foi esse, como é possível observar na Fotografia 9.

Fotografia 9 – Teste do ângulo de medição dos sensores



Fonte: O autor (2019)

Na Fotografia 9, é mostrado como foi feito o teste de ângulo e os resultados obtidos.

Informações sobre o teste:

- Cada incremento de ângulo desenhado na folha é de 15° ;
- Os 4 sensores testados são diferenciados pela cor e símbolo;
- Os incrementos de distância foram a cada 5 cm;
- A cada incremento, um objeto era aproximado até o sensor começar a responder (sendo monitorado no osciloscópio);
- A distância máxima testada foi de 25 cm.

Observa-se que os sensores “vermelho (▲)”, “azul (●)” e “verde (X)” têm ângulos realmente superiores ao que a fabricante informa na folha de dados, próximos a 30°. Porém, o sensor “amarelo (—)”, teve um ângulo de medição bem próximo aos 15°, conforme determina o fabricante. O sensor “vermelho (▲)” por ser o com maior ângulo de detecção, foi escolhido para ser o sensor frontal do protótipo.

Três conclusões podem ser tiradas desse teste. A primeira, é que o sensor “amarelo (—)” tem comportamento atípico e é defeituoso. A segunda, é que seu ângulo está dentro dos parâmetros da folha de dados, desta forma, poderia ser considerado que a fabricante garante um ângulo mínimo de 15°. A terceira, a distância ensaiada é muito pequena para tirar conclusões, visto que o sensor “verde (X)” até a terceira aferição, em 15 cm, é bem limitado, e, a partir daí seu ângulo aumenta. O ideal seria continuar as medições em distâncias maiores, para se ter mesmo a confirmação desses dados, isso só não foi feito devido a falta de espaço dentro do laboratório, e, como é um local pequeno e fechado, em distâncias maiores o eco acaba se tornando muito presente e inviabilizando o experimento.

O segundo teste realizado foi o de qualidade das medições de distância do sensor. Este, não sendo tão controverso quanto o primeiro, foi feito apenas com um dos sensores, porque exatidão nos valores de distância medidos não são o foco do projeto. Uma tolerância pequena não prejudica o funcionamento do conjunto. Na Fotografia 10 tem-se uma representação visual de como o ensaio foi realizado. Um adendo que deve ser feito, é que a maior distância medida nesse teste, foi 30 cm, também, devido a fatores de espaço e eco.

Fotografia 10 – Teste de qualidade da medição de distância do sensor



Fonte: O autor (2019)

Informações sobre o teste:

- Foram feitas medições em 5, 15 e 30 cm;
- Em cada distância, foram feitas 5 capturas no osciloscópio para tirar uma média;

Os resultados obtidos dos testes de distância (visto na Fotografia 10) são exibidos na Tabela 1.

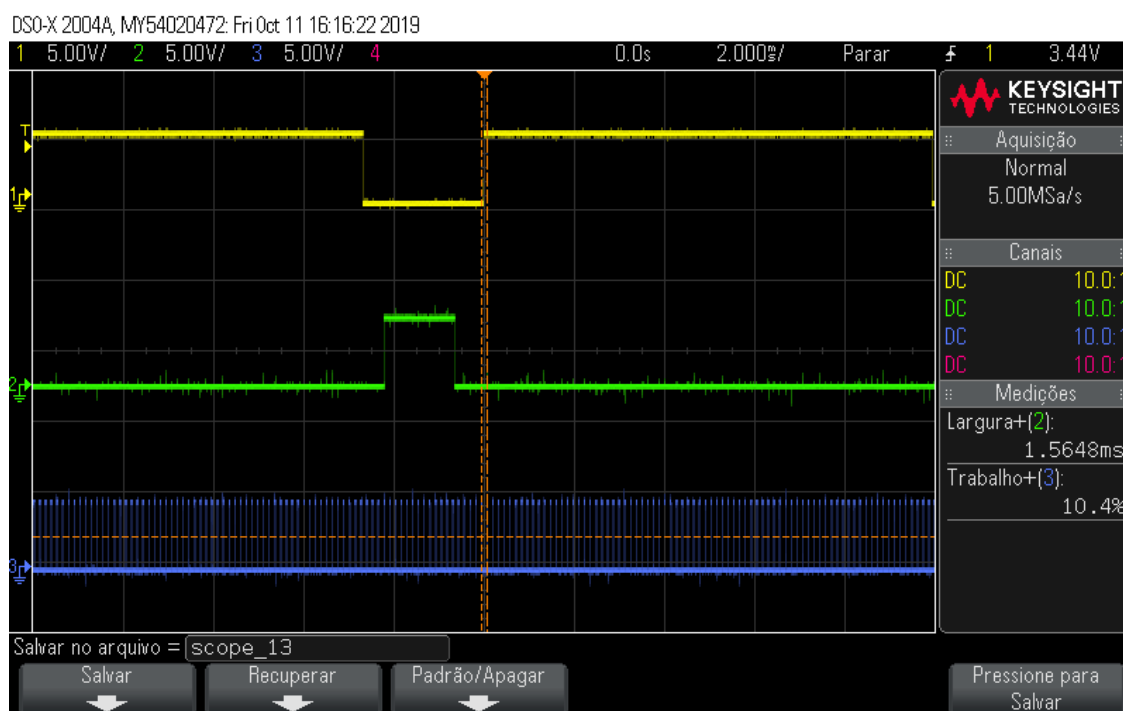
Tabela 1 – Resultados obtidos das aferições de distância

Medição	Tempo aferido	Distância Sensor (5 cm real)	Tempo aferido	Distância Sensor (15 cm real)	Tempo aferido	Distância Sensor (30 cm real)
1	0,255 ms	4,3 cm	0,898 ms	15,2 cm	1,565 ms	26,6 cm
2	0,267 ms	4,5 cm	0,949 ms	16,1 cm	1,588 ms	26,9 cm
3	0,278 ms	4,7 cm	0,976 ms	16,5 cm	1,640 ms	27,8 cm
4	0,267 ms	4,5 cm	0,921 ms	15,6 cm	1,586 ms	26,9 cm
5	0,262 ms	4,4 cm	0,887 ms	15,1 cm	1,622 ms	27,5 cm
Média	0.2658	4.48	0.9262	15.7	1,6002	27.14
Variância	0.00007	0.022	0.00134	0.355	0.00091	0.243
Desvio padrão	0.00841	0.14832	0.0366	0.59582	0.0302	0.49295

Fonte: O autor (2019)

A distância “real” é a medida pela trena, a “Distância sensor” é a distância que o sensor mede (sem qualquer compensação) e foi calculada utilizando a equação (2) com cada tempo correspondente. Observando os dados de variância e desvio padrão, confirma-se que o sensor possui uma relativa consistência entre uma medição e outra. Porém, é notável que o sensor não é muito exato quando se compara a distância aferida com a distância real do experimento. Tal problema pode ser compensado com software, onde, habitualmente, se coloca uma constante à equação do cálculo da distância. Entretanto, nota-se que nas distâncias aferidas em 5 e 30 cm, o sensor apresentou um resultado inferior ao valor real, e, em 15 cm, o resultado apresentado foi maior que o real, ou seja, o erro que o sensor apresenta nas medições não é linear, e, com isso, deve-se ter cuidado ao utilizar uma constante para corrigir esse problema. Na Figura 21 é exibida uma das capturas no osciloscópio.

Figura 21 – Captura no osciloscópio de uma das medições



Fonte: O autor (2019)

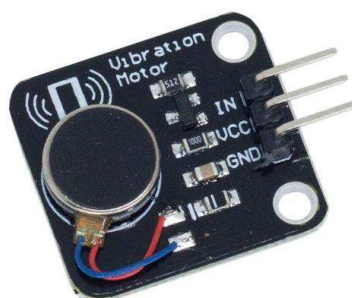
Onde o sinal **amarelo** é o pulso de “Trigger” gerado pelo microcontrolador, o sinal **verde** é o sinal de “Echo”, e o **azul** é um teste de controle dos motores com PWM, este deve ser ignorado por enquanto. Uma observação a ser feita é que, por algum motivo, quando eram usados mais de um sensor em um mesmo microcontrolador, notou-se que os sensores não eram gatilhados todas as vezes quando eram gerados quaisquer pulsos de trigger menores que 5 ms. Assim, foi definido que o pulso de trigger deveria ser de 10 ms. Isso ocasiona uma certa desvantagem, visto que cada aferição é feita após cada borda de descida de trigger. Como é possível ver na Figura 21, o tempo total até a próxima aferição será de aproximadamente 12 ms (em uma medição de 30 cm). Este sendo um tempo “gigante”, considerando que, se o trigger fosse de 10 us, esse tempo seria inferior a 2 ms para a mesma distância. Mas, de qualquer forma, esses tempos são muito pequenos para um ser humano perceber a diferença na prática.

3.2 MÓDULO MOTOR DE VIBRAÇÃO

O critério principal de escolha dos motores, é que eles deveriam ter o formato de “moeda”. Secundariamente, o tamanho compacto e a possibilidade de controlar com PWM. Então, como praticamente todos os motores de vibração “moeda” se enquadram nesses critérios secundários, assim como com os sensores ultrassônicos, a disponibilidade de mercado foi um o fator

determinante na escolha. Pesquisando em lojas de eletrônica, um módulo completo de motor de vibração se tornou bastante atrativo, por já vir pronto para ser usado, com as conexões necessárias já disponíveis em pinos e por ser aparentemente bem robusto, como é possível ver na Fotografia 11. As únicas desvantagens são o tamanho maior se comparado com somente o motor e o preço. Mas ainda assim, o tamanho é bem compacto e o preço não é tão elevado. 4 motores foram adquiridos, onde 3 iriam ser usados no projeto e 1 seria reserva.

Fotografia 11 – Módulo motor de vibração



Fonte: Filipeflop ([S. d.], [S. p.]

Segundo uma loja virtual que comercializa o motor (Filipeflop), ele possui as seguintes características:

- Tensão de operação: de 3,7 a 5,3 V;
- Corrente de operação: 60 mA (90 mA, no máximo);
- Velocidade de rotação: 9000 RPM;
- Dimensão total: 21 mm x 23 mm x 5 mm (sem os pinos).

Falta muita informação na internet sobre esse módulo, tanto que não foi encontrada nenhuma folha de dados. Então, foi necessário analisar o comportamento do módulo antes de colocá-lo no projeto.

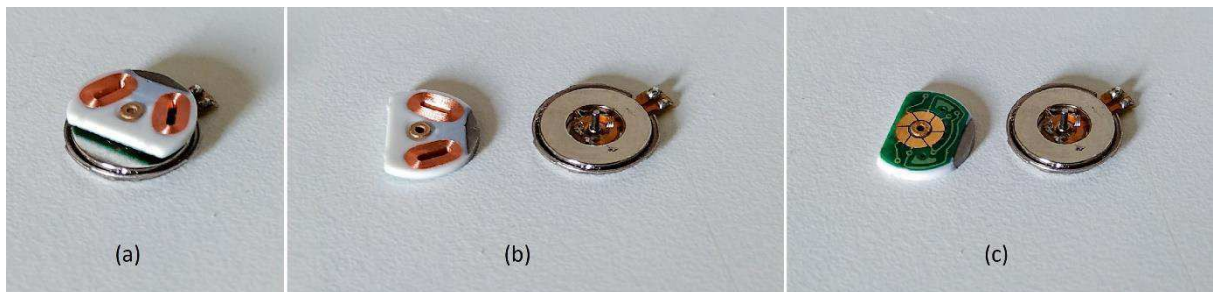
3.2.1 Testes com o Módulo

Dos ensaios realizados com o módulo, foi possível observar algumas particularidades. O motor, controlado por PWM, só começa a responder efetivamente com ciclos de trabalho superiores a 50%, antes disso, ele aparenta não variar a intensidade de vibração e vibra extremamente fraco. Outra característica encontrada, é que quanto maior a frequência do PWM, mais “suave” fica a vibração do motor, em contrapartida, em frequências mais elevadas (acima de 1 kHz), o motor demora cada vez mais para responder ao estímulo da variação do ciclo de

trabalho, necessitando as vezes de um ciclo de trabalho próximo a 80% para começar a variar a vibração. Também, é bastante notável o barulho que o motor faz em frequências entre 1 kHz e 18 kHz. Fora desta faixa, o autor do trabalho não percebeu qualquer barulho. Então, sabendo dessas limitações do módulo, foi estabelecido que a frequência do PWM de controle deve ser inferior a 1 kHz.

A qualidade desses módulos também é questionada, visto que um deles parou de funcionar repentinamente, e, aproveitando a situação, o motor foi retirado do módulo e aberto. Na Figura 22 fica explícito que se trata de um ERM.

Figura 22 – Motor aberto



Fonte: O autor (2019)

É possível observar na Figura 22 quase todas as partes que compõem um motor ERM, visto anteriormente na revisão de literatura sobre micromotores de vibração, na Figura 13. Em (a), o motor está montado, somente sem a parte superior do encapsulamento. Em (b), a massa girante foi retirada, sendo possível verificar que em uma extremidade há um material mais escuro, o contrapeso, sendo este o responsável por desbalancear o conjunto. Na outra metade do motor, notam-se o ímã, as escovas e o eixo. Em (c), é exibida a outra face da massa girante, onde fica visível o comutador.

3.3 MICROCONTROLADOR

Como já mencionado, foi dada uma grande atenção ao tamanho dos componentes que seriam colocados no protótipo, então, de início, o critério era utilizar um microcontrolador compacto, que atendesse as necessidades de I/Os, módulo PWM, Timers, Watchdog Timer (WDT), e a possibilidade de ser alimentado com +5 V, sem deixar de lado questões de custo e disponibilidade. Desta forma, foi estabelecido que seria utilizado um PIC, em razão da familiaridade em programar o mesmo e pelo fato de não necessitar compras, por haver disponível no almoxarifado da Engenharia Elétrica da Universidade de Passo Fundo.

Em um universo “programável”, sabe-se que existem diversas formas de resolver um mesmo problema, e neste projeto não foi diferente. Após a escolha do microcontrolador, um PIC16F628A, foram feitas várias tentativas de utilizar o mesmo, e, pelo fato de haver somente um módulo PWM, uma lógica de ativação foi feita para controlar os 3 motores. Esta lógica consistia no uso de um DEMUX (demultiplexador) 74LS155 e portas NOT 74LS04. Nota-se que essa configuração não satisfazia o critério inicial de tamanho dos componentes, visto que eram utilizados 3 CIs (Circuitos Integrados), mas, esse não era o principal problema. Pelo fato de 3 motores dividirem um PWM, o tempo que um motor passava desligado era duas vezes maior que o tempo ligado, e foi observado que esse delay entre as ativações deixava a vibração do motor muito fraca. Somando isso com a obrigação de utilizar 3 CIs, essa ideia foi descartada, e então, foi definido que o projeto ia contar com 2 microcontroladores, o PIC16F628A, e o novo integrante, PIC16F886, desta forma, eliminava-se o DEMUX e as portas NOT. Pelo fato do novo microcontrolador possuir 2 módulos PWM, na nova configuração tem-se 3 no total, isso tornou o controle dos motores mais fácil e melhor, porque agora cada motor tem seu próprio PWM, e isso permite que eles sejam ativados simultaneamente.

Uma observação a ser feita, é que após perceber a obrigatoriedade de 3 módulos PWM, alguns outros microcontroladores que serviriam perfeitamente para o projeto foram considerados, como o ATmega328p, que possui 6 módulos, e o PIC16F1503, que possui 4, porém, como mencionado acima, foi optado por não precisar comprar esses componentes, até porque, mesmo com 2 microcontroladores, sobra espaço na estrutura mecânica, como será visto no subcapítulo dedicado a ela.

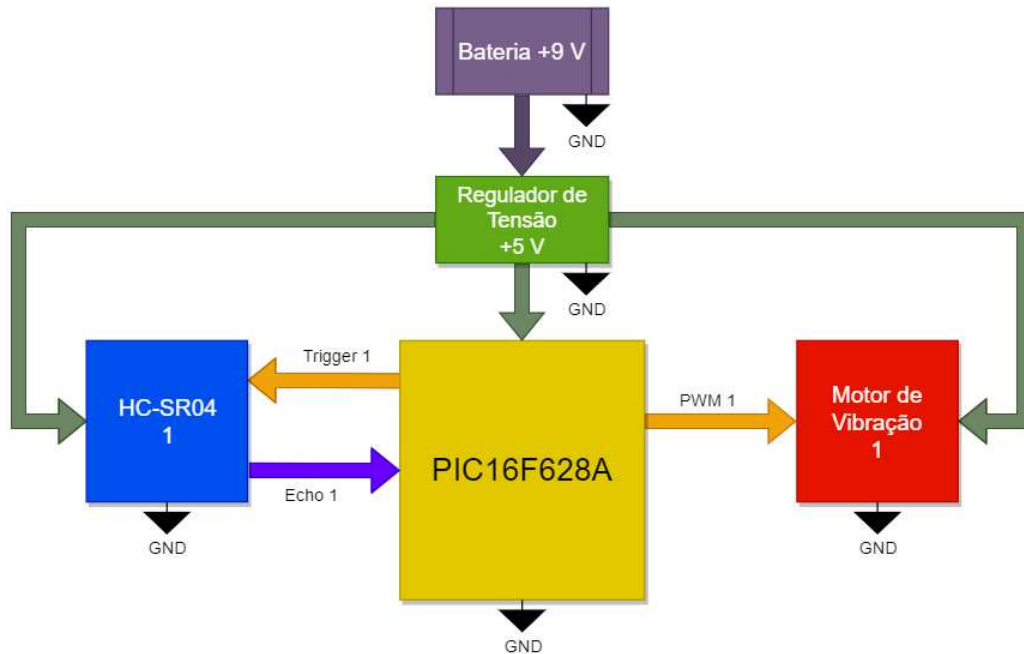
3.3.1 Módulo Frontal com PIC16F628A

O PIC16F628A se tornou interessante no projeto por possuir as seguintes características:

- Oscilador interno de 4 MHz;
- Watchdog Timer com oscilador independente;
- Tensão de operação: 2 V a 5,5 V;
- 16 pinos de I/O;
- Timer1 de 16 bits;
- Timer2 de 8 bits com prescaler;
- Módulo CCP com PWM (Timer2). (MICROCHIP, 2002).

O diagrama de blocos do módulo frontal do dispositivo é mostrado na Figura 23.

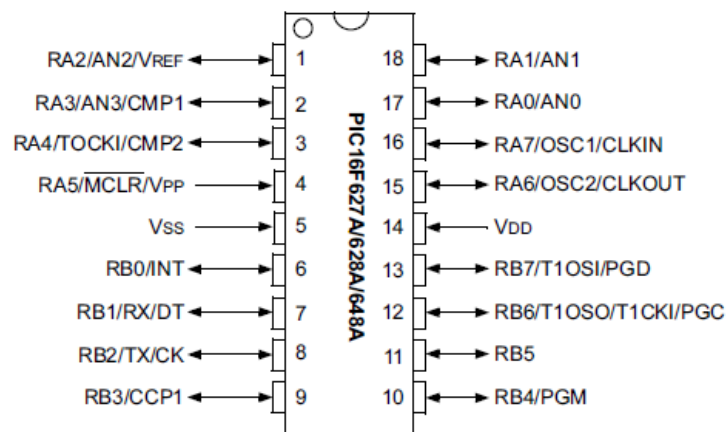
Figura 23 – Diagrama de blocos do módulo frontal do protótipo



Fonte: O autor (2019)

Sendo responsável por um sensor e um motor, foram utilizadas 2 portas I/O para o sensor (RA1 para “Trigger” e RB5 para “Echo”), e a saída do PWM (RB3) para o motor. O diagrama de pinos do microcontrolador em encapsulamento DIP é exibido na Figura 24.

Figura 24 – Diagrama de pinos PIC16F628A



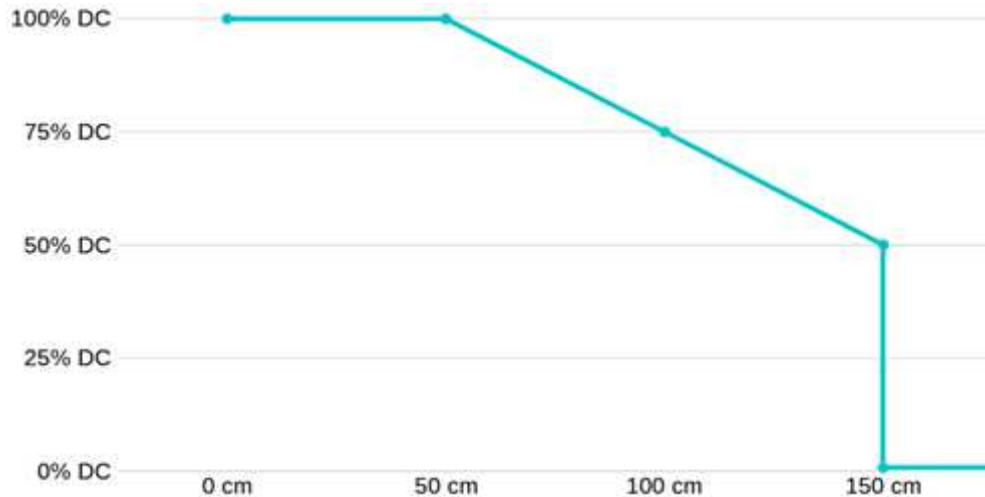
Fonte: Microchip (2002, p. 2)

Dos módulos citados anteriormente, o Timer1 é o timer responsável por medir o tempo em que o pino de “Echo” fica ativado e o Timer2 é utilizado pelo módulo PWM.

3.3.1.1 Controle do motor com PWM

Após certos experimentos com diferentes distâncias de detecção, foi estabelecido o Gráfico 3, em que o *duty cycle* (ciclo de trabalho) do PWM está em função da distância.

Gráfico 3 – *Duty cycle* em função de distância



Fonte: O autor (2019)

De 0 a 50 cm o *duty cycle* permanece em 100%, pois essa é uma distância considerada muito próxima, onde deve-se ter muita atenção. De 50 a 150 cm, o *duty cycle* varia. 150 cm é a distância considerada máxima de detecção, em distâncias maiores que isso, o motor não vibra. Um detalhe a ser observado, é que o motor, na distância máxima, já inicia vibrando com 50% de *duty cycle*, isso se deve pelo fato de que conforme os testes realizados, é onde o mesmo começa a responder corretamente ao controle PWM.

A frequência do PWM foi estabelecida em 250 Hz, visto que este é praticamente o limite do módulo PWM utilizando os 4 MHz do oscilador interno do PIC16F628A. Seu Timer2 possui um registrador de período de 8 bits e 3 opções de prescaler (1, 4 e 16). Utilizando a equação (3) pode-se calcular a frequência mínima do PWM.

$$F_{PWM} = \frac{F_{OSC}}{(PR2+1)*4*PS2} \quad (3)$$

Onde F_{PWM} é a frequência do PWM, F_{OSC} é a frequência de oscilação de 4 MHz e PR2 é o registrador de período de 8 bits (varia de 0 a 255) e PS2 é o *prescaler*.

Substituindo os termos na equação (3), tem-se:

$$F_{PWM} = \frac{4 \text{ MHz}}{(255+1)*4*16} \quad (3)$$

$$F_{PWM} = 244,14 \text{ Hz}$$

Essa é a frequência mínima que pode ser gerada com o PWM do PIC16F628A com o oscilador de 4 MHz. Após então definir que a frequência desejada seria de 250 Hz, a mesma equação foi aplicada, porém, neste caso, busca-se o valor do registrador de período (PR2).

$$250 \text{ Hz} = \frac{4 \text{ MHz}}{(PR2+1)*4*16} \quad (3)$$

$$PR2 = 249$$

Com o valor do registrador de período calculado, deve-se calcular o valor máximo do registrador de *duty cycle* através da equação (4).

$$DC_{PWM} = \frac{DCR}{(PR2+1)*4} \quad (4)$$

Onde DC_{PWM} é o valor do *duty cycle* em porcentagem (50% = 0.5, 100% = 1) e DCR é o valor do registrador de *duty cycle*. Substituindo os termos na equação (4), tem-se:

$$1 = \frac{DCR}{(249+1)*4} \quad (4)$$

$$DCR = 1000$$

Isso significa que para variar o *duty cycle* do PWM, deve-se variar o valor do registrador de 0 a 1000, onde 1000 corresponde a 100% de DC e 0 corresponde a 0%.

Calcula-se, então, a equação do *duty cycle* em função da distância através da equação (5), que é a equação geral da reta.

$$Y - Y_1 = m * (X - X_1) \quad (5)$$

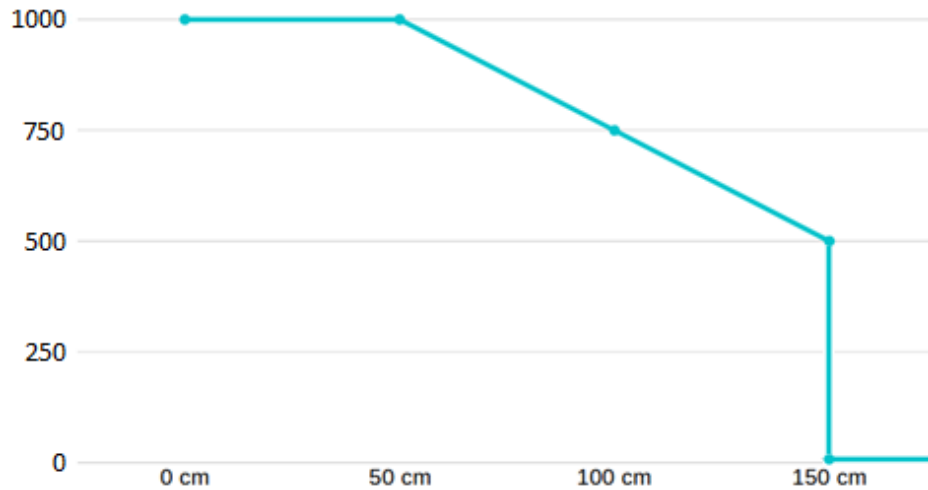
Onde Y_1 e X_1 são os pontos iniciais da reta e m é o coeficiente angular da reta, que é calculado pela equação (6).

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} \quad (6)$$

Onde Y_2 e X_2 são os pontos finais da reta.

Sabendo que o registrador de *duty cycle* varia de 0 a 1000 e a distância varia de 50 a 150 cm, o Gráfico 4 foi criado para representar o registrador de *duty cycle* em função da distância.

Gráfico 4 – Registrador de *duty cycle* em função da distância



Fonte: O autor (2019)

Observando o Gráfico 4, tem-se que os pontos iniciais da reta são $(X_1, Y_1) = (50, 1000)$ e os pontos finais são $(X_2, Y_2) = (150, 500)$. Substituindo esses termos na equação (6), calcula-se o coeficiente angular.

$$m = \frac{500 - 1000}{150 - 50} \quad (6)$$

$$m = -5$$

Substituindo os termos na equação (5) tem-se a equação da reta do registrador de *duty cycle* em função da distância, na equação (7).

$$Y - 1000 = -5 * (X - 50) \quad (5)$$

$$Y = -5 * X + 1250 \quad (7)$$

Onde Y é o valor do registrador de *duty cycle* e X é a distância em cm.

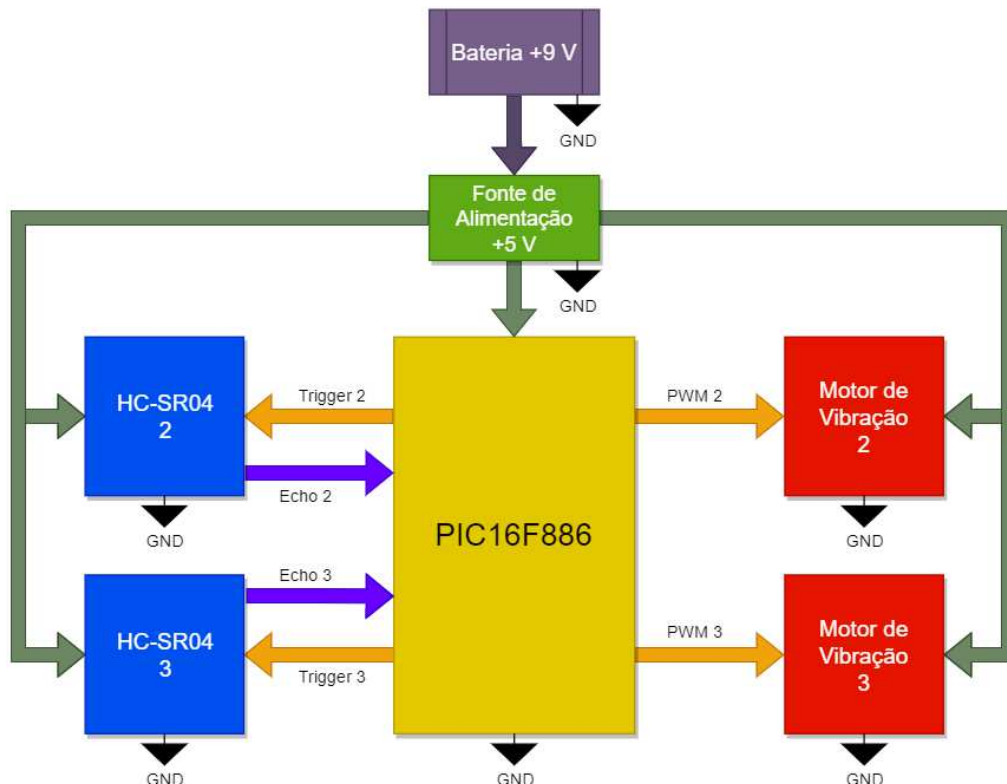
3.3.2 Módulos Laterais com PIC16F886

Dos dados do PIC16F886, o que é interessante ao projeto é o seguinte:

- Oscilador interno de 8 MHz;
- Watchdog Timer com oscilador independente;
- Tensão de operação: 2 V a 5,5 V;
- 24 pinos de I/O;
- Enhanced Timer1 de 16 bits;
- Timer2 de 8 bits com prescaler;
- Módulo ECCP com PWM+ (Timer2);
- Módulo CCP com PWM (Timer2). (MICROCHIP, 2009).

Um diagrama de blocos dos módulos laterais do dispositivo é mostrado na Figura 25.

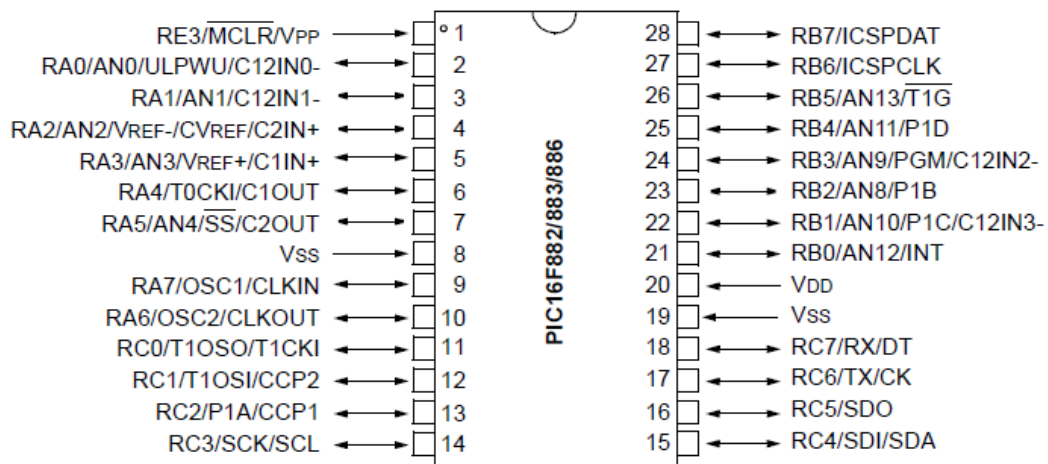
Figura 25 – Diagrama de blocos dos módulos laterais do protótipo



Fonte: O autor (2019)

O mesmo foi escolhido para controlar os módulos laterais do protótipo. Sendo responsável por dois sensores e dois motores, foram utilizadas 2 portas I/O para cada sensor (RA0 e RA1 como “Trigger” e RA2 e RA3 como “Echo”), e as duas saídas dos PWMs (RC2 e RC1) para os motores. O diagrama de pinos do microcontrolador em encapsulamento DIP é exibido na Figura 26.

Figura 26 – Diagrama de pinos PIC16F886



Fonte: Microchip (2009, p. 3)

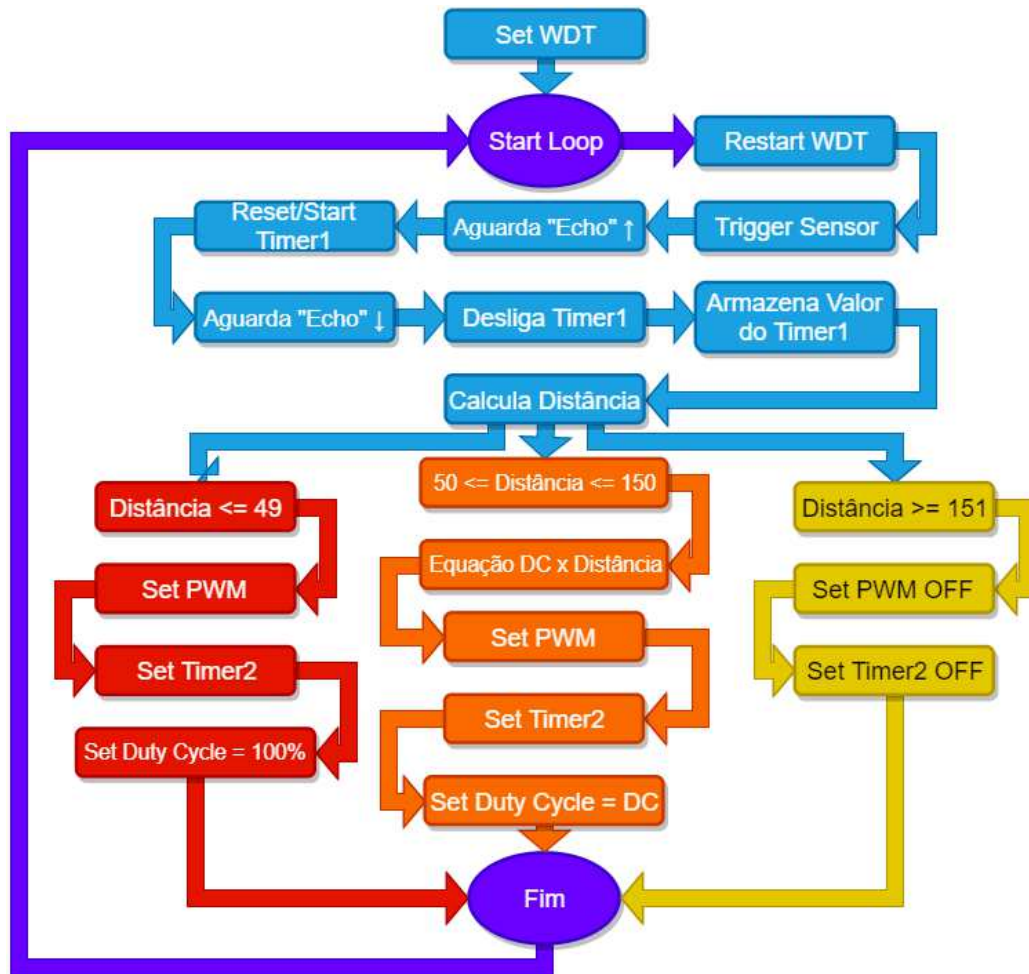
Dos módulos citados anteriormente, o Timer1 é o timer responsável por medir o tempo em que os pinos de “Echo” de ambos os sensores ficam ativados e o Timer2 é utilizado pelos módulos PWM.

Conforme previamente mencionado, os motores laterais não variam suas intensidades de vibração, as mesmas permanecem estáticas (os motores são basicamente on/off) e o *duty cycle* foi definido em 75%, pois assim, as vibrações laterais não são confundidas com a vibração frontal quando o obstáculo está a 50 cm ou menos do usuário.

3.4 SOFTWARE

Os códigos de ambos os microcontroladores foram compilados pelo CCS C Compiler, utilizando as *built-in functions* disponibilizadas pelo mesmo e gravados através do PicKit3. Programar a nível de registradores não se tornou necessário pelo fato de que os códigos criados não ocupam muita memória RAM. Também, nenhuma interrupção disponível pelos microcontroladores foi utilizada. Os fluxogramas de software de cada microcontrolador são apresentados aqui, na Figura 27 é exibido o fluxograma do módulo frontal, que possui somente um sensor e um motor.

Figura 27 – Fluxograma do módulo frontal



Fonte: O autor (2019)

O programa inicia configurando o tempo do WDT e já entra no loop principal. O loop inicia reiniciando o WDT, e então, envia o sinal de “Trigger” para o sensor e fica aguardando o sensor responder (quando o pino de “Echo” vai para nível lógico alto). Assim que “Echo” muda de estado, o Timer1 é resetado e inicia a contagem de tempo até o “Echo” voltar para nível lógico baixo, então, o Timer1 é desligado e seu valor é armazenado em uma variável. Isso significa que a medição de distância do sensor está completa. Em seguida, esse tempo deve ser transformado em distância. Sabendo que o tempo medido pelo Timer1 é dado pela equação (8).

$$Time = (TMR1H:TMR1L) * \frac{4}{F_{OSC}} * PS1 \quad (8)$$

Onde $(TMR1H:TMR1L)$ é o *buffer* que armazena as contagens do Timer1 e $PS1$ é o *prescaler*. Substituindo os termos na equação (8), com $F_{OSC} = 4 \text{ MHz}$ e $PS1 = 1$, obtém-se, na equação (9), o tempo em nível lógico alto:

$$Time = (TMR1H:TMR1L) * \frac{4}{4 MHz} * 1 \quad (8)$$

$$Time = \frac{(TMR1H:TMR1L)}{1 MHz} \quad (9)$$

Substituindo o *Time* na equação (2), da velocidade da propagação das ondas sonoras e considerando a velocidade do som 34000 cm/s, tem-se a distância em cm na equação (10):

$$D = \frac{(TMR1H:TMR1L)*34000 cm/s}{1 MHz*2} \quad (2)$$

$$D = \frac{(TMR1H:TMR1L)}{58,82} \quad (10)$$

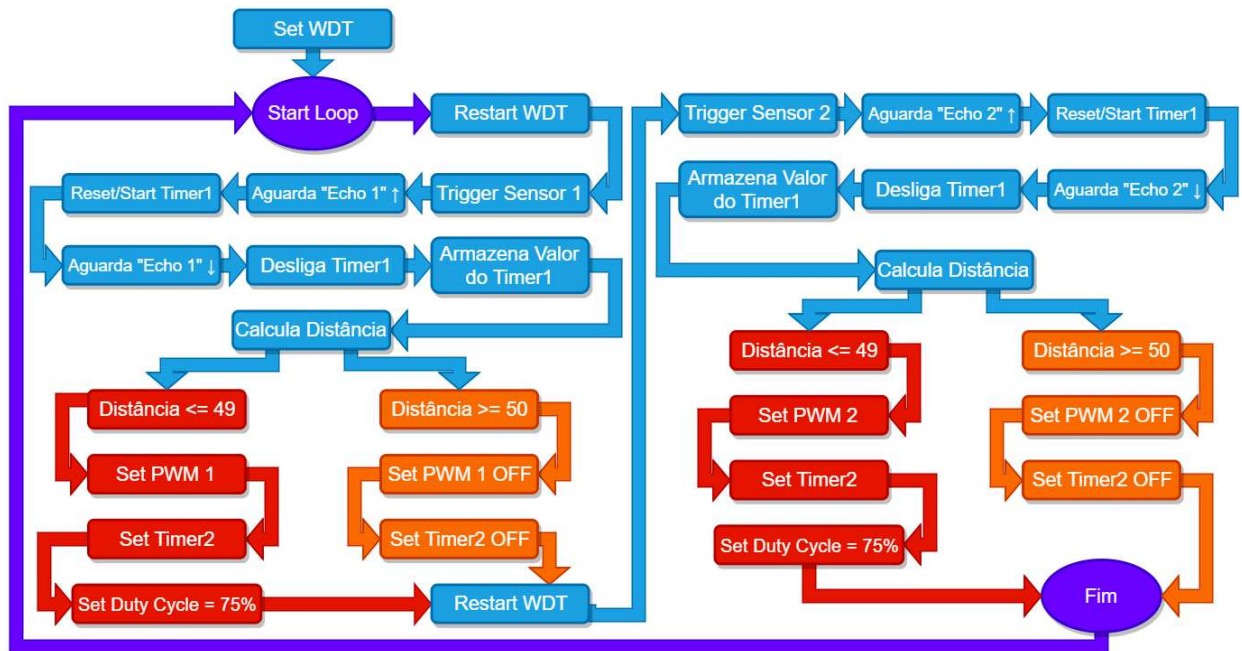
Com o valor de distância calculado, existem 3 caminhos possíveis.

- O primeiro, caso a distância seja igual ou menor a 49 cm, configura o módulo CCP para funcionar como PWM, configura o Timer2 para ajustar a frequência do PWM e o registrador de *duty cycle* estático em 100%.
- O segundo caso, é quando a distância está dentro do *range* em que varia o DC (de 50 a 150 cm). Essa distância (*D*) é atribuída à equação que varia o DC de acordo com a distância, e então, assim como no primeiro passo, o módulo CCP é configurado para funcionar como PWM, o Timer2 ajusta a frequência e, no registrador de *duty cycle*, o valor atribuído será equivalente a distância medida pelo sensor.
- No terceiro caso, se a distância medida for igual ou maior que 151 cm, o módulo PWM e o Timer2 são desligados, resultando em um desligamento do motor.

A este ponto, a rotina do programa se termina e retorna ao início, ficando eternamente em *loop*.

Na Figura 28 é mostrado o fluxograma dos módulos laterais, que, no tocante ao módulo frontal, possui algumas diferenças. Por possuir dois sensores e dois motores, o programa respeita uma sequência, que começa com a leitura do primeiro sensor, ativação do primeiro motor, leitura do segundo sensor e ativação do segundo motor. A lógica de ativação dos sensores é exatamente igual ao do módulo frontal, as principais diferenças deste fluxograma começam após o cálculo da distância.

Figura 28 – Fluxograma dos módulos laterais



Fonte: O autor (2019)

Observa-se que, existem dois casos possíveis que podem ser escolhidos de acordo com a distância calculada, diferentemente do módulo frontal, onde são 3 opções.

- O primeiro, quando a distância é menor ou igual a 49 cm, são configurados o PWM e o Timer2, e o *duty cycle* é programado para ficar estático em 75%.
- No segundo caso, quando a distância é maior ou igual a 50 cm, o PWM e o Timer2 são desligados.

Neste momento, ao invés do programa chegar ao fim e retornar ao início do loop, como no módulo frontal, o programa dá sequência para a aferição do segundo sensor, logo após reiniciar o WDT. A aferição é exatamente igual a primeira, a diferença se dá no módulo PWM utilizado. E então, após completas as duas aferições, a rotina chega ao fim e retorna ao início, ficando em *loop*.

3.4.1 Watchdog Timer

Por precaução, foram utilizados os Watchdog Timers para evitar que os programas fiquem congelados. Da forma que os códigos foram feitos, o sinal de “Echo” tem o poder de travar o programa, caso, por algum motivo, algum dos sensores não seja gatilhado ou o próprio “Echo” não mude de estado. O tempo do WDT foi definido em 72 ms, tempo que garante que uma leitura completa de um sensor seja feita, visto que, segundo testes, mesmo quando o HC-SR04

não detecta obstáculo algum ou o obstáculo está mais distante do que a distância de medição máxima do sensor ($4 \text{ m} < \text{distância} < \infty$), o sinal de “Echo” medido fica por volta de 30 ms. Isso significa que o WDT só vai reiniciar a rotina do programa caso realmente algum *bug* ocorra. Ainda, prova-se, através da equação (2) que os 72 ms são suficientes.

$$D = \frac{72 \cdot 10^{-3} \text{ s} \cdot 340 \text{ m/s}}{2} \quad (2)$$

$$D = 12,24 \text{ m}$$

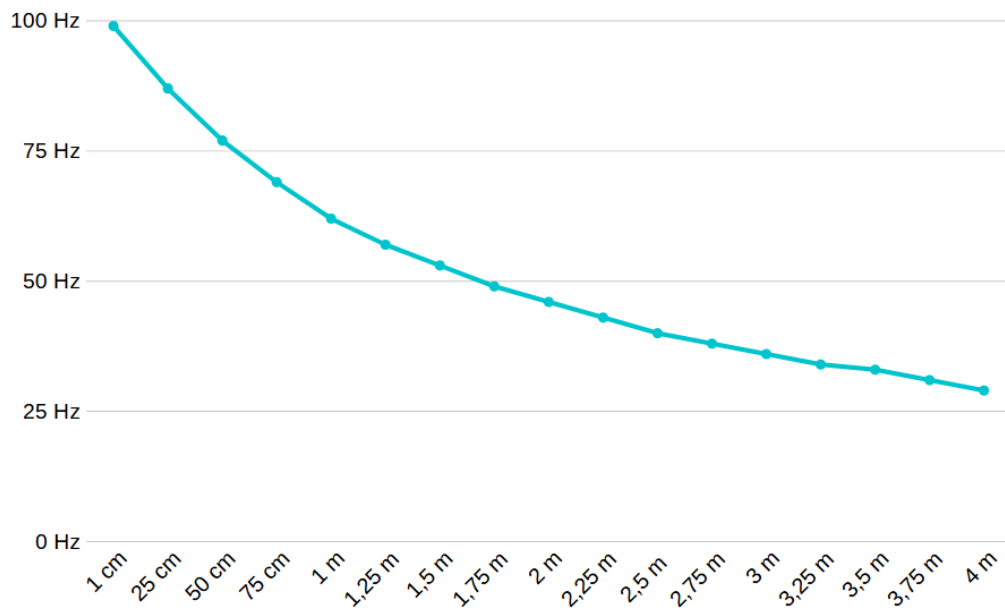
Ou seja, os 72 ms do WDT garantem que os sensores ultrassônicos podem medir uma distância de até 12,24 m antes da rotina do programa ser resetada.

3.4.2 Frequências de Medição e as Relações com a Distância

Ainda, pode-se calcular a frequência de medição dos sensores (inverso do tempo de medição). Conforme previamente difundido, nos casos em que nenhum obstáculo se encontra dentro da distância máxima de detecção dos sensores ($> 4 \text{ m}$), as medições são feitas, aproximadamente, a cada 40 ms (30 ms de “Echo” e 10 ms de “Trigger”), ou seja, no módulo frontal, onde só há um sensor, a frequência mínima de medição é de aproximadamente 25 Hz (1/40 ms). Nos módulos laterais, são dois sensores, e, portanto, duas medições são feitas sequencialmente. Com isso, a frequência cai pela metade comparado com o módulo frontal, resultando em uma frequência mínima de aproximadamente 12,5 Hz, se a distância medida pelos dois sensores for a mesma.

Para distâncias menores, a frequência aumenta consideravelmente. No módulo frontal, a 50 cm de distância, cada medição é feita a cada 13 ms (3 ms de “Echo” e 10 ms de “Trigger”), isso resulta em uma frequência de aproximadamente 77 Hz. Utilizando a equação (2) para calcular tempo e distância, e somando 10 ms de “Trigger”, pôde-se gerar o Gráfico 5, que representa a frequência de medição em função da distância.

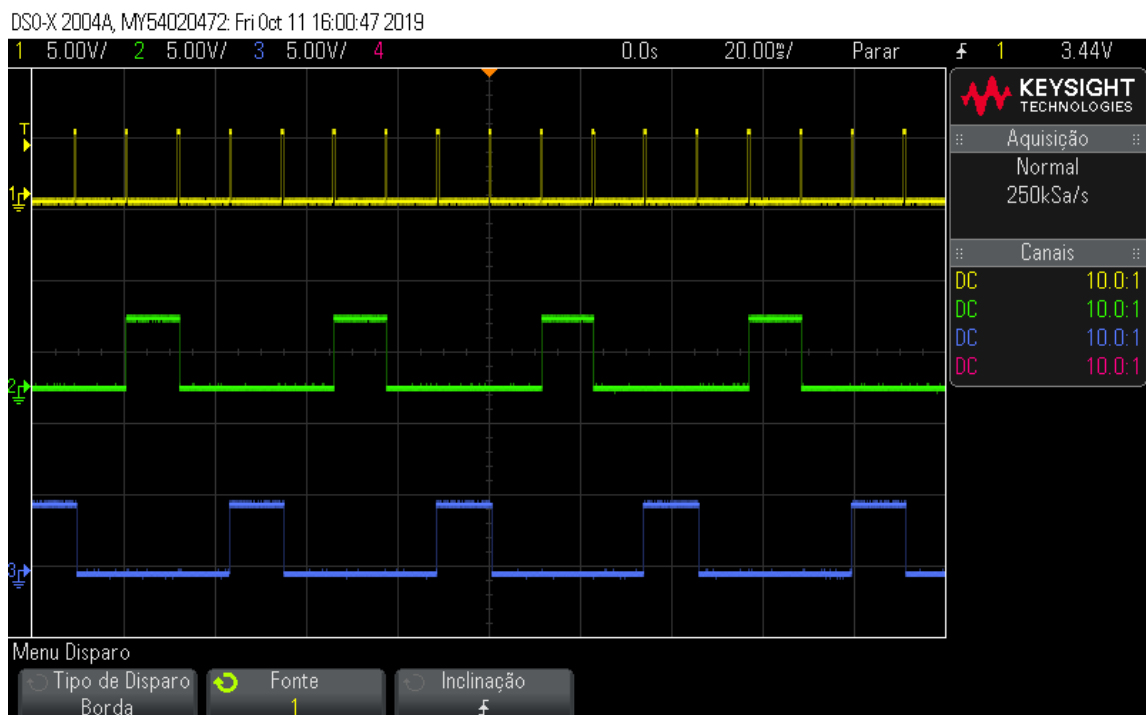
Gráfico 5 – Frequência em função da distância



Fonte: O autor (2019)

O Gráfico 5 representa a curva equivalente aproximada da frequência em função da distância no módulo frontal, que possui um sensor, e, com 10 ms de “Trigger”. Utilizando outros valores de “Trigger” o gráfico muda substancialmente. Nas Figuras 29, 30 e 31, prova-se através do osciloscópio essa variação de frequência.

Figura 29 – “Echo” 1

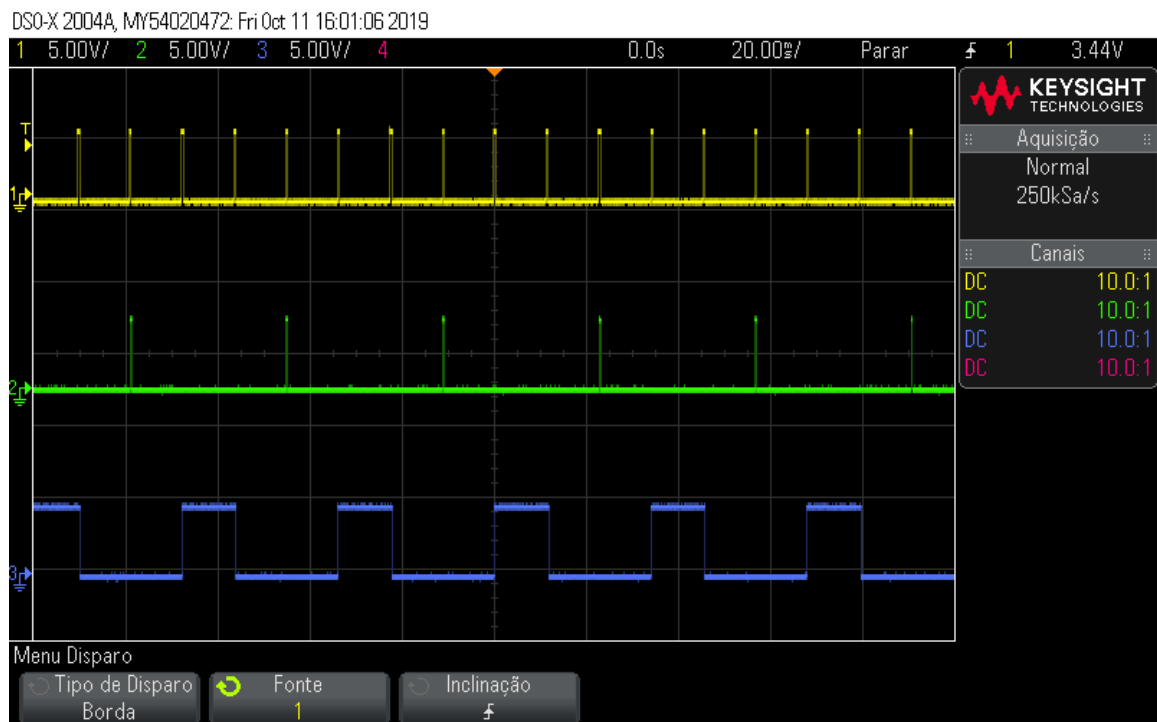


Fonte: O autor (2019)

Na Figura 29 são mostrados os sinais de “Echo” medidos em cada um dos sensores, e, para todos os testes, o tempo de “Trigger” é 10 ms. O sinal **amarelo** é o sinal medido pelo módulo frontal, e não é importante para esta análise.

Os sinais **verde** e **azul** são oriundos dos módulos laterais, e nota-se que estão em sequência. Esse teste foi feito com ambos os sensores medindo a mesma distância, aproximadamente 2 m. Na Figura 30, um objeto foi aproximado ao sensor **verde**.

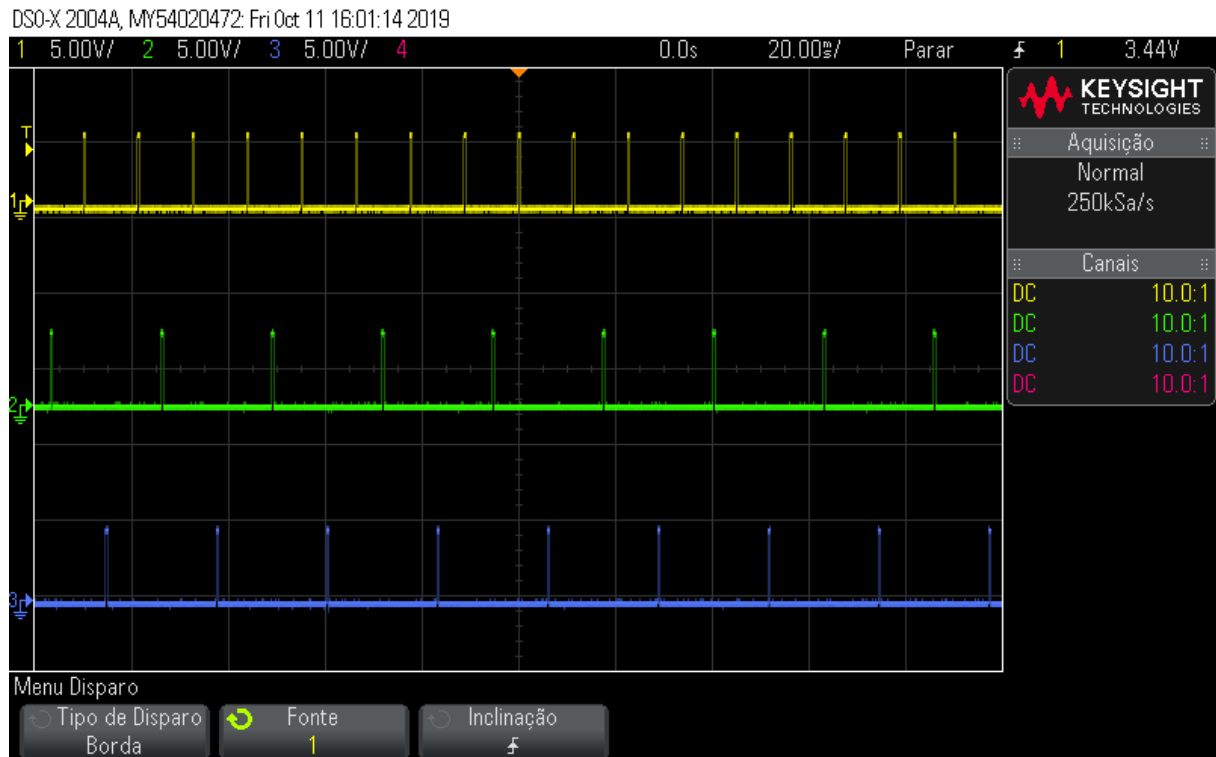
Figura 30 – “Echo” 2



Fonte: O autor (2019)

Agora, observa-se que o tempo em nível lógico alto do sensor **verde** diminuiu e a frequência das medições aumentaram (comparativamente com a Figura 29) em ambos os sensores, **verde** e **azul**, mesmo que o **azul** ainda esteja medindo uma distância maior. Na Figura 31 um objeto também é aproximado ao sensor **azul** na mesma distância do **verde**.

Figura 31 – “Echo” 3



Fonte: O autor (2019)

Aqui, foi possível notar que, de fato, quando um objeto foi aproximado ao sensor azul, a frequência das medições verde e azul diminuíram mais ainda. Logo, comprova-se que neste protótipo, a frequência de medição varia de acordo com a distância.

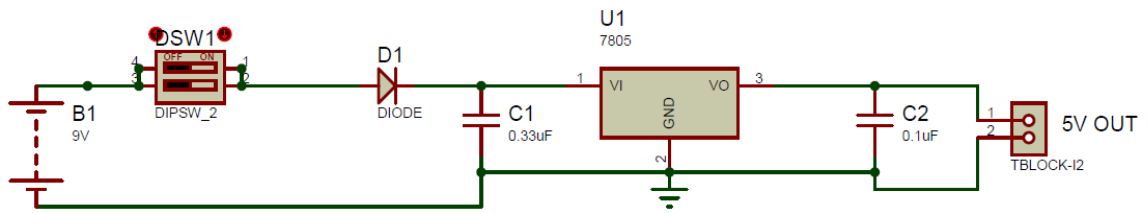
3.5 FONTE DE ALIMENTAÇÃO

Observando os dados de cada componente do protótipo, foi definido que a tensão de alimentação deveria ser de +5 V CC. E então, tratando-se de um protótipo móvel, o mais adequado seria utilizar uma fonte de alimentação acoplada à estrutura. Uma bateria de +9 V CC era a opção mais simples e barata para o projeto, por isso, foi preferido por utilizá-la.

Um regulador de tensão teve de ser construído para reduzir dos +9 V CC e chegar aos +5 V CC requisitados, o circuito do mesmo pode ser visto na Figura 32. Foi utilizado um LM7805 para regular a tensão nos +5 V CC, e um diodo foi colocado na entrada como proteção, para evitar que, caso a bateria seja colocada invertida, os circuitos não tenham chance de queimar.

O cálculo de dissipador para o regulador foi desprezado, visto que o consumo máximo de corrente atingido foi de somente 100 mA.

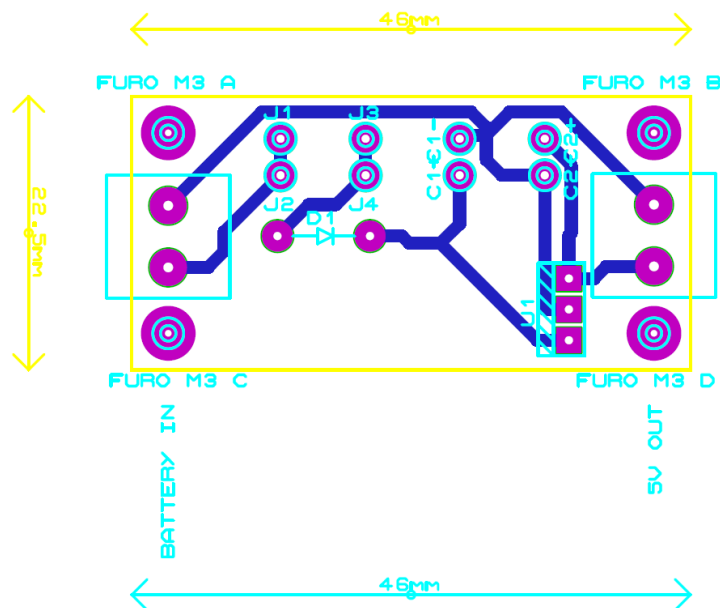
Figura 32 – Circuito do regulador de tensão



Fonte: O autor (2019)

O circuito é bastante simples, deve ser dada atenção a tensão da bateria, visto que o LM7805 possui uma queda interna de aproximadamente +2 V CC (Texas Instruments, 2003) e o diodo, uma queda aproximada de +0,75 V CC (Fairchild, 2009), isso implica que a bateria deve ter uma tensão mínima de +7,75V CC, sendo a máxima de +35V CC (Texas Instruments, 2003). Um DIP *switch* foi utilizado como botão on/off. A placa de circuito impresso projetada pode ser vista na Figura 33.

Figura 33 – PCI do regulador de tensão



Fonte: O autor (2019)

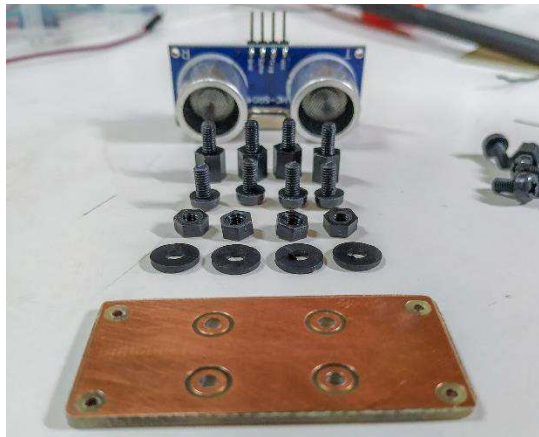
Foram feitos 4 furos de 3 mm de diâmetro para os parafusos de fixação e foram utilizados *tblocks* de duas vias para fazer a ligação do regulador com a bateria e os circuitos. Para a PCI do regulador, o critério principal era o tamanho, considerando que o circuito é bem simples, não foi um grande problema.

3.6 ESTRUTURA MECÂNICA

Como a ideia do protótipo desde o início era que ele fosse utilizado na cabeça, algumas opções foram analisadas, sendo a mais viável, um *headstrap* (utilizado para prender câmeras GoPro na cabeça), devido ao baixo custo, grande flexibilidade e opção de ser acoplada em diversos outros acessórios.

Foram utilizados parafusos, espaçadores e porcas de nylon para prender os componentes no *headstrap*, e, para os sensores ultrassônicos, foram feitas placas de suporte para a fixação, devido ao fato de que os sensores ficariam muito inclinados para cima, pelo próprio formato da testa, na Fotografia 12 é possível observar esses componentes.

Fotografia 12 – Componentes de fixação dos sensores



Fonte: O autor (2019)

Os microcontroladores, por sua vez, tiveram de ser soldados em placas *wireup*. Devido a problemas com a fresa, as placas projetadas para soldar os microcontroladores não puderam ser utilizadas, e na Fotografia 13 ficam visíveis como as placas foram acopladas à estrutura.

Fotografia 13 – Placas na estrutura

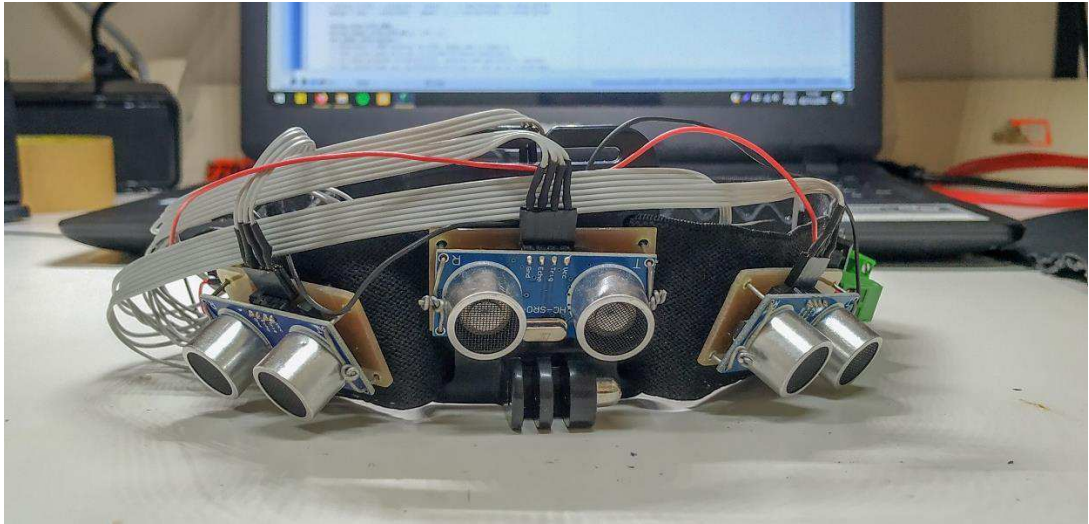


Fonte: O autor (2019)

Nota-se a inclinação “para baixo” das placas de suporte dos sensores, essa foi a solução encontrada para fazer com que os sensores ficassem mais “horizontais” na cabeça do usuário.

O protótipo final, com todos os componentes montados pode ser visualizado na Fotografia 14.

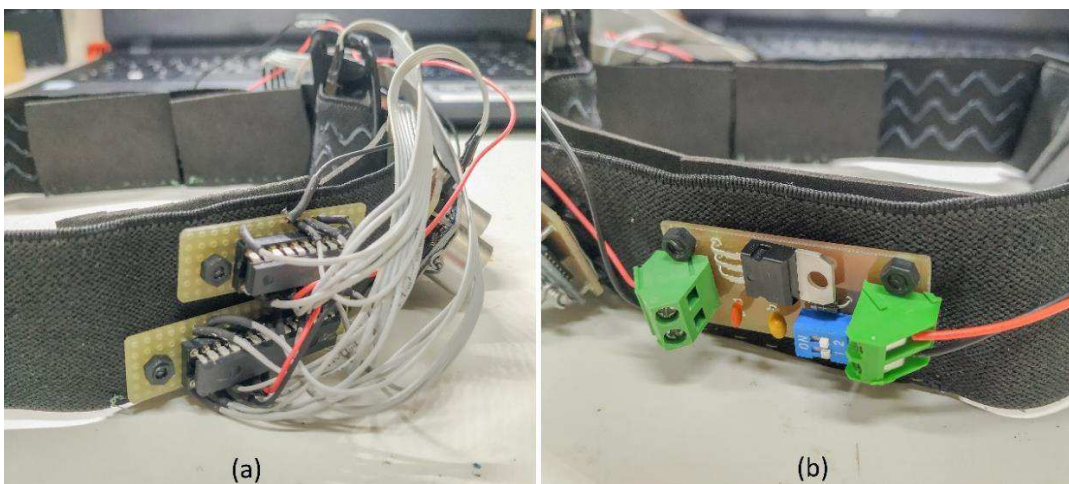
Fotografia 14 – Protótipo final



Fonte: O autor (2019)

À esquerda da Fotografia 14, ficam as placas dos microcontroladores, e à direita, a placa do regulador de tensão, na Figura 34 são mostrados detalhadamente esses componentes. Nota-se que foram utilizados cabos *flat* e conectores macho-fêmea para fazer todas as conexões necessárias, exceto as de alimentação, onde foram utilizados cabos *flex*. Ambos os tipos de cabos foram escolhidos pela alta flexibilidade.

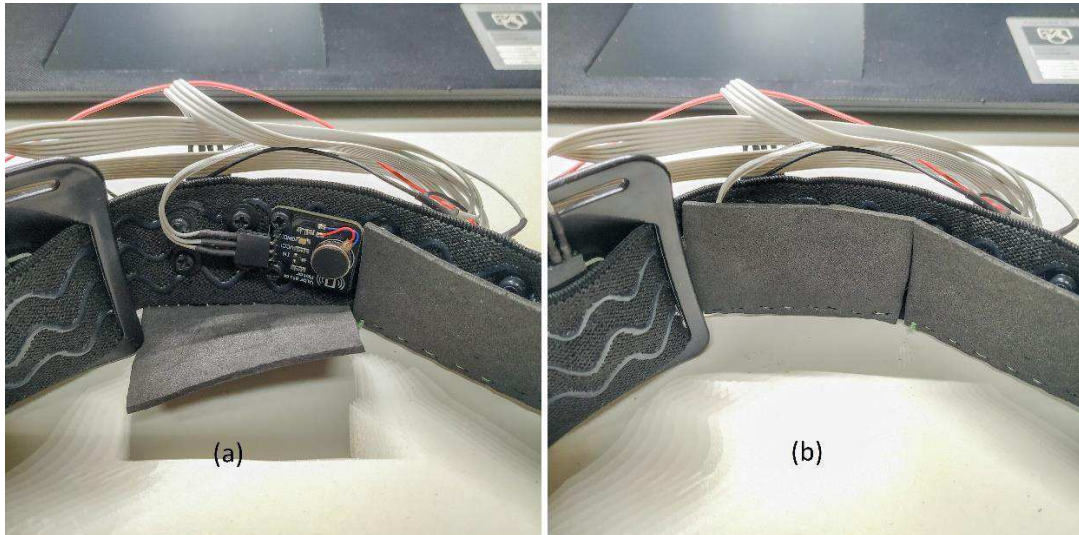
Figura 34 – Microcontroladores e regulador na estrutura



Fonte: O autor (2019)

O lado de dentro do protótipo, onde ficam os motores, pode ser visto na Figura 35.

Figura 35 – Protótipo final 2



Fonte: O autor (2019)

Foram costurados pedaços de EVA para proporcionar maior conforto durante o uso do protótipo. Em (a), é possível ter ideia de que os parafusos (apesar de serem de nylon) e os próprios motores, são grandes causadores de desconforto em contato com a pele.

A bateria foi colada com fita dupla face na parte de trás da estrutura, como a Fotografia 15 mostra.

Fotografia 15 – Bateria na estrutura



Fonte: O autor (2019)

4 RESULTADOS

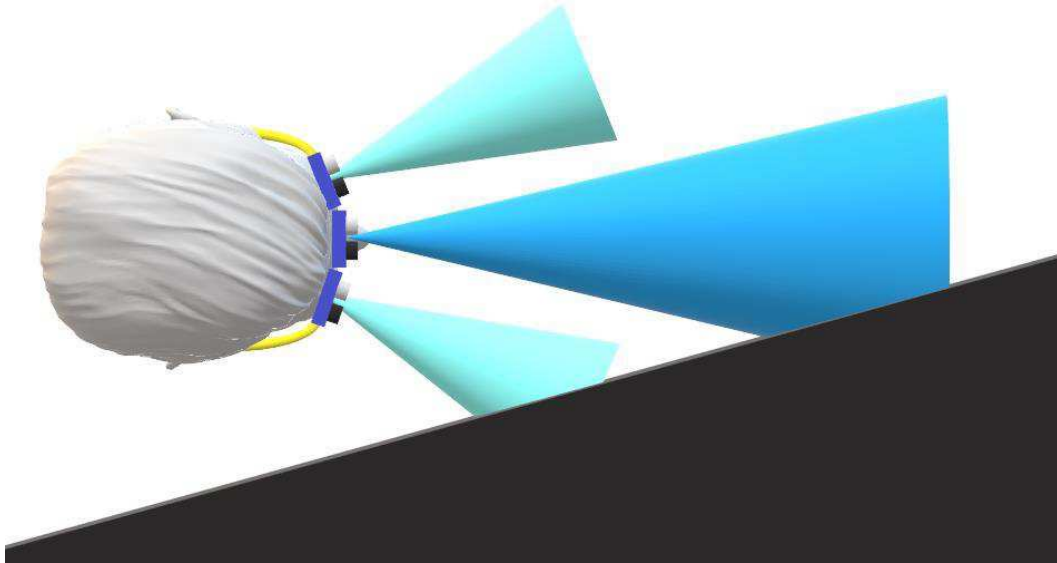
Ao passo em que o protótipo ficou pronto, foram realizados testes de percepção tátil da intensidade da vibração dos motores, e, sem grandes surpresas, percebe-se facilmente a variação de vibração do motor quando um deles está vibrando sozinho. Nos momentos em que mais de um motor vibra, fica um pouco mais difícil perceber a diferença, e justamente para melhorar essa questão, foi definido que os motores laterais devem manter a intensidade de vibração constante e a 75% de sua capacidade. Isso trouxe resultados satisfatórios a respeito da percepção da direção do objeto detectado, sem que o *feedback* de um motor interferisse no outro.

Outro ponto importante relacionado a direção dos objetos, é a definição da distância de detecção dos módulos laterais de 50 cm. Utilizar o protótipo em ambientes fechados não é muito recomendado devido ao eco, e durante os testes em que os módulos laterais foram ajustados para alertar objetos a 150 cm de distância (assim como o frontal), seu uso ficou extremamente prejudicado, pois os motores basicamente ficavam vibrando o tempo todo. Então, para não ficar tão complicado o uso, foi feito esse comprometimento de distância.

Ainda, foi observado que o módulo frontal, que alerta sobre a presença de obstáculos a até 150 cm, é suficiente para uma locomoção segura. Os 30° de ângulo de detecção aproximados são muito eficazes, uma vez que o usuário, caso em dúvida, possa rotacionar a cabeça para se certificar se há ou não um caminho livre. Obviamente, a distâncias mais longas, detectar uma porta aberta por exemplo, é um pouco mais difícil, mas é possível dedicando atenção à intensidade de vibração. O interessante é que quando o usuário se aproxima da porta, o sensor mede “larguras” cada vez menores, e então sim, fica fácil detectar uma porta aberta. E quando o usuário está muito próximo de alguma “lateral” ou “canto” da abertura da porta, os sensores laterais detectam e alertam o usuário, a ideia dos sensores laterais é servir de “suporte” para o sensor frontal.

O protótipo, no geral, ao que diz respeito a detecção, é surpreendentemente eficiente, o maior problema encontrado durante os testes, foi detectar quinas e paredes com ângulos não “diretos” ao sensor, como pode-se observar na representação da Figura 36, devido a limitação das ondas ultrassônicas.

Figura 36 – Parede em ângulo ao sensor

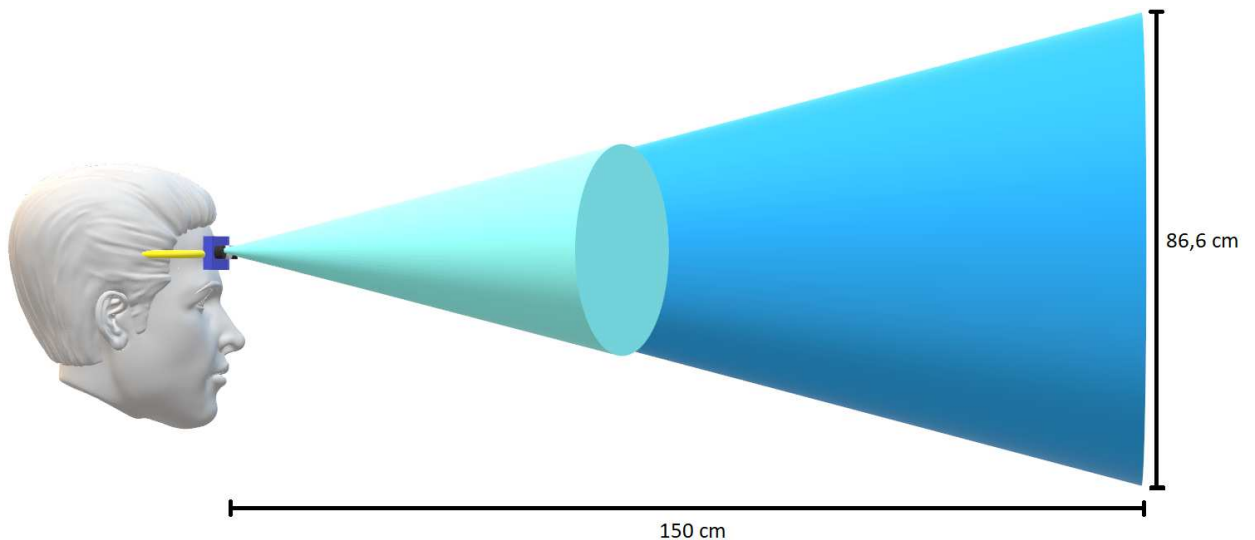


Fonte: O autor (2019)

Nota-se, na Figura 36, a parede (em preto) em um ângulo não “direto” ao sensor, que, mesmo estando dentro de sua “área de detecção” (em azul), não é detectada. Nesses casos, uma simples rotação com a cabeça já resolve o problema. Talvez fosse ideal posicionar os sensores laterais mais “apontados” para os lados, pois assim, esse problema poderia ser amenizado.

A ideia desde o início do projeto era fazer com que objetos à altura da cabeça fossem detectados, evitando assim eventuais choques e possíveis lesões na cabeça e rosto do usuário, porém, objetos mais baixos podem sim ser detectados, como pode ser visto na Figura 37.

Figura 37 – Visão lateral



Fonte: O autor (2019)

A Figura 37 mostra que, a uma distância de 150 cm (a distância máxima do dispositivo), tem-se aproximadamente 86,6 cm de diâmetro no cone, considerando um ângulo de 30° de medição sensores. A equação (11) mostra o cálculo feito para chegar nesse valor.

$$D = 150 \text{ cm} * \text{tg}(30^\circ) \quad (11)$$

$$D = 86,6 \text{ cm}$$

Onde D é o diâmetro em cm. Ou seja, a 150 cm, o dispositivo, teoricamente, é capaz de detectar objetos a aproximadamente 43,3 cm abaixo da cabeça do usuário. Na prática, existem problemas relacionados ao próprio obstáculo, como ângulo em relação ao sensor e tamanho. Mas, inclinando a cabeça é possível detectar objetos baixos e degraus, apesar do bastão guia ser mais eficiente nessas situações.

No tocante a estrutura do protótipo, a mesma se mostrou bastante confortável, devido a flexibilidade e o interior em EVA, tornando o contato com a pele bastante suave e agradável. Ainda, o *headstrap* possui regulagem para se adaptar a diferentes tamanhos de cabeça. A única pena fica por conta dos cabos, que são a parte mais frágil de toda a estrutura. Deve-se ter certo cuidado ao “vestir” o dispositivo, para não acabar rompendo alguma conexão com as placas dos microcontroladores.

Quanto ao consumo de corrente, o valor máximo, com todos os periféricos funcionando e os motores ligados nos máximos programados, chegou a 103 mA. Com os motores desligados, somente com os três sensores ligados, o consumo chegou a 17 mA. A bateria Panasonic 6LR61EGE (+9 V CC), possui capacidade de 550 mAh, ou seja, garante que o protótipo funcione por pouco mais de 5 horas com consumo máximo de corrente, uma situação que raramente acontece. Para o caso inverso, de menor consumo, a duração estimada é de aproximadamente 32 horas. Obviamente, esses valores de duração dependem de como o protótipo será utilizado e por quanto tempo. Uma observação sobre os valores de consumo, é que os mesmos diferem bastante se comparado ao que diz a folha de dados, mas deve ser levado em consideração que os componentes não funcionam todos ao mesmo tempo, por isso o consumo é menor que o divulgado pelas fabricantes. Outra questão importante é que os motores de vibração estão bem presos à estrutura, isso implica que uma menor energia vibratória será removida dele e, sabendo que a corrente é proporcional ao torque visto pelo motor, isso resulta em um consumo menor de corrente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O protótipo, no geral, se mostrou eficiente em ambientes externos e espaços abertos, onde não existe eco. Em ambientes fechados, como salas pequenas e corredores, deve-se tomar muita atenção com más interpretações dos sensores, com eco e ângulo dos obstáculos, conforme visto nos Resultados.

Apesar do protótipo estar apto a detectar obstáculos baixos, não é recomendado o usar exclusivamente ou dar prioridade ao mesmo nessas situações, seja no ambiente que for, principalmente pelos perigos relacionados a degraus.

O protótipo foi apresentado a algumas pessoas e os comentários foram unânimes a respeito de quão exótica é a aparência do dispositivo. Com isso, algumas melhorias foram pensadas para possíveis atualizações futuras. A ideia fundamental seria utilizar sensores ultrassônicos digitais com comunicação serial preferencialmente de baixa latência, que, por utilizar somente um fio de dados compartilhado entre todos os sensores, tornaria o protótipo mais discreto. Ainda, existem sensores mais compactos no mercado, que ajudariam nessa questão.

Obviamente, essas melhoras implicam diretamente no custo, que ficaria muito mais alto do que o custo do protótipo atual. Então, a proposta inicial de construir um dispositivo de assistência para a locomoção de deficientes visuais com um custo controlado foi cumprida.

Durante a execução do projeto, notou-se que não seria mais obrigatório o uso de 3 módulos PWM individuais para os motores, visto que os motores laterais não necessitam variar a intensidade. Porém, foi decidido manter os 3 módulos e 2 microcontroladores, pelo fato do *delay* que seria gerado entre as ativações dos motores caso fosse utilizado somente um microcontrolador.

REFERÊNCIAS

2 DEDOS, Douglas. **Semáforo sonoro, obrigatório?**. PCDef. 15 mar. 2018. Disponível em: <<https://pcdef.com.br/deficiencia/visual/semaforo-sonoro-obrigatorio/>>. Acesso em: 04 mai. 2019, 16:04:10.

ALECRIM, Emerson. **Esta tela com sistema Braille pode ser o que faltava para termos tablets para cegos**. Tecnoblog. 2016. Disponível em: <<https://tecnoblog.net/190431/tela-tablets-braille/>>. Acesso em: 04 mai. 2019, 14:56:54.

BENJAMIN, J. Malvern. **The Laser Cane**. 1973. Disponível em: <<https://www.rehab.research.va.gov/jour/74/11/2/443.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2019, 17:15:04.

CALEGARI, Leandro. **Uso da Onda Ultra-sônica como Meio de Controle do Processo de Secagem da Madeira**. 2006, 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.

CELESTINO, Uanderson. **Dispositivo Eletrônico Para Auxílio na Locomoção de Deficientes Visuais e/ou Auditivos Baseado na Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial Et**. 2009, 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Paulista, São Paulo, SP.

ELEC FREAKS. **Ultrasonic Ranging Module HC - SR04**. Mouser. [S. d.]. Disponível em: <<https://www.mouser.com/ds/2/813/HCSR04-1022824.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2019, 14:31:20.

FAIRCHILD. **1N4001 – 1N4007 General Purpose Rectifiers**. 2009. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/427579/FAIRCHILD/1N4007.html>>. Acesso em: 20 ago. 2019, 16:45:27.

FILIPEFLOP. **Módulo Motor de Vibração**. Filipeflop. [S. d.]. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/produto/modulo-motor-de-vibracao/>>. Acesso em: 16 nov. 2019, 16:14:25.

FRENKEL, Raymond; GAO, Robert X. – **Ultrasound Pulse Coding for Robust Obstacle Detection Using a Long Cane**. In: IMTC 2006 – Instrumentation and Measurement Technology Conference, p. 1251-1256, 24-27 abr. 2006, Sorrento, Itália.

GONÇALVES, Alexandre; THOMÉ, Clarissa. **Cegos usam técnica para “ver” com audição**. Estadão. [S. d.]. Disponível em: <<https://www.estadao.com.br/noticias/geral,cegos-usam-tecnica-para-ver-com-audicao-imp-,740066>>. Acesso em: 02 mai. 2019, 17:17:31.

HOOKE. **What is Binaural Audio?**. [S. d.]. Disponível em: <<https://hookeaudio.com/what-is-binaural-audio/>>. Acesso em: 28 abr. 2019, 15:09:20.

KUMAR, Krishna e outros – Development of an Ultrasonic Cane as a Navigation Aid for the Blind People. In: 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT), p. 475-479, 2014.

LAKDE, Chaitali K.; PRASAD, Prakash S. – Navigation System for Visually Impaired People. In: 2015 International Conference On Computation of Power, Energy, Information and Communication, p. 93-98, 2015.

MAZZAROPPI, Marcelo. **Sensores de Movimento e Presença**. 2007. 54 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

MICROCHIP. **PIC16F627A/628A/648A Data Sheet**. 2002. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40044G.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2019, 15:23:41.

MICROCHIP. **PIC16F882/883/884/886/887 Data Sheet**. 2009. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/41291d.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2019, 16:45:27.

OCHAITA, Esperanza; ROSA, Alberto. Percepção, ação e conhecimento nas crianças cegas. In: COLL, César; PALACIOS, Jesús; MARCHESI, Álvaro (org.) Desenvolvimento psicológico e educação: necessidades educativas especiais e aprendizagem escolar. Porto Alegre: Artes Médicas, 1995. v.3, p.183-197.

PATSKO, Luís F. **Tutorial, Aplicações, Funcionamento e Utilização de Sensores**. Maxwell Bohr. 28 dez. 2006. Disponível em: <https://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000_kdr5000/tutorial_eletronica_-_aplicacoes_e_funcionamento_de_sensores.pdf>. Acesso em: 06 mai. 2019, 15:20:44.

PC SERVICES. **Circuit Diagram Ultrasonic Distance Sensor HC-SR04**. PC Services. 17 mai. 2018. Disponível em: <<http://www.pcserviceselectronics.co.uk/arduino/Ultrasonic/electronics.php>>. Acesso em: 16 mai. 2019, 17:32:10.

PRECISION MICRODRIVES. **AB-004: Understanding ERM Vibration Motor Characteristics**. [S. d.]b. Disponível em: <<https://www.precisionmicrodrives.com/content/ab-004-understanding-erm-vibration-motor-characteristics/>>. Acesso em: 12 mai. 2019, 15:15:41.

PRECISION MICRODRIVES. **AB-020: Understanding Linear Resonant Actuator Characteristics**. [S. d.]d. Disponível em: <<https://www.precisionmicrodrives.com/content/ab-020-understanding-linear-resonant-actuator-characteristics/>>. Acesso em: 12 mai. 2019, 16:15:11.

PRECISION MICRODRIVES. **Coin Vibration Motors**. [S. d.]e. Disponível em: <<https://www.precisionmicrodrives.com/vibration-motors/coin-vibration-motors/>>. Acesso em: 16 nov. 2019, 15:52:51.

PRECISION MICRODRIVES. **Linear Resonant Actuators – LRAs**. [S. d.]c. Disponível em: <<https://www.precisionmicrodrives.com/vibration-motors/linear-resonant-actuators-lras/>>. Acesso em: 12 mai. 2019, 16:13:32.

PRECISION MICRODRIVES. **Vibration Motors**. [S. d.]a. Disponível em: <<https://www.precisionmicrodrives.com/vibration-motors/>>. Acesso em: 12 mai. 2019, 14:12:06.

SELVI, S. e outros. Andha Asthra – A Navigation System for the Visually Impaired. In: Proceedings of IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 20-22 ago., 2008, Seul, Coreia do Sul.

SHOVAL, Shraga; BORENSTEIN, Johann; KOREN, Yoram. The Navbelt – A Computerized Travel Aid for the Blind Based on Mobile Robotics Technology. **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, v. 45, n. 11, p. 1376-1386, nov. 1998.

TEXAS INSTRUMENTS. **µA7800 Series Positive Voltage Regulators**. 2003. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/LM7805.pdf>>. Acesso em: 19 ago. 2019, 13:20:27.

WAUGH, Andrew. **What is a Laser Sensor?**. AutomationDirect. [S. d.]. Disponível em: <<https://library.automationdirect.com/what-is-a-laser-sensor/>>. Acesso em: 06 mai. 2019 13:31:11.

WHO, World Health Organization. **Blindness and vision impairment**. 2018. Disponível em: <<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment>>. Acesso em: 22 abr. 2019, 22:30:05.

WIKIPÉDIA. **Piso Tátil**. 29 mar. 2019. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Piso_t%C3%A1til>. Acesso em: 02 mai. 2019, 15:45:41.

APÊNDICE A – PROGRAMA PIC16F628A

```

#include <16f628a.h>
#include <delay.h>
#include <INTRC_IO.h>
#include <NOMCLR.h>
#include <WDT.h>

// RB5 = Input Echo Sensor 3
// RA1 = Output Trigger Sensor 3
// RB3 Output CCP1/PWM Motor 3

int16 dist, cont, dutyc;

void enable_motor3(void)
{
    dist=cont/58; // transforma o valor do timer em distancia

    if(dist<=49)
    {
        setup_ccp1(CCP_PWM);
        setup_timer_2(T2_DIV_BY_16, 249, 1); // 250 hz
        set_pwm1_duty(1000); // 100% duty cycle
    }

    if(dist>=50 && dist<=150)
    {
        dutyc = 1250 - (5 * dist); // equação da reta q varia o duty cycle

        setup_ccp1(CCP_PWM);
        setup_timer_2(T2_DIV_BY_16, 249, 1); // 250 hz
        set_pwm1_duty(dutyc); // duty cycle de acordo com a eq (dist)
    }

    if(dist>=151)
    {
        setup_ccp1(CCP_OFF); // desliga PWM
        setup_timer_2(T2_DISABLED, 249, 1);
    }
}

void main()
{
    setup_wdt(WDT_72MS); // configura WDT

    while(true)
    {
        restart_wdt(); // restart no WDT

        output_bit(PIN_A1, 1); // trigger 1
        delay_ms(10); // tempo do trigger em 1
    }
}

```

```
output_bit(PIN_A1, 0); // trigger 0
while(!input(PIN_B5)); // aguarda pino "echo" ir para 1
set_timer1(0); // reset timer1
setup_timer_1(T1_INTERNAL|T1_DIV_BY_1); // liga timer1
while(input(PIN_B5)); // aguarda pino "echo" ir para 0
setup_timer_1(T1_DISABLED); // desliga timer1
cont = get_timer1(); // armazena o valor que o timer1 contou
enable_motor3(); // ativa o motor
}
}
```

APÊNDICE B – PROGRAMA PIC16F886

```

#include <16f886.h>
#include delay(clock=4000000)
#include INTRC_IO, NOMCLR, WDT

// RA2 = Input Echo Sensor 1
// RA3 = Input Echo Sensor 2
// RA0 = Output Trigger Sensor 1
// RA1 = Output Trigger Sensor 2
// RC2 Output CCP1/PWM Motor 1
// RC1 Output CCP2/PWM Motor 2

int16 dist, cont, dutyc;

void enable_motor1(void)
{
    dist=cont/58; // transforma o valor do timer em distancia

    if(dist<=49)
    {
        setup_ccp1(CCP_PWM);
        setup_timer_2(T2_DIV_BY_16, 249, 1); // 250 hz
        set_pwm1_duty(750); // 75% duty cycle
    }

    else
    {
        setup_ccp1(CCP_OFF); // desliga PWM
        setup_timer_2(T2_DISABLED, 249, 1);
    }
}

void enable_motor2(void)
{
    dist=cont/58; // transforma o valor do timer em distancia

    if(dist<=49)
    {
        setup_ccp2(CCP_PWM);
        setup_timer_2(T2_DIV_BY_16, 249, 1); // 250 hz
        set_pwm2_duty(750); // 75% duty cycle
    }

    else
    {
        setup_ccp2(CCP_OFF); // desliga PWM
        setup_timer_2(T2_DISABLED, 249, 1);
    }
}

```

```

}

void main()
{
    setup_wdt(WDT_72MS);                // configura WDT

    while(true)
    {
        restart_wdt();                // restart no WDT

        ////////////////////////////////////////////////////////////////////MODULO 1//////////////////////////////////////////////////////////////////
        output_bit(PIN_A0, 1);        // trigger 1
        delay_ms(10);                // tempo do trigger em 1
        output_bit(PIN_A0, 0);        // trigger 0
        while(!input(PIN_A2));        // aguarda pino "echo" ir para 1
        set_timer1(0);                // reset timer1
        setup_timer_1(T1_INTERNAL|T1_DIV_BY_1); // liga timer1
        while(input(PIN_A2));        // aguarda pino "echo" ir para 0
        setup_timer_1(T1_DISABLED);   // desliga timer1
        cont = get_timer1();          // armazena o valor que o timer1 contou
        enable_motor1();              // ativa o motor

        restart_wdt();

        ////////////////////////////////////////////////////////////////////MODULO 2//////////////////////////////////////////////////////////////////
        output_bit(PIN_A1, 1);        // trigger 1
        delay_ms(10);                // tempo do trigger em 1
        output_bit(PIN_A1, 0);        // trigger 0
        while(!input(PIN_A3));        // aguarda pino "echo" ir para 1
        set_timer1(0);                // reset timer1
        setup_timer_1(T1_INTERNAL|T1_DIV_BY_1); // liga timer1
        while(input(PIN_A3));        // aguarda pino "echo" ir para 0
        setup_timer_1(T1_DISABLED);   // desliga timer1
        cont = get_timer1();          // armazena o valor que o timer1 contou
        enable_motor2();              // ativa o motor
    }
}

```