

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA

CAROLINA NASCIMENTO DA VICTÓRIA DE CARVALHO DIAS
GUNAR AUGUST KROEGER
OLIVER PENNER

**LOCALIZADOR ACÚSTICO POR CORRELAÇÃO CRUZADA E
MULTILATERAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2018

CAROLINA NASCIMENTO DA VICTÓRIA DE CARVALHO DIAS
GUNAR AUGUST KROEGER
OLIVER PENNER

**LOCALIZADOR ACÚSTICO POR CORRELAÇÃO CRUZADA E
MULTILATERAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador: Bruno Sens Chang
Coorientador: Hermes Irineu Del Monego

CURITIBA
2018

CAROLINA NASCIMENTO DA VICTÓRIA DE CARVALHO DIAS
GUNAR AUGUST KROEGER
OLIVER PENNER

LOCALIZADOR ACÚSTICO POR CORRELAÇÃO CRUZADA E MULTILATERAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletrônico, do curso de Engenharia Eletrônica do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN) outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Os alunos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Curitiba, 29 de junho de 2018.

Prof. Dr. Robinson Vida Noronha
Coordenador de Curso
Engenharia Eletrônica

Prof^a. Dr^a. Carmen Caroline Rasera
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Eletrônica do DAELN

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bruno Sens Chang
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

Prof. Ms. Ricardo Umbria Pedroni
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Hermes Irineu Del Monego
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Coorientador

Prof. Ms. Ronald Lewis Karp
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Eletrônica.

RESUMO

DIAS, C. N. V. C.; KROEGER, G. A.; PENNER, O. *Localizador Acústico por Correlação Cruzada e Multilateração no Domínio do Tempo*. Trabalho de conclusão de curso, 2018.

Este projeto consiste em testar um algoritmo capaz de localizar fontes sonoras estacionárias e em movimento e fornecer sua orientação em um espaço tridimensional, através de um dispositivo portátil. O dispositivo possui cinco microfones de eletreto como sensores, e os mesmos estão posicionados em hastes de tamanhos pré-definidos. Para calcular a posição da fonte sonora utilizou-se o método da multilateração com solução linearizada, a partir da aplicação da correlação cruzada para o cálculo da diferença de tempo de chegada (TDOA). Através do uso de filtros digitais configuráveis, o usuário pode separar do sinal adquirido frequências sabidamente indesejadas. Um dos cernes deste trabalho é possibilitar um dispositivo com processamento otimizado, assegurando com isso a construção de um hardware acessível.

Palavras-chaves: multilateração; correlação cruzada; microfone de eletreto.

ABSTRACT

DIAS, C. N. V. C.; KROEGER, G. A.; PENNER, O. *Acoustic Locator by Cross Correlation and Multilateration in Time Domain*. BSc. Thesis, 2018.

This project consists in testing an algorithm capable of locating stationary and moving sound sources and providing their orientation on a three-dimensional space through a portable device. The device has five electret microphones as sensors, and they are positioned on pre-defined rod sizes. To calculate the position of the sound source, the multilateration method with linearized solution was used, through the application of the cross correlation to the calculation of the time difference of arrival (TDOA). Over the application of configurable digital filters, the user can separate unwanted frequencies from the acquired signal. One of the cores of this project is to enable an optimized processing device, thus ensuring the construction of an accessible hardware.

Key-words: multilateration, crosscorrelation, electret microphones.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Comparação visual da convolução e correlação cruzada.	14
Figura 2 – Relação entre as distâncias.	15
Figura 3 – Amplificador de Microfone Eletreto - MAX4466 com Ganho Ajustável.	20
Figura 4 – STM32 Nucleo-L476RG.	21
Figura 5 – Diagrama em blocos da arquitetura interna STM32 Nucleo-L476RG .	21
Figura 6 – Rotary Encoder Keys KY-040.	22
Figura 7 – Esquemático do Rotary Encoder.	23
Figura 8 – Display OLED.	23
Figura 9 – Diagrama em blocos do Display OLED.	24
Figura 10 – Sensor de Temperatura.	25
Figura 11 – Diagrama em blocos da aplicação típica do sensor de temperatura DHT11.	25
Figura 12 – Impressora 3D utilizada no projeto.	26
Figura 13 – Material biodegradável PLA do fabricante HatchBox.	27
Figura 14 – Vista 3D Renderizada do Protótipo.	28
Figura 15 – Vista de cima do protótipo e referenciamento dos microfones.	28
Figura 16 – Vista lateral do protótipo.	28
Figura 17 – Dimensões do protótipo.	29
Figura 18 – Fluxograma do projeto.	31
Figura 19 – Menu Inicial.	32
Figura 20 – Menu Localização.	32
Figura 21 – Telas do dispositivo.	33
Figura 22 – Menu FFT.	34
Figura 23 – Gráfico da aquisição de cada canal no tempo de amostragem.	36
Figura 24 – Gráfico de comparação entre a entrada e a saída da FFT.	37
Figura 25 – Gráfico do erro (Hz) em função da frequência.	37
Figura 26 – Gráfico de comparação entre o sinal recebido e o sinal filtrado por um filtro passa-baixa no tempo de amostragem.	38
Figura 27 – Gráfico de comparação entre o sinal recebido e o sinal filtrado por um filtro rejeita-faixa no tempo de amostragem.	39
Figura 28 – Gráfico da correlação cruzada utilizando o microfone 0 como referência.	40
Figura 29 – Gráfico da correlação cruzada com chegada simultânea dos microfones.	41
Figura 30 – Gráfico da simulação da imprecisão na TDOA em função do erro na distância estimado pelo algoritmo.	42
Figura 31 – Representação do teste da multilateração.	43
Figura 32 – Gráfico do tempo de processamento do protótipo em ms.	44
Figura 33 – Cronograma do desenvolvimento do projeto.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Posição dos Microfones.....	29
Tabela 2 – Faixas de Frequência da FFT apresentadas no display.....	34
Tabela 3 – TDOA amostrado tendo o microfone 0 como referência.....	40
Tabela 4 – Performance do processamento.....	44
Tabela 5 – Estimativa de tempo para o desenvolvimento do protótipo.....	46
Tabela 6 – Estimativa de custos para o desenvolvimento do protótipo.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TDOA	<i>Time Difference of Arrival</i>
DMA	<i>Direct Memory Access</i>
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
CCG	Correlação Cruzada Geral
ADC	<i>Analogue-to-Digital Converter</i>
OLED	<i>Organic Light-Emitting Diode</i>
PLED	<i>Polymer Light-Emitting Diode</i>
3D	<i>Three-Dimensional</i>
PLA	<i>Polylactic Acid</i>
MCU	<i>Microcontroller Unit</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
ARM	<i>Advanced RISC Machine</i>
IDE	<i>Integrated Drive Electronics</i>
EVA	<i>Ethylene Vinyl Acetate</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 APLICAÇÕES	9
2 OBJETIVOS	11
2.1 OBJETIVO GERAL	11
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	11
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
3.1 LOCALIZAÇÃO DE UMA FONTE SONORA	12
3.1.1 Multilateração	12
3.1.2 Triangulação	12
3.1.3 Beamforming	13
3.1.4 Escolha do Método	13
3.2 IMPLEMENTAÇÃO DA MULTILATERAÇÃO	13
3.2.1 Cálculo de TDOA	13
3.2.2 Algoritmo da Multilateração	15
3.2.2.1 Linearização	15
3.3 FILTROS	16
3.3.1 O Domínio da Frequência	16
3.3.2 Base matemática dos métodos numéricos e desenvolvimento dos filtros	16
4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	19
4.1 MATERIAIS	19
4.1.1 Microfones	19
4.1.2 Processador	20
4.1.2.1 Conversor Analógico Digital - ADC	22
4.1.3 Rotary Encoder	22
4.1.4 Display OLED	23
4.1.5 Sensor de Temperatura	24
4.1.6 Modelamento 3D	26
4.2 O PROTÓTIPO	27
4.2.1 Montagem do Protótipo	27
4.2.1.1 Posicionamento dos Microfones	27
4.2.2 Velocidade do Som	29
4.2.3 Algoritmo de Comandos	30
4.2.3.1 Tempo de Amostragem e Buffer	30
4.2.3.2 Exibição em Tela	31
4.2.3.2.1 Divisão das faixas de frequência	33
5 SIMULAÇÃO E RESULTADOS	35
5.1 PLANEJAMENTO DE TESTES	35
5.2 FUNCIONAMENTO DO PROTÓTIPO	35
5.2.1 Correção no Tempo de Amostragem	35
5.2.2 Correção na Multilateração	36
5.3 REALIZAÇÃO DOS TESTES	36
5.3.1 Aquisição	36
5.3.2 FFT	37
5.3.3 Filtros	38
5.3.3.1 Filtro Passa-Baixa	38
5.3.3.2 Filtro Rejeita-Faixa	38

5.3.4 Correlação Cruzada	39
5.3.5 Multilateração	41
5.3.5.1 Simulação	41
5.3.5.2 Teste	42
5.3.6 Performance	43
5.4 LIMITAÇÕES	44
6 TEMPO E RECURSOS DESPENDIDOS NO PROJETO	46
6.1 CRONOGRAMA	46
6.2 TEMPO DEMANDADO	46
6.3 CUSTOS	47
7 CONCLUSÃO	48
7.1 TRABALHOS FUTUROS	48

1 INTRODUÇÃO

A percepção da direção dos sons é um fenômeno que ocorre de maneira inconsciente e está presente desde cedo no ciclo de vida humano. As pessoas geralmente conseguem discernir a direção de um som usando dois ouvidos. A combinação dos sinais ligeiramente diferentes que chegam aos ouvidos nos permite deduzir, intuitivamente, a direção do som.

Ao longo da história foram desenvolvidos dispositivos capazes de fazer essa mesma distinção, suprindo deficiências e limitações do ouvido humano, através de processamento computacional e aquisição de dados por periféricos sensíveis.

Neste documento, apresentaremos nosso sistema acústico de localização portátil, executado em processador ARM embarcado. Em seguida, será feita uma investigação dos métodos usados para localizar sons ou outras fontes com características semelhantes. Esta investigação levará à escolha e montagem de um método que fornecerá uma solução. Examinar-se-á a teoria de como localizar uma fonte sonora, encontrando uma posição 3D. Junto com a descrição teórica, simulações e medições são realizadas a fim de investigar e mostrar as propriedades do método e verificar a base da teoria. Como forma de personalizar o dispositivo, filtros digitais configuráveis estarão disponíveis para o usuário, para que o mesmo possa selecionar faixas de frequência previamente estabelecidas e alterar sua amplitude. Será mostrado o design de uma plataforma de hardware dedicado para implementação do método, que envolverá a interação entre a linguagem de alto nível C++ e o hardware.

1.1 APLICAÇÕES

O protótipo a ser desenvolvido é de caráter genérico, sem um uso específico. Isso abre portas para inúmeras aplicações, e possíveis formas de uso. Algumas aplicações imaginadas são:

- Uso em empresas de dedetização, com a localização de animais e insetos indesejados dentro da casa dos clientes, através do som emitido pelos mesmos.
- Garantir um perfeito isolamento acústico de um cômodo. O dispositivo captaria possíveis vazamentos de som, e sua localização específica, abrindo assim a possibilidade de uma correção pontual no processo de isolamento do ambiente.
- Com o auxílio de uma câmera, o dispositivo poderia ser utilizado em videoconferências, onde a localização do emissor de som seria conhecida e a câmera poderia "seguir" a posição do som.
- Utilização por policiais e/ou bombeiros para receberem com rapidez a localização de disparos de arma de fogo ou de explosões.

- Dispositivo de auxílio em um teste auditivo. O paciente poderia ser colocado em uma sala e ao perceber um sinal sonoro deveria indicar sua posição. O dispositivo então forneceria a resposta correta ao paciente.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do projeto é testar um algoritmo de localização em um dispositivo portátil a fim de localizar a posição de uma fonte sonora em um ambiente arbitrário. O método será generalizado tanto quanto possível, para que um uso em diversas aplicações seja possível. Também objetiva-se verificar se os métodos implementados são suficientemente precisos em ambientes reais com ruído, reflexos do sinal nas paredes e com fontes sonoras interferentes.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Soluções eficientes para esse problemas já foram apresentadas em diversos trabalhos, mas utilizando matrizes de microfones onde o número de microfones usados costuma ser alto, o que proporciona um custo mais alto e coloca altos requisitos no hardware de processamento. Nosso objetivo será usar uma quantidade limitada de poder de processamento e número de microfones, possibilitar filtros configurados pelo usuário para frequências sabidamente indesejadas, bem como oferecer um produto que seja suficientemente portátil e ergonômico, com uma interface amigável ao usuário.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 LOCALIZAÇÃO DE UMA FONTE SONORA

Nesta seção, três dos métodos mais conhecidos para localizar uma fonte sonora serão descritos. Esses três métodos são: multilateração, triangulação e beamforming.

3.1.1 Multilateração

A multilateração usa a diferença de tempo de chegada (TDOA) para determinar posições prováveis da fonte para vários pares de sensores. TDOA descreve a diferença de tempo entre a chegada do sinal a um sensor e outro. Essa diferença será a mesma para todos os locais de origem ao longo de um hiperbolóide e para encontrar a posição da fonte em um cenário 2D, é necessário outro par de sensores. A posição de uma fonte pode ser determinada pelo ponto em que a hipérbole do primeiro par de sensores e a hipérbole do segundo par de sensores se intersectam. Deve-se notar que um microfone de cada um dos dois pares de sensores pode ser o mesmo microfone, mas os microfones devem ser distribuídos em ambas as dimensões para uma solução completamente única. Além disso, é possível usar uma terceira hipérbole entre o primeiro e o terceiro microfone, que interceptará as duas primeiras hipérboles no mesmo ponto, permitindo maior precisão. Para uma solução única no caso 3D, são necessários quatro microfones distribuídos em todas as três dimensões, porém a função resultante é não convexa, o que a torna mais difícil de ser resolvida. Para contornar essa dificuldade, usam-se cinco sensores, resultando assim em uma função linear. (BUCHER; MISRA, 2002)

3.1.2 Triangulação

A triangulação é o processo de determinar a localização de um ponto, medindo apenas ângulos para ele a partir de pontos conhecidos em cada extremidade de uma linha de base fixa, em vez de medir distâncias para o ponto diretamente como na trilateração. O ponto pode então ser fixado como o terceiro ponto de um triângulo com um lado conhecido e dois ângulos conhecidos. Ele se inspira na técnica de triangulação em topografia, onde o alcance de um ponto distante pode ser encontrado usando medições de ângulos múltiplos feitas a partir de uma linha de base bem definida. (TEKDAS; ISLER, 2010)

3.1.3 Beamforming

O beamforming é um dos métodos preferidos nos arrays de sensores e suporta o uso de muitas entradas, oferecendo alta precisão angular. O beamforming tradicional desconsidera a distância e assume as ondas planas, o que só é possível quando a fonte está longe do conjunto de sensores. A forma mais simples de beamforming é a versão de atraso e soma em que uma determinada direção corresponde a uma diferença de tempo específica entre dois sensores. Esses padrões podem ser lineares, logarítmicos ou semi-aleatoriamente distribuídos dependendo do propósito, mas a posição deve sempre ser conhecida. (DALSKOV; OLESEN, 2014)

3.1.4 Escolha do Método

Cada um desses métodos usa técnicas diferentes para localizar uma fonte usando dois sensores ou mais. Alguns dos métodos requerem uma análise mais complexa dos dados adquiridos, o que está além do propósito deste projeto, onde um método simplificado é preferido. A trilateração calcula a partir de distâncias absolutas e conhecidas, o que, neste caso, não é possível, pois o sinal na fonte é desconhecido. O Beamforming descarta a distância até a origem e é mais frequentemente usado com grandes matrizes e pode ter uma grande complexidade computacional que também está além do escopo deste projeto. Para saber mais sobre cada um dos métodos apresentados consulte (BUCHER; MISRA, 2002), (TEKDAS; ISLER, 2010), (DALSKOV; OLESEN, 2014).

Isso nos leva à multilateração, que não requer informações da fonte além daquelas recebidas pelos sensores. Com um sinal ideal livre de ruído, uma posição precisa da fonte pode ser obtida. Se, no entanto, o sinal tiver pouca energia, for ruidoso ou a distância da fonte for muito maior do que a separação dos microfones, o resultado poderá se tornar impreciso.

3.2 IMPLEMENTAÇÃO DA MULTILATERAÇÃO

3.2.1 Cálculo de TDOA

Há mais de uma maneira de calcular o TDOA de dois ou mais sinais. Uma maneira intuitiva e comumente usada é o método de correlação cruzada geral (CCG), em que os dois sinais são correlacionados entre si e o argumento máximo da correlação será o deslocamento no tempo. O método CCG exige uma razoável taxa de amostragem e a separação entre os microfones é necessária para obter uma boa resolução angular, especialmente para ângulos próximos ao eixo dos microfones. (GUSTAFSSON; GUNNARSSON, 2003) Se a taxa de amostragem é

muito baixa, o ângulo será quantificado com uma resolução pequena, tendo-se um resultado mais impreciso.

A correlação cruzada geral, para sinais discretos, é definida pela equação [3.1](#):

$$(f \star g)[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f^*[m]g[m+n] \quad (3.1)$$

Onde f e g são os sinais recebidos que queremos analisar. A correlação cruzada é de natureza semelhante à convolução de duas funções, como podemos observar na comparação da [Figura 1](#). Como mencionado anteriormente, a captura do som é feita por 5 microfones de eletreto, de forma que se faz necessário o cálculo do TDOA entre os 5 sinais. Assim, toma-se um desses sinais como a referência. Foram definidas posições arbitrárias para cada um dos 5 microfones de eletreto nos eixos x , y , z e escolheu-se um microfone para ser o microfone de posição $(0,0,0)$. A partir disso calcula-se o TDOA de todos os outros sinais em relação à referência. Com isso, resultados positivos e negativos são gerados. Toma-se o mais negativo deles e parametriza-se os outros a partir deste. Esse sinal então é excluído do cálculo da multilateração, como veremos a seguir.

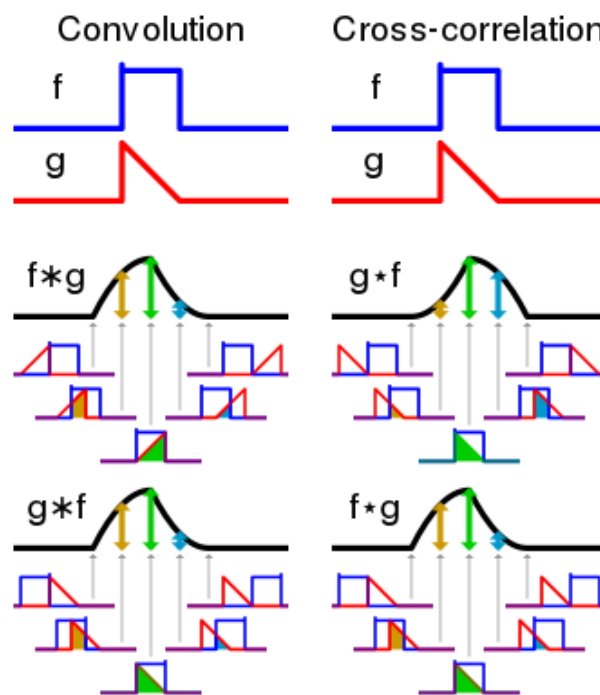


Figura 1 – Comparação visual da convolução e correlação cruzada.

Fonte: [Wikipedia](#)¹

¹ Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Cross-correlation>. Acesso em: 12 mai 2018.

3.2.2 Algoritmo da Multilateração

Na seção [3.1.1](#) vimos como se dá a construção do pensamento da multilateração. Veremos agora como isso foi processado de forma matemática e computacional.

Assumindo $i = 1, \dots, k$ como sendo sensores na posição p_i que tem como saída uma marca temporal (*timestamp*) t_i quando registram um sinal com velocidade de propagação v de um emissor que está localizado em uma posição desconhecida x , tempo de início de sinal t e distância definida por $v(t_i - t) = \|x - p_i\|$. Se definimos como sensor c o primeiro sensor a registrar um evento, então o sinal viajou por $(t_c - t)$ unidades de tempo e uma distância de $v(t_c - t) = \|x - p_c\|$ antes de atingir o primeiro sensor. Além disso, o TDOA entre o timestamp de cada sensor e o timestamp do sensor inicial é $(t_i - t_c)$ obtendo-se a distância $v\Delta t_i = v(t_i - t_c)$ percorrida pelo sinal desde que foi inicialmente registrado e alcança o i -ésimo sensor. Das definições acima tem-se algumas relações.

$$\|x - p_i\| = v(t_i - t) \quad (3.2)$$

e a fórmula subsequente

$$\|x - p_i\| = v(t_i - t_c) + \|x - p_c\| \quad (3.3)$$

A Equação [3.3](#) pode ser ilustrada, para três sensores onde $i = 1, 2$ e $c = 1$, na figura a seguir. [\(ANDERSEN, 2011\)](#)

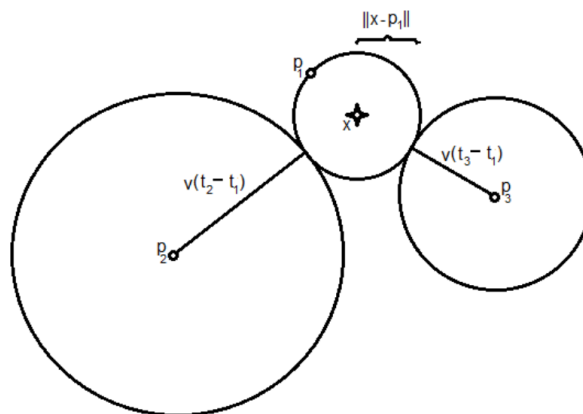


Figura 2 – Relação entre as distâncias.

Fonte: Andersen, 2011. ²

3.2.2.1 Linearização

Conforme as definições feitas por [\(ANDERSEN, 2011\)](#) e descritas acima, existem vários métodos de solucionar o problema. A forma escolhida foi a da redução para forma linear.

² Disponível em: <http://files.andersen.im/analytics>. Acesso em: 12 mai 2018.

De acordo com Bucher e Misra, para a resolução por linearização são usados três pares únicos de sensores i, j em adição ao sensor c , o que reduz o problema a um sistema linear de três equações, requerendo, no mínimo, cinco sensores não coplanares. Para acompanhar a dedução detalhada desta solução consulte (BUCHER; MISRA, 2002). Temos como resultado um sistema linear de equações com a seguinte forma

$$a_{ijc}^T x = b_{ijc} \quad (3.4)$$

onde

$$\begin{aligned} a_{ijc} &= 2(v(t_j - t_c)(p_i - p_c) - v(t_i - t_c)(p_j - p_c)) \\ b_{ijc} &= v(t_i - t_c)(v^2(t_j - t_c)^2 - p_j^T p_j) \\ &\quad + (v(t_i - t_c) - v(t_j - t_c)) p_c^T p_c \\ &\quad + v(t_j - t_c)(p_i^T p_i - v^2(t_i - t_c)^2) \end{aligned}$$

que pode ser expresso simplesmente como uma expressão matricial

$$Ax = b \quad (3.5)$$

Para resolver esta expressão apenas computa-se a matriz inversa de A de forma que

$$\hat{x} = A^{-1}b = \frac{b}{A} \quad (3.6)$$

3.3 FILTROS

3.3.1 O Domínio da Frequência

Para obter um resultado mais preciso da multilateração podemos utilizar a técnica de filtros para atenuar características indesejadas de uma frequência conhecida e indesejada. Tendo isso em mente, optou-se por transformar o sinal de entrada, que está no domínio do tempo, para o domínio da frequência, através da *Fast Fourier Transform* (FFT). A FFT é um algoritmo que amostra um sinal durante um período de tempo (ou espaço) e o divide em seus componentes de frequência. Esses componentes são oscilações sinusoidais únicas em frequências distintas, cada uma com sua própria amplitude e fase. A FFT é um algoritmo otimizado para calcular a DFT (*Discrete Fourier Transform*). Para saber mais sobre a FFT e seu algoritmo de implementação consulte (V.; W., 1999).

3.3.2 Base matemática dos métodos numéricos e desenvolvimento dos filtros

Primeiramente, estabeleceu-se a metodologia numérica para os filtros, com o sinal de interesse no domínio das frequências. Sabendo-se que os dados são discretos, aplicou-se FFT

para a avaliação da DFT do sinal, cuja representação é dada pela Equação X:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi kn/N} \quad (3.7)$$

Onde N é o total de pontos do sinal, x corresponde ao valor de amplitude associado ao ponto n , no domínio original, e X , ao valor de amplitude associado ao ponto k . Assim, ao se computar a FFT a partir de dois vetores contendo os valores de x e n , são obtidos dois vetores contendo os valores de X_k e w_k , sendo w o valor de frequência e X o valor da amplitude.

O filtro opera de forma a ajustar a amplitude de sinal de uma determinada faixa de frequência, obtendo um novo valor de amplitude A_k , podendo assim ter características de um filtro passa-baixa, passa-alta, rejeita-faixa e passa-faixa.

Caso seja escolhida a aplicação de um filtro passa-baixa, é necessária a seleção de uma frequência de corte para o valor máximo de frequência desejado, w_{max} . O filtro então ajusta todos os valores de amplitudes correspondentes às frequências acima de w_{max} .

$$X_k = \begin{cases} X_k; & \text{se } w_k < w_{max} \\ A_k; & \text{se } w_k \geq w_{max} \end{cases}; 0 \leq k \leq N - 1 \quad (3.8)$$

Caso seja escolhida a aplicação de um filtro passa-alta, é necessária a seleção de uma frequência de corte para o valor mínimo de frequência desejado, w_{min} . O filtro então ajusta todos os valores de amplitudes correspondentes às frequências abaixo de w_{min} .

$$X_k = \begin{cases} X_k; & \text{se } w_k > w_{min} \\ A_k; & \text{se } w_k \leq w_{min} \end{cases}; 0 \leq k \leq N - 1 \quad (3.9)$$

Para o filtro passa-faixa ser aplicado, é necessária a seleção de uma frequência de corte para o valor máximo de frequência desejado, w_{max} , e um valor mínimo, w_{min} , para que seja definido o intervalo da faixa. O filtro ajusta todos os valores de amplitude correspondentes às frequências acima de w_{max} e abaixo de w_{min} .

$$X_k = \begin{cases} X_k; & \text{se } w_{min} \leq w_k \leq w_{max} \\ A_k; & \text{se } w_k < w_{min} \text{ ou } w_k > w_{max} \end{cases}; 0 \leq k \leq N - 1 \quad (3.10)$$

Para o filtro rejeita-faixa ser aplicado, também é necessária a seleção de uma frequência de corte para o valor máximo de frequência desejado, w_{max} , e um valor mínimo, w_{min} , para que seja definido o intervalo da faixa. O filtro zera todos os valores de amplitude correspondentes às frequências abaixo de w_{max} e acima de w_{min} .

$$X_k = \begin{cases} X_k; & \text{se } w_{min} \geq w_k \geq w_{max} \\ A_k; & \text{se } w_k > w_{min} \text{ ou } w_k < w_{max} \end{cases}; 0 \leq k \leq N - 1 \quad (3.11)$$

Após a aplicação do filtro digital, o sinal é retornado ao domínio do tempo através da Transformada Inversa (IFFT), que é descrita como:

$$X_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{i2\pi kn/N} \quad (3.12)$$

4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

A ordem de funcionamento do dispositivo de localização sonora começa na captação dos sons através de 5 módulos de microfones de eletreto, como mencionado anteriormente, ligados diretamente às entradas analógicas do nosso microprocessador, onde um Conversor Analógico Digital (*Analog Digital Converter* - ADC) faz a interpretação desses valores como uma sequência de bits. Feita essa conversão, os sinais capturados passam pelo cálculo da diferença do tempo de chegada (TDOA), através do método da correlação cruzada. A partir do TDOA é possível então calcular a direção da fonte sonora, utilizando-se a multilateração, que foi o método escolhido para ser implementado, pelos motivos apresentados em 3.1.4. Como forma de filtrar frequências de ruídos conhecidos, passamos os dados para o domínio da frequência, através do cálculo da *Fast Fourier Transform (FFT)*, e filtramos a frequência escolhida pelo usuário. Para uma experiência fácil e agradável ao usuário, todas as informações relevantes são apresentadas em um display OLED, e as frequências de filtro podem ser selecionadas por *rotary encoders*.

Com o embasamento teórico e a metodologia de implementação apresentado nos capítulos anteriores, desenvolveu-se o projeto com o objetivo de localizar fontes sonoras, utilizando a placa MBED NUCLEO-L476RG, uma plataforma flexível e acessível para prototipação, que usa um microcontrolador STM32 Cortex-M4. O sinal sonoro é coletado através de 5 microfones de eletreto, posicionados estrategicamente para melhor aquisição de dados. O design do produto foi feito por modelamento e impressão 3D.

Por fim, os dados pertinentes ao usuário são mostrados em um display OLED preto e branco, com a possibilidade de interatividade com o usuário na escolha de frequências a serem filtradas através de *rotary encoders*. A fim de obter a velocidade do som de acordo compatível com todos os ambientes, foi adicionado um sensor de temperatura K015-DHT11, pois, como veremos a seguir, a velocidade do som pode ser descrita como uma função da temperatura.

Para compilação e debug, foi utilizada a IDE *IAR Embedded Workbench*, plataforma especializada em otimizações de velocidade para a geração de um código de alta performance para ARMs.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Microfones

Para a captura do som, foi utilizado microfone de eletreto com amplificador acoplado. Esta placa totalmente montada e testada vem com um microfone de eletreto que opera na faixa de frequência de 20 a 20 KHz. (MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, 2001) O amplificador

operacional contido nessa placa é o MAX4466, com ganho ajustável. Segundo o fabricante, essa placa foi projetada para circuitos alteradores de voz, gravação de áudio/amostragem e projetos que fazem uso de recursos como a FFT.



Figura 3 – Amplificador de Microfone Eletreto - MAX4466 com Ganho Ajustável.

Fonte: Adafruit - MAX4465-MAX4469 Datasheet ¹

4.1.2 Processador

O hardware escolhido para se desenvolver o projeto foi a placa MBED NUCLEO-L476RG. Ela contém o microprocessador STM32L476RGT6, ARM®32-bit Cortex®-M4 CPU, 3 ADC com 16 canais de 12 bits, memória 128kB SRAM e 1MB de memória de código. (MBED, 2018)

¹ Disponível em: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/MAX4465-MAX4469.pdf>. Acesso em: 07 jun 2018.



Figura 4 – STM32 Nucleo-L476RG.

Fonte: MBED ²

A descrição de sua arquitetura interna pode ser observada no diagrama da figura ⁵:

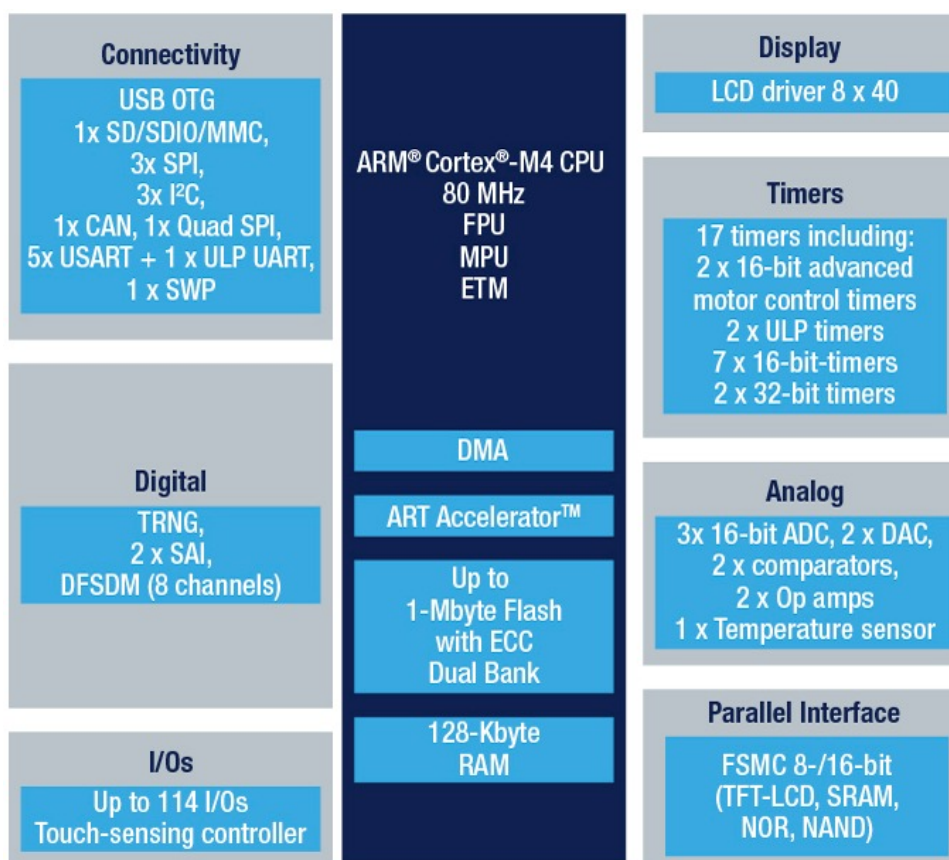


Figura 5 – Diagrama em blocos da arquitetura interna STM32 Nucleo-L476RG .

Fonte: STMicroelectronics. ³

² Disponível em: <https://os.mbed.com/platforms/ST-Nucleo-L476RG/>. Acesso em: 07 jun 2018.

³ Disponível em: <https://www.st.com/en/microcontrollers/stm32l476rg.html>. Acesso em: 07 jun 2018.

4.1.2.1 Conversor Analógico Digital - ADC

Para processar a captura do som e convertê-lo em sinal digital, foi utilizado o ADC embutido na placa. Com isso, visando obter melhor processamento da informação, empregou-se o uso de acesso direto à memória (DMA).

O acesso direto à memória é usado para fornecer transferência de dados em alta velocidade entre periféricos e memória, bem como memória para memória. Os dados podem ser movidos rapidamente pelo DMA sem nenhuma ação da CPU. Isso mantém os recursos da CPU livres para outras operações. O processador escolhido possui dois controladores DMA, que, por sua vez, possuem 14 canais no total, cada um dedicado a gerenciar solicitações de acesso à memória de um ou mais periféricos. Cada um tem um árbitro para lidar com a prioridade entre as solicitações de DMA. (MBED, 2018)

Para este projeto, foram utilizados 5 canais de ADC conectados a um canal DMA.

4.1.3 Rotary Encoder

O *rotary encoder* é um dispositivo de entrada rotativo com um botão que fornece uma indicação de quanto o botão foi girado e em que direção ele está girando. Neste projeto foi utilizado o modelo Keyes KY-040.

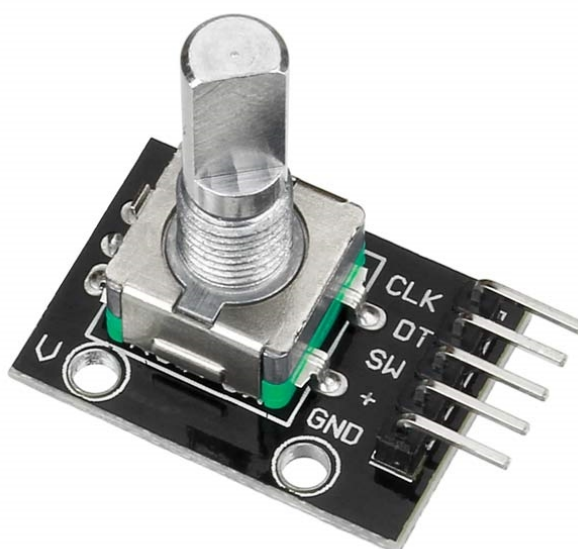


Figura 6 – Rotary Encoder Keyes KY-040.

Fonte: Addicare. ⁴

⁴ Disponível em: <https://www.addicore.com/rotary-encoder-knob-p/ad267.htm>. Acesso em: 29 mai 2018.

O rotary encoder possui um número fixo de posições por revolução e essas posições são facilmente sentidas como pequenos “cliques” a medida que o codificador é girado. Seu circuito equivalente é mostrado na figura abaixo:

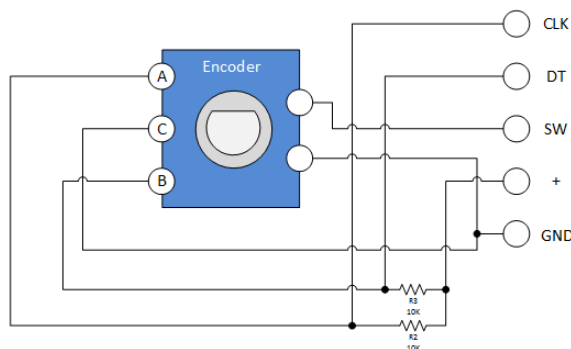


Figura 7 – Esquemático do Rotary Encoder.

Fonte: Henry's Bench - A place for the electronic hobbyist ⁵

4.1.4 Display OLED

O display utilizado foi o modelo SSD1306, que consiste em um driver CMOS OLED / PLED de chip único com controlador para sistema de display gráfico matricial, com resolução de 128x64 pontos.



Figura 8 – Display OLED.

Fonte: Curto Circuito. ⁶

⁵ Disponível em: <https://i0.wp.com/henrysbench.capnfatz.com/wp-content/uploads/2015/05/Keyes-KY-040-Rotary-Encoder-Module-Schematic.png>. Acesso em: 29 mai 2018.

O SSD1306 incorpora controle de contraste, RAM e oscilador, o que reduz o número de componentes externos e o consumo de energia. Tem controle de brilho de 256 passos. Os dados / comandos são enviados do MCU geral através da interface paralela compatível com a série 6800/8000 selecionável por hardware, interface I2C ou interface serial periférica. É adequado para aplicações portáteis compactas. (SYSTECH, 2008)

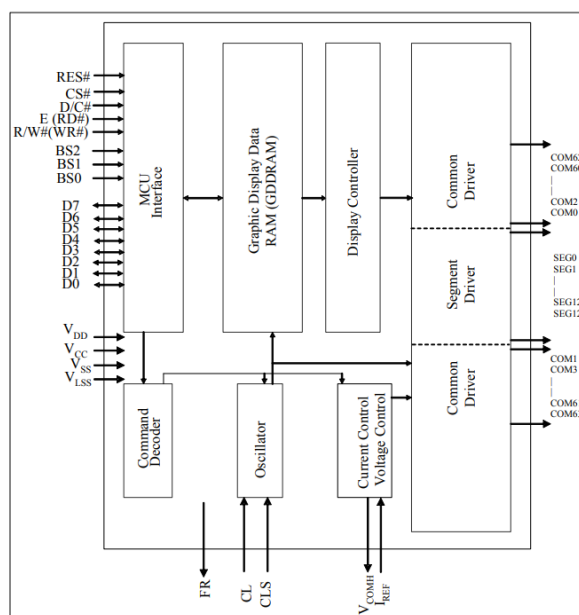


Figura 9 – Diagrama em blocos do Display OLED.

Fonte: Datasheet .⁷

4.1.5 Sensor de Temperatura

O sensor de temperatura utilizado foi o modelo DHT11, que consiste em um sensor capaz de aferir temperatura e umidade permitindo leituras de temperaturas entre 0 a 50 Celsius e umidade entre 20 a 90%.

⁶ Disponível em: <https://www.curtocircuito.com.br/display-oled-128x64-px-1-3-4-pin-azul.html>. Acesso em: 12 jun 2018.

⁷ Disponível em: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SSD1306.pdf>. Acesso em: 12 jun 2018.

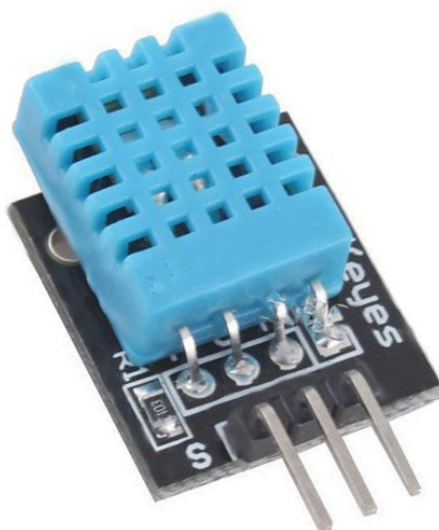


Figura 10 – Sensor de Temperatura.

Fonte: Components 101.⁸

O sensor DHT11 vem com um NTC dedicado para medir a temperatura e um microcontrolador de 8 bits para gerar os valores de temperatura e umidade como dados seriais. O sensor também é calibrado de fábrica e, portanto, fácil de interagir com outros microcontroladores. (MOUSER, 2018)

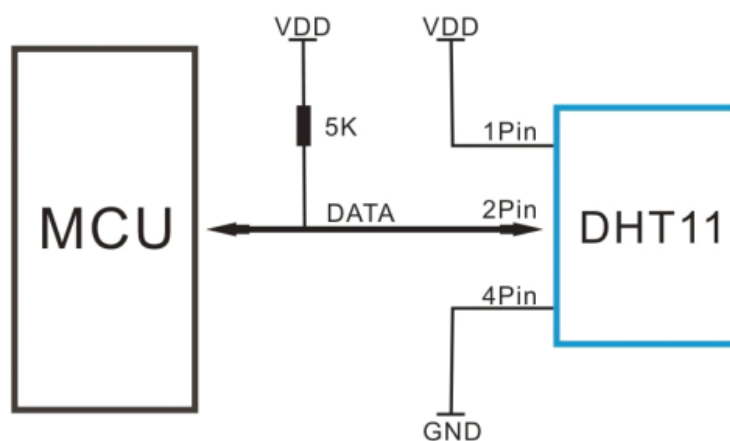


Figura 11 – Diagrama em blocos da aplicação típica do sensor de temperatura DHT11.

Fonte: DHT11 Datasheet.⁹

⁸ Disponível em: <https://components101.com/dht11-temperature-sensor>. Acesso em: 12 jun 2018.

⁹ Disponível em: https://www.optimusdigital.ro/index.php?controller=attachment&id_attachment=59. Acesso em: 12 jun 2018.

4.1.6 Modelamento 3D

As impressoras 3D e suas possibilidades são algo que vemos cada vez mais no nosso dia-a-dia, a precisão e facilidade fornecidas por essa tecnologia é algo incomparável; hoje podemos produzir peças pequenas nos mínimos detalhes utilizando essas máquinas e além disso personalizar o produto para atender necessidades específicas. É aí que entra a modelagem 3D de peças, utilizando os softwares de edição tridimensional, podemos projetar as peças que desejamos fabricar e exportar o arquivo para uma impressora 3D. Tendo a impressora, o material e o modelo podemos produzir com precisão o que desejarmos.

Para este projeto, foi utilizado o software AutoDesk Fusion 360 para desenvolvimento do modelo, e impressora 3D Anet A8.

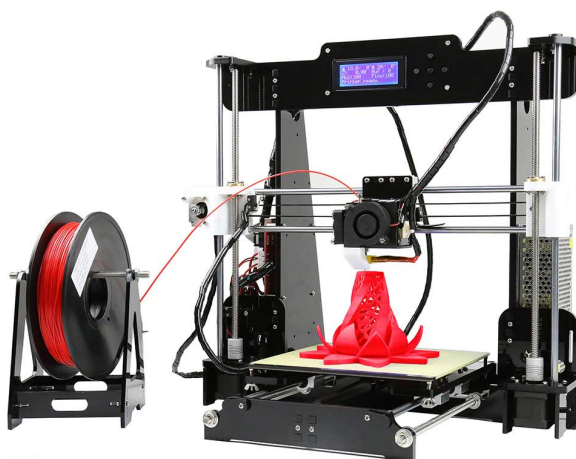


Figura 12 – Impressora 3D utilizada no projeto.

Fonte: GearBest. ¹⁰

Para a impressão, foi utilizado o PLA (Ácido Polilático), que é o material de impressão 3D mais comum, porque é fácil de usar e é feito a partir de recursos renováveis e, ainda, biodegradável (MATTERHACKERS, 2018).

¹⁰ Disponível em: <https://br.gearbest.com/3d-printers-3d-printer-kits>. Acesso em: 11 jun 2018.



Figura 13 – Material biodegradável PLA do fabricante HatchBox.

Fonte: HatchBox. ¹¹

4.2 O PROTÓTIPO

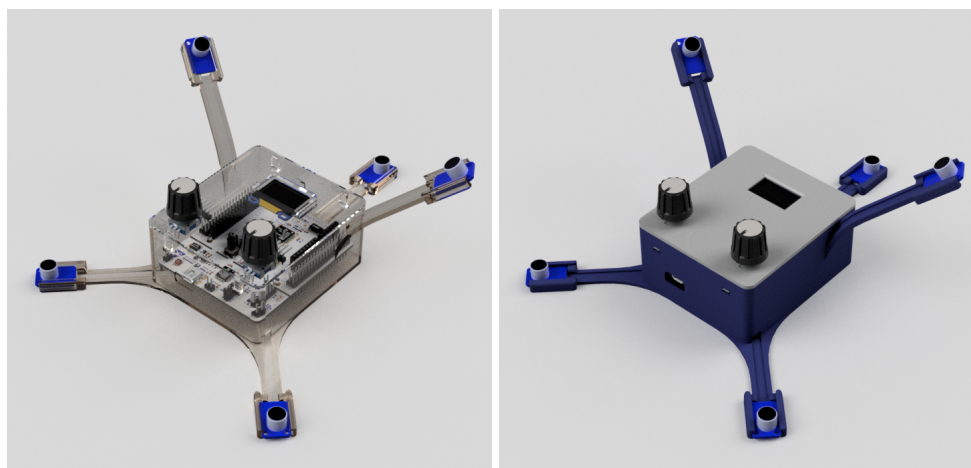
4.2.1 Montagem do Protótipo

Levando em consideração a necessidade de termos cinco microfones não coplanares conforme destacado na sessão ^{3.2.2}, foram arbitradas posições, conforme descreveremos abaixo. Como o objetivo do projeto é ter um produto portátil, pensou-se na ergonomia do produto, bem como em dimensões necessárias para que todos os periféricos fossem acoplados da melhor maneira. Dito isto, obteve-se o seguinte resultado:

4.2.1.1 Posicionamento dos Microfones

Conforme mencionado acima, o posicionamento dos microfones foi feito de forma arbitrária, tendo como objetivo ter as três dimensões (x, y, z) com valores diferentes para cada um dos microfones. Arbitrou-se também uma referência para cada microfone conforme figura abaixo.

¹¹ Disponível em: <https://hatchbox3d.com/collections/pla/products/3d-pla-1kg1-75-blk>. Acesso em: 11 jun 2018.

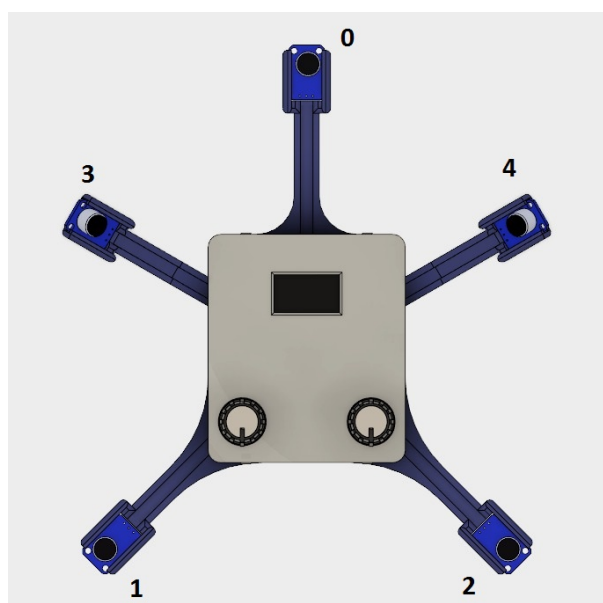


(a) Transparente.

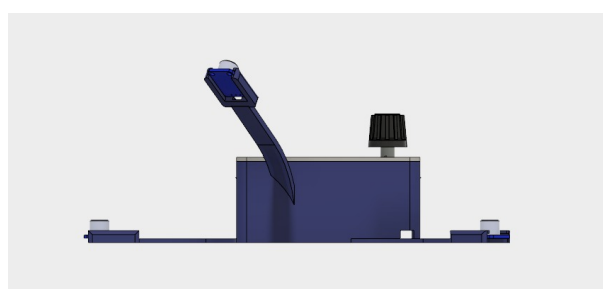
(b) Produto Final.

Figura 14 – Vista 3D Renderizada do Protótipo.

Fonte: Autoria Própria.

**Figura 15 – Vista de cima do protótipo e referenciamento dos microfones.**

Fonte: Autoria Própria.

**Figura 16 – Vista lateral do protótipo.**

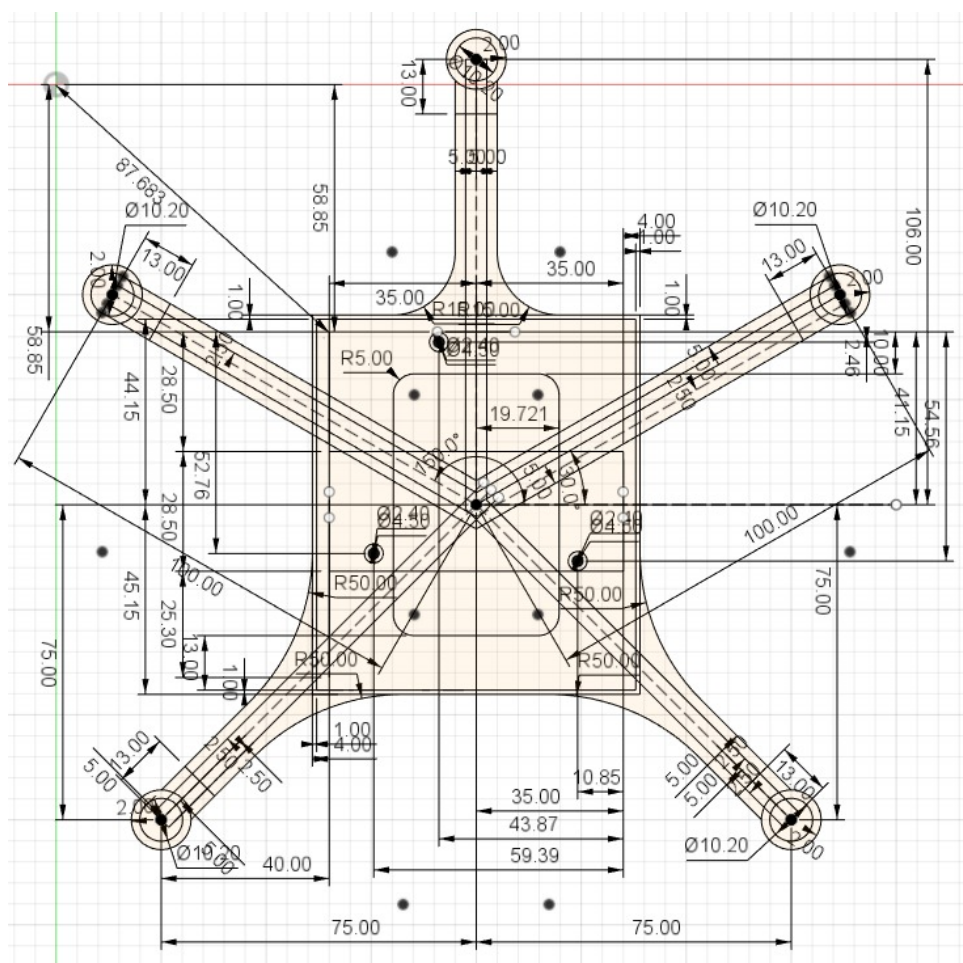
Fonte: Autoria Própria.

Assim, tem-se que as posições de cada um dos microfones são:

Tabela 1 – Posição dos Microfones

Microfone	Posição (mm)		
	x	y	z
0	0	0	0
1	-74.6	-180.1	0
2	74.6	-180.1	0
3	-80.7	-58.9	72.7
4	80.7	-58.9	72.7

Fonte: Autoria Própria.

**Figura 17 – Dimensões do protótipo.**

Fonte: Autoria Própria.

4.2.2 Velocidade do Som

O som é uma onda mecânica longitudinal, e se propaga por meio de pequenas variações do meio material, ou seja, microscópicas contrações e expansões dos materiais que provocam esse tipo de onda. Dessa forma, o meio em que o som se propaga afeta a sua velocidade, da mesma forma que a temperatura. Para tanto, através da utilização do sensor DTH11 a tempe-

ratura ambiente é medida para que a velocidade do som seja calculada de forma mais precisa, através da relação

$$c = c_0 \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (4.1)$$

onde c_0 corresponde à velocidade do som a 0°C e tem o valor de $c_0 = 331,45 \text{ m/s}$, T corresponde à temperatura ambiente em Kelvin, e T_0 é o valor em Kelvin equivalente a 0°C . (FREITAS, 2005)

4.2.3 Algoritmo de Comandos

O processamento dos dados dos microfones e sensor de temperatura, o cálculo da correlação cruzada, multilateração, FFT e filtros, e a informação mostrada nos display foram realizados com o uso da placa MBED NUCLEO-L476RG, através da elaboração de um código utilizando linguagem de programação C++. O algoritmo seguiu a seguinte sequência:

- Capturar o som através dos ADCs, com um limiar de potência configurado pelo usuário, e passar a informação coletada para um buffer.
- Passar a informação para o domínio da frequência, através do cálculo da FFT, destacando sua frequência dominante e potência do sinal. Processar e aplicar o filtro configurado pelo usuário. Transformar a informação novamente para o domínio do tempo.
- Calcular a correlação cruzada, e a partir de seu valor máximo, calcular o TDOA.
- Fazer leitura da temperatura ambiente e calcular a velocidade do som.
- Calcular a posição do emissor através do algoritmo de multilateração.
- Atualizar e imprimir os valores capturados e calculados no display OLED.

Os processos realizados pelo algoritmo estão apresentados na figura 18.

4.2.3.1 Tempo de Amostragem e Buffer

Para conseguir capturar e processar os dados recebidos pelos microfones de maneira que a velocidade de processamento seja pequena o suficiente para não apresentar um atraso para o usuário, definiu-se um tempo de amostragem de $16,3397 \mu\text{s}$, correspondendo a 61201 Hz .

Ainda pensando no processamento, mas mantendo a resolução do dispositivo de forma a gerar resultados mais precisos, o tamanho definido para o buffer foi de 512 amostras, com tempo de buffer de $8,37 \text{ ms}$. Para uma captura mais precisa, com mais amostras, seria necessária a utilização de buffers maiores. Porém, devido à uma limitação do tamanho da memória

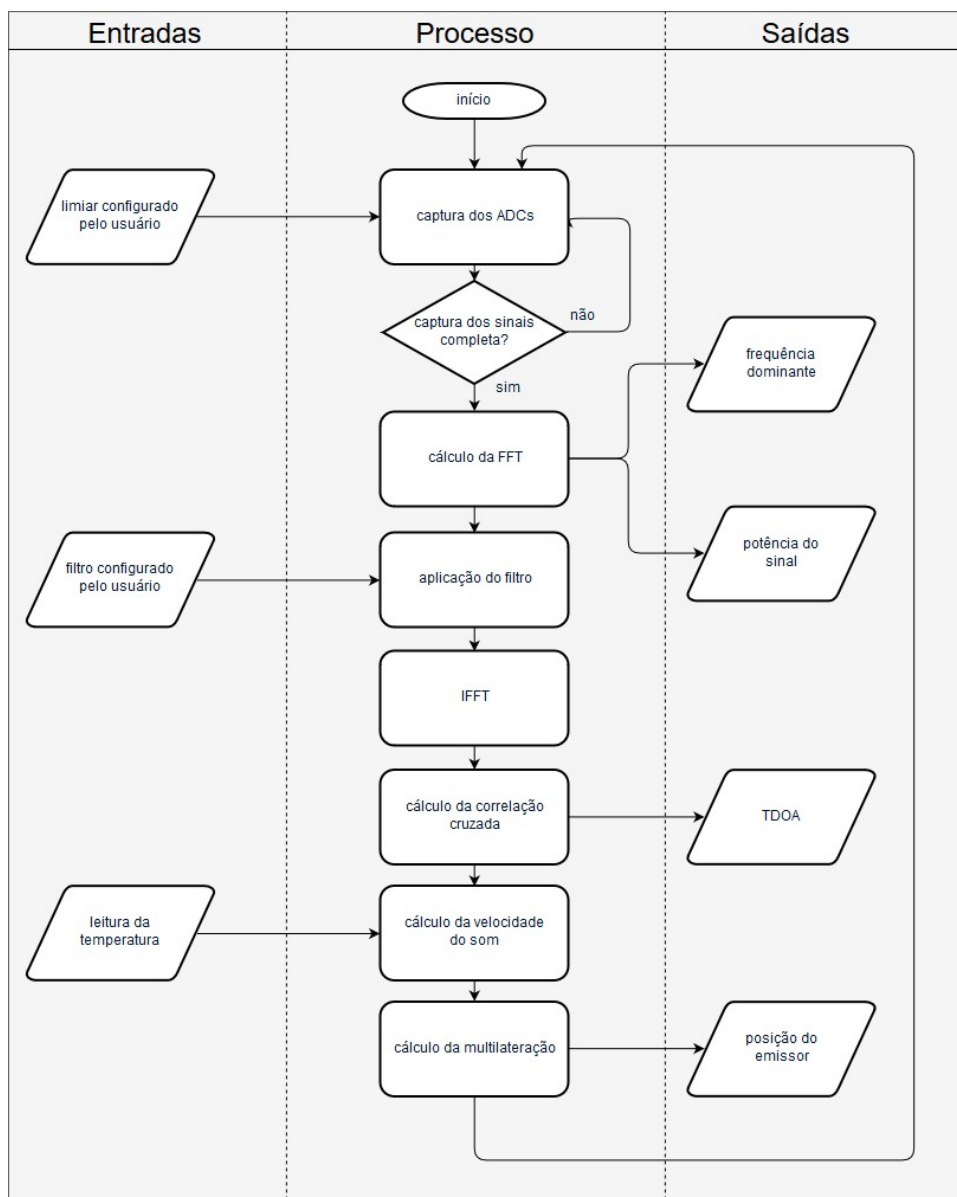


Figura 18 – Fluxograma do projeto.

Fonte: Autoria Própria.

RAM da placa, limitamos a dimensão do buffer, o que também impossibilita uma maior distância entre os microfones (o que aumentaria a precisão do algoritmo da multilateração).

A aquisição dos dados é feita configurando a leitura e conversão contínua dos cinco canais de ADC, que por DMA geram uma interrupção no processador apenas quando a conversão dos cinco canais for completada.

4.2.3.2 Exibição em Tela

Para o User Interface (UI) criou-se a classe chamada OLED que é formada pela composição dos objetos de um display SSD1306 e dois Rotary Encoders. O construtor da classe

define quais são os pinos que serão usados para o display OLED e para os rotary encoders e inicializa as variáveis da classe com o valor apropriado. Para enviar valores ao display utiliza-se os sets apropriados de FFT e posição desejadas. A função de atualização dos valores que faz o trabalho de chamar a função correspondente ao estado da tela atual e redesenhar a tela com os novos valores é executada dentro de uma thread própria a cada 50 ms. A classe também realiza uma leitura nos Rotary Encoders por interrupções para ver se houve algum comando do usuário. Se esse for o caso, a função de atualização da tela poderá mudar uma opção de um menu ou passar para outra tela da próxima vez que for chamada dependendo do contexto em que estiver.

Na tela inicial temos 2 opções de visualização: a bússola de posicionamento com a possibilidade de edição do limiar, o sinal no domínio da frequência e as opções de filtro, distribuídos em dois modos: modo de visualização e modo de edição.

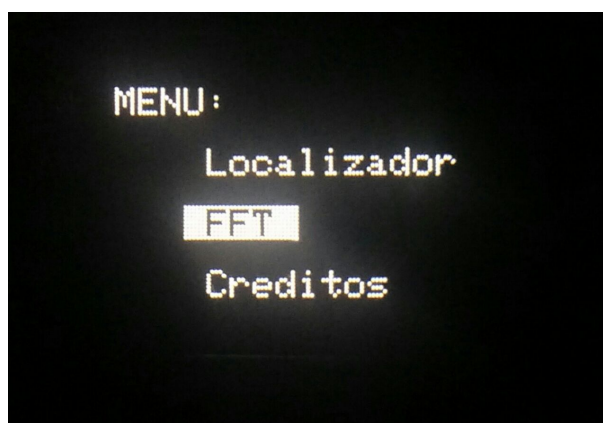


Figura 19 – Menu Inicial.

Fonte: Autorial Própria.

A tela do localizador é dividida em outras duas opções: o menu da bússola e a possibilidade de edição do limiar.

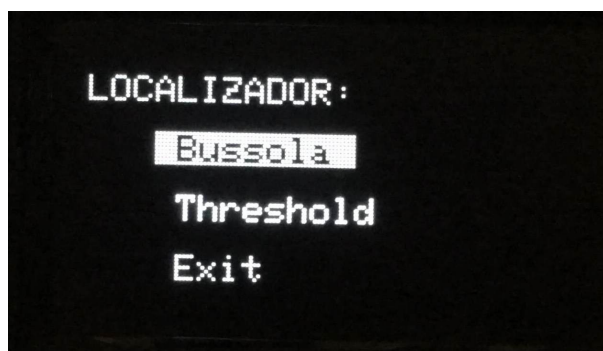
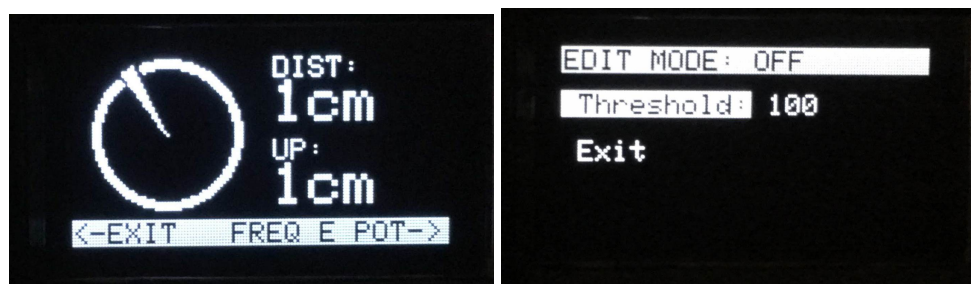


Figura 20 – Menu Localização.

Fonte: Autorial Própria.

No menu da bússola é desenhado um círculo pintado de branco. Usando o mesmo centro é desenhado um círculo preto de raio menor. Com os dados da posição do plano coplanar

ao dispositivo, o vetor de direção é normalizado para cada um dos eixos. Esses valores dos eixos são multiplicados pelo valor do raio e desenha-se um triângulo com um vértice no centro da bússola e os outros dois vértices na direção apontada (primeiro desenha-se um triângulo preto pra "limpar" a parte do círculo indesejada e depois um triângulo branco, um pouco mais fino, que determina a ponta na direção desejada).



(a) Menu Bússola.

(b) Menu Edição do Limiar.

Figura 21 – Telas do dispositivo.

Fonte: Autoria Própria.

Nessa tela também imprime-se a distância em relação ao plano do aparelho e a distância que corresponde ao eixo que cruza esse plano (altura). Se a altura estiver acima do plano escreve-se *up*, se estiver abaixo do plano escreve-se *down*. Também é escrita a distância em cm ou em m dependendo da leitura. Resulta-se nas telas exibidas na figura [21](#).

Para a tela de FFT, se estiver em modo de visualização, os valores do array de FFT são utilizados para desenhar retângulos correspondentes à potência de cada uma das frequências ou faixas de frequências. A coluna de filtros é desenhada baseada no array de filtros que possui valores de 0 a 1, e é representada por uma linha vertical ao lado do retângulo, com o valor de potência de entrada da frequência correspondente, e uma linha horizontal no topo que aponta a altura do filtro. Caso entre em modo de edição, as colunas de filtros e de potência do sinal são compactadas horizontalmente de modo a abrir espaço para um pequeno retângulo que indica qual é a coluna de frequência que será editada. Se receber alguma entrada no rotary 1, o display alterará a frequência ou faixa de frequências escolhidas para edição e mostrará essa modificação deslocando o retângulo de indicação de lugar. Se alguma entrada for detectada no rotary 2, o valor do filtro em modo de edição será alterado conforme desejado, indicado por uma mudança na altura da linha de indicação do filtro.

4.2.3.2.1 Divisão das faixas de frequência

Tendo em mente a quantidade de pixels do display e uma forma de ajuste dos filtros que fosse fácil e auto explicativa, a forma de visualização da FFT e edição dos filtros foi feita a partir da exibição de 16 faixas de frequência, logaritimizadas, conforme tabela [2](#).

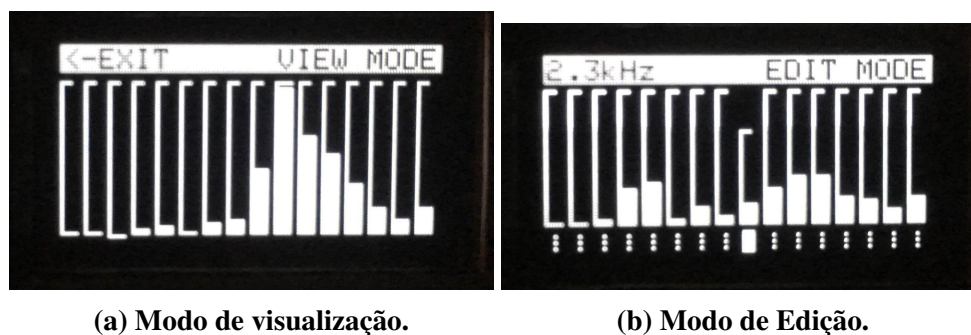


Figura 22 – Menu FFT.

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 2 – Faixas de Frequência da FFT apresentadas no display.

Frequências (Hz)		
min	max	largura da faixa
119	119	0
238	238	0
357	357	0
476	596	119
715	834	119
953	1072	119
1191	1429	238
1549	1787	238
1906	2978	1072
3097	4288	1191
4407	5956	1549
6075	8458	2382
8577	11555	2978
11674	15486	3812
15606	19893	4288
20012	30495	10483

Fonte: Autoria Própria.

5 SIMULAÇÃO E RESULTADOS

5.1 PLANEJAMENTO DE TESTES

Uma das partes mais importantes que verificam a funcionalidade do protótipo são os testes, e isso não poderia ser diferente neste projeto. Para tanto foi utilizado um plano de testes para melhorar o desempenho e melhor verificar possíveis avarias.

Os testes tinham como objetivo observar o índice de acertos e erros na localização do emissor, inferir a influência de ruídos no cálculo da posição, bem como a influência de sinais refletidos e difratados.

Para tanto, dividiram-se os testes em módulos de operação do algoritmo, ensaiando o protótipo em diferentes cenários e ambientes, de acordo com o que melhor exibisse o funcionamento de cada um desses módulos.

5.2 FUNCIONAMENTO DO PROTÓTIPO

A princípio todos os elementos do protótipo foram fixados, conectados às placas e à fonte. Nesse momento, seu funcionamento passou a ser acompanhado através da utilização de variados sinais de entrada (palmas, música, assobio). Ao ligar o protótipo já foi possível perceber alguns comportamentos indesejáveis. Primeiramente a FFT apresentava apenas metade das frequências amostradas, depois a multilateração apresentava um comportamento errático e, por fim, os rotary encoders não funcionavam. Portanto, estes e posteriormente alguns outros elementos necessitaram de ajustes.

5.2.1 Correção no Tempo de Amostragem

Ao ser feita a idealização e elaboração do projeto, o primeiro protótipo possuía apenas 4 microfones, ou seja, apenas 4 sinais de entrada. Com isso, o tempo de amostragem era de, aproximadamente, $13,3\mu s$. Ao mudarmos o tipo de resolução da multilateração, e acrescentarmos um quinto microfone ao projeto, o tempo de amostragem teve que ser alterado para $16,3397\mu s$, e com isso, a saída da FFT foi corrigida.

5.2.2 Correção na Multilateração

Com a implementação do algoritmo da multilateração e sua solução linearizada percebeu-se que, em diversos casos, o resultado do ângulo fornecido estava defasado em 180° , devido à proximidade dos microfones e ao arredondamento feito pela solução linear das equações. Para contornar esse problema, como forma de auxílio ao algoritmo, foi adicionado um simples algoritmo para detectar esse erro e corrigi-lo.

5.3 REALIZAÇÃO DOS TESTES

5.3.1 Aquisição

Para testar a aquisição de dados, colocou-se um emissor a aproximadamente 180° do protótipo, com posições x, y, z de (-74, -414, 64) mm respectivamente. O sinal emitido foi o de uma palma. Obteve-se então o seguinte gráfico, demonstrando a aquisição feita por cada microfone, em cada um dos cinco canais do ADC pelo DMA.

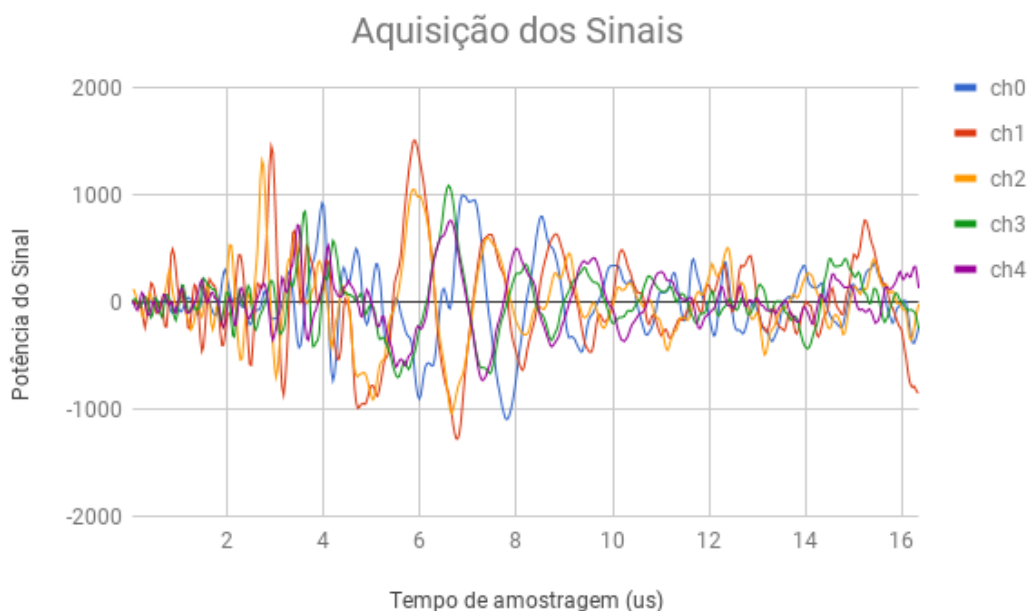


Figura 23 – Gráfico da aquisição de cada canal no tempo de amostragem.
Fonte: Autoria Própria.

Observa-se que a captura possui boa resolução e que o nível DC de tensão foi corretamente removido por código.

5.3.2 FFT

Para o teste da FFT, levantou-se a resposta em frequência do algoritmo. A frequência dominante é a que possui mais potência no cálculo da FFT.

O erro observado é de acordo com o esperado, já que a resolução em frequência para a taxa de amostragem e tamanho de buffer escolhidos é de aproximadamente 120 Hz.

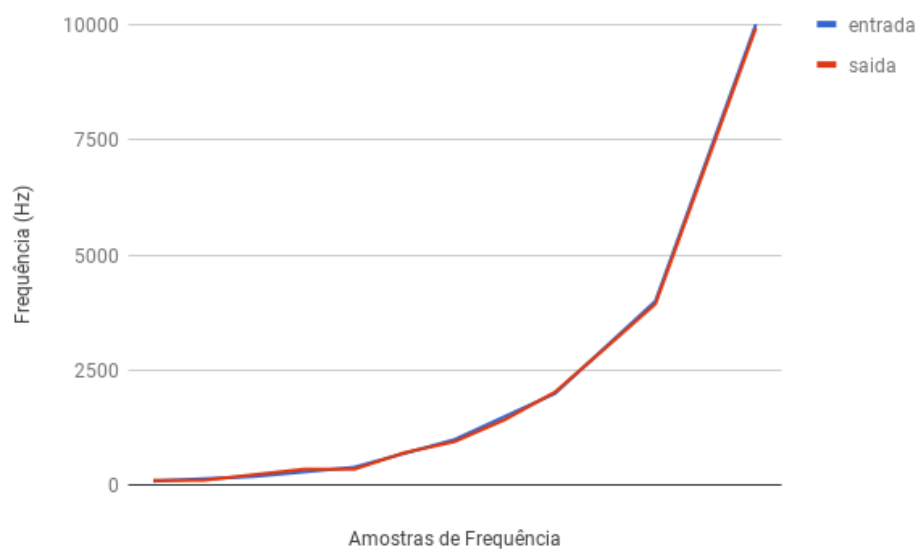


Figura 24 – Gráfico de comparação entre a entrada e a saída da FFT.

Fonte: Autoria Própria.

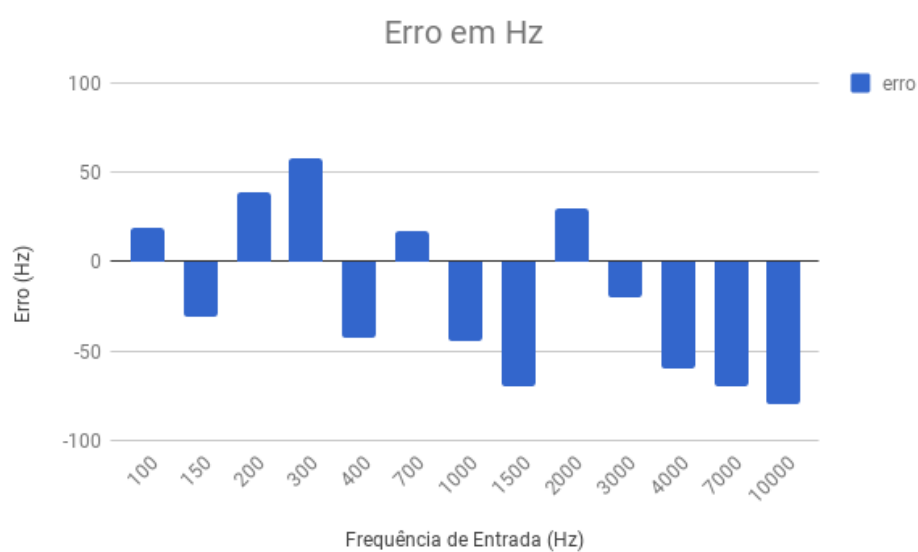


Figura 25 – Gráfico do erro (Hz) em função da frequência.

Fonte: Autoria Própria.

5.3.3 Filtros

5.3.3.1 Filtro Passa-Baixa

Para o teste e demonstração do funcionamento dos filtros, foi tocada uma música a partir de um alto-falante e configurado pela interface um filtro passa-baixa de 1,8 kHz. No gráfico abaixo podemos ver o sinal de um dos canais antes e depois do filtro e como as altas frequências foram removidas com sucesso. O mesmo é sempre aplicado aos outros quatro canais.

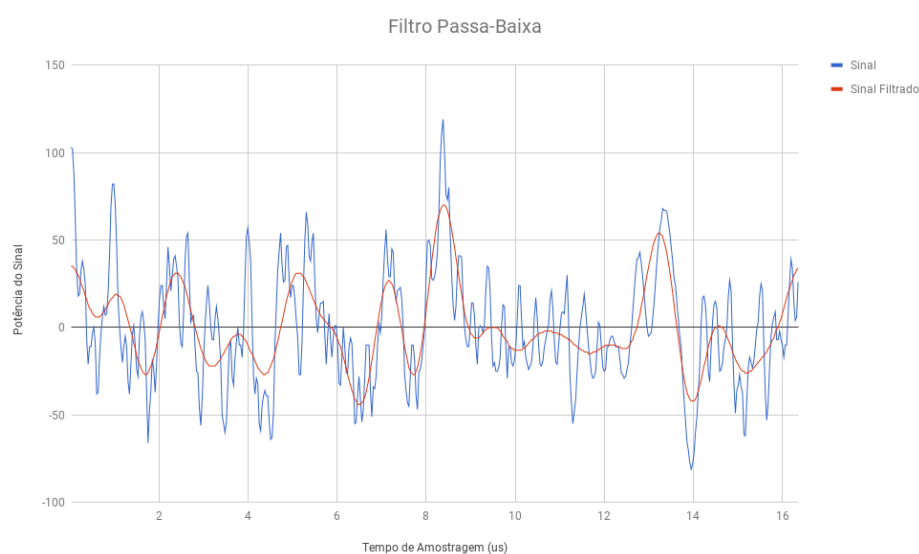


Figura 26 – Gráfico de comparação entre o sinal recebido e o sinal filtrado por um filtro passa-baixa no tempo de amostragem.

Fonte: Aatoria Própria.

5.3.3.2 Filtro Rejeita-Faixa

Em seguida foi tocado uma música e uma senóide de 10 kHz, representando um sinal indesejado, simultaneamente. Pela interface foi configurado um filtro que cortasse o sinal de 10 kHz e abaixo pode-se ver que o sinal de 10 kHz foi filtrado, demonstrando a possibilidade de se ajustar o protótipo a analisar apenas as frequências que interessam para cada aplicação.

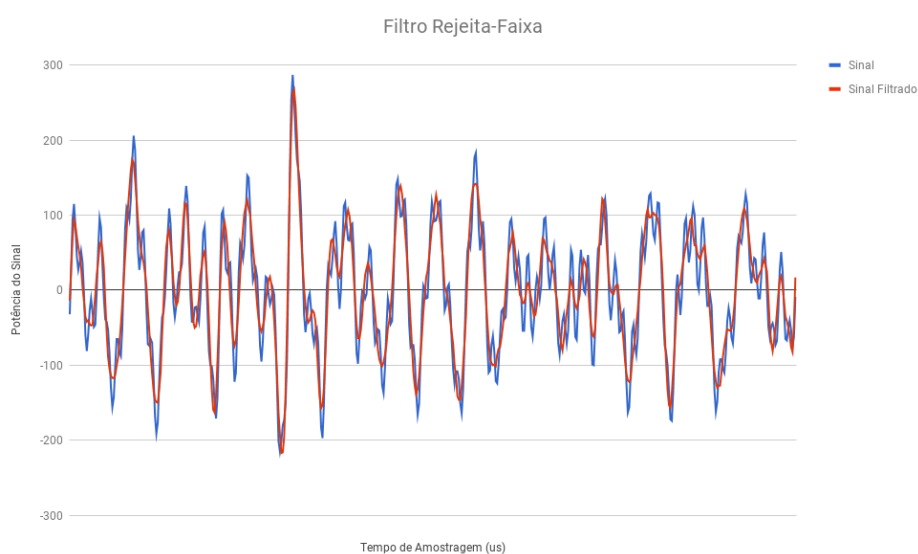


Figura 27 – Gráfico de comparação entre o sinal recebido e o sinal filtrado por um filtro rejeita-faixa no tempo de amostragem.

Fonte: Autoria Própria.

5.3.4 Correlação Cruzada

Na correlação cruzada, utiliza-se o sinal do microfone 0 como referência e calcula-se a correlação cruzada dos quatro outros canais em relação a ele. Para os sinais adquiridos da figura [23](#), a correlação cruzada é a do gráfico representado na figura [28](#). O valor do eixo x dos pontos de máximo equivalem ao tempo de deslocamento em amostras do sinal do microfone 0 até o microfone j , onde $1 \leq j \leq 4$. Para a entrada dada, os TDOA em amostras encontrados foram os da Tabela [3](#).

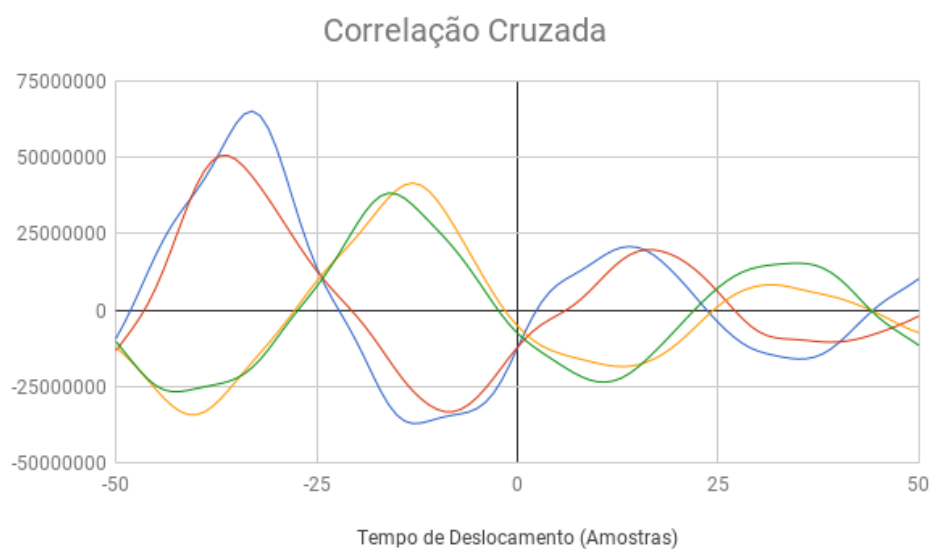


Figura 28 – Gráfico da correlação cruzada utilizando o microfone 0 como referência.
 Fonte: Autoria Própria.

Tabela 3 – TDOA amostrado tendo o microfone 0 como referência

Correlação Cruzada	TDOA(amstras)
crosscorrel[0-0]	0
crosscorrel[0-1]	-33
crosscorrel[0-2]	-36
crosscorrel[0-3]	-13
crosscorrel[0-4]	-16

Fonte: Autoria Própria.

Pode-se conferir o funcionamento desse algoritmo ao retirar esses tempos do sinal original e plotá-lo como se ele tivesse chego simultaneamente em todos microfones conforme o gráfico a seguir.

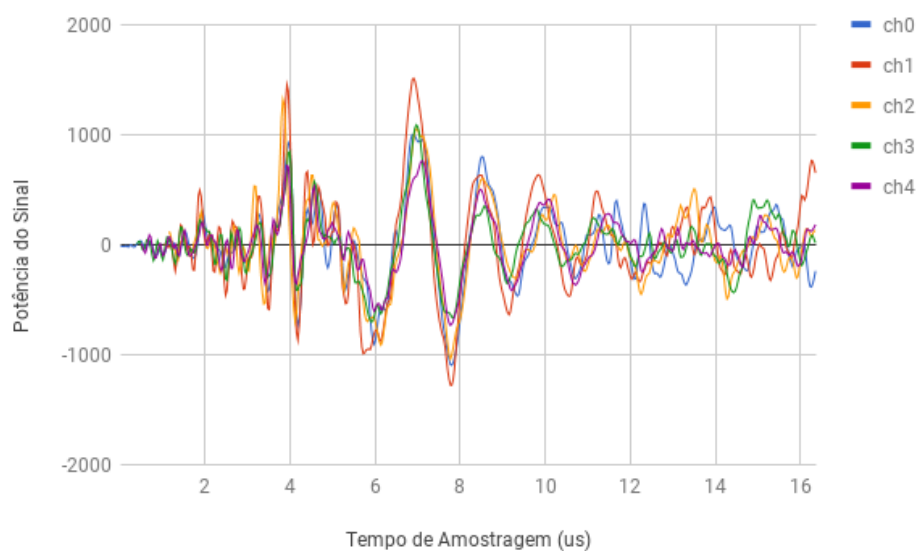


Figura 29 – Gráfico da correlação cruzada com chegada simultânea dos microfones.

Fonte: Autoria Própria.

Como a distância máxima entre os microfones é conhecida e a velocidade do som é aproximadamente fixa, a TDOA será sempre entre -50 e 50 samples para o caso em estudo, e é possível reduzir a quantidade de processamento necessária ao se fazer a correlação cruzada apenas entre esses valores de deslocamento ao invés de realizar-se o cálculo completo da correlação cruzada.

Observa-se, também, que a diferença entre o valor do maior e do segundo maior pico da correlação cruzada representa a confiança no resultado dos tempos, e que sinais com características periódicas, assim como reflexões ou ecos, podem levar o algoritmo a errar na estimativa de TDOA.

5.3.5 Multilateração

5.3.5.1 Simulação

Foi simulado através do software Matlab o algoritmo da multilateração com a inserção de ruídos do sinal de entrada, de forma a mostrar a influência de possíveis reflexões, difrações ou ruídos do ambiente no algoritmo. Para a simulação, representou-se uma área de $1m^2$. Obteve-se o seguinte resultado:

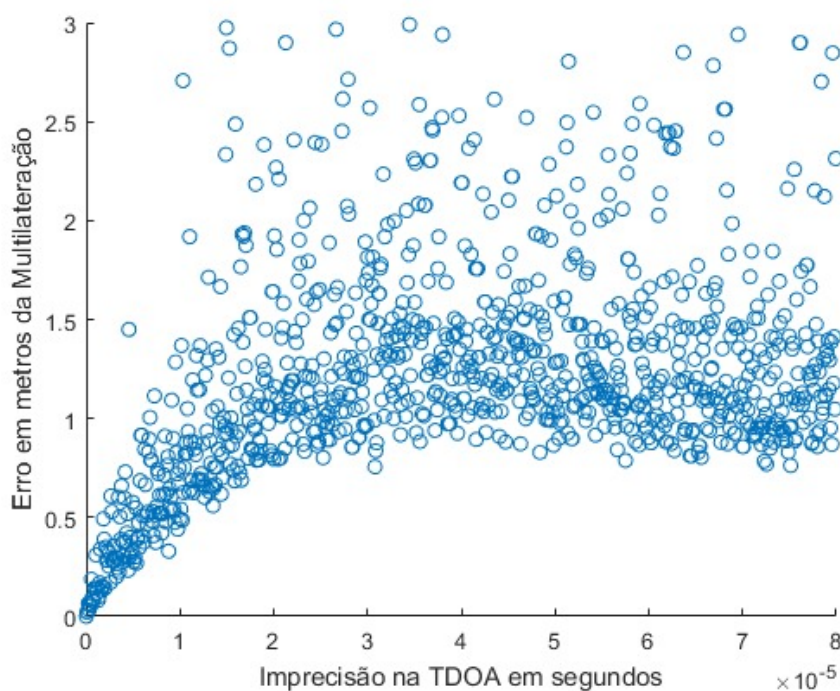


Figura 30 – Gráfico da simulação da imprecisão na TDOA em função do erro na distância estimado pelo algoritmo.

Fonte: Autoria Própria.

A partir dos dados apresentados pode-se perceber que a taxa de acerto do algoritmo diminui drasticamente em função da intensidade do ruído (que gera a imprecisão na TDOA, conforme demonstrado na figura [30](#)).

5.3.5.2 Teste

O teste da direção foi feito no centro de um auditório com capacidade para 300 pessoas, de forma que as amplitudes de reflexões fossem muito menores do que o sinal observado por causa da distância das paredes, buscando minimizar as imprecisões da entrada do sinal, para assim minimizar o comportamento observado na simulação. O local também isolava bem sons externos, que pudessem interferir no teste.

O localizador acústico foi posicionado a 1.5m de altura. Tomando uma distância de 4m, com um posicionamento de 0° do dispositivo e tendo a mesma altura de referência, foram batidas 50 palmas. A partir disso, contou-se em quantas das vezes que o dispositivo apontou para uma direção diferente de 0 graus.

O teste foi repetido para $+90^\circ$, -90° e 180° , conforme representado na figura [31](#) somando um total de 200 palmas, resultando em 6 erros, ou seja, 97% de acerto na direção para esse teste.

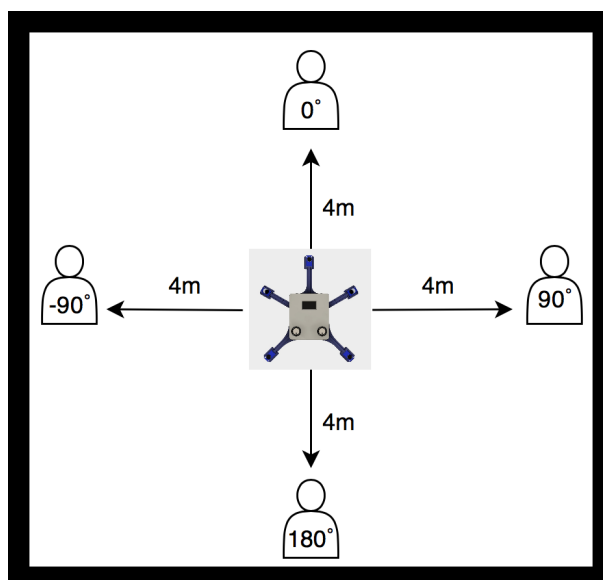


Figura 31 – Representação do teste da multilateração.

Fonte: Autoria Própria.

Um segundo teste foi realizado para que fosse mensurada a precisão do cálculo da distância. Foi colocado o localizador em uma posição fixa, da mesma maneira que no primeiro teste, e uma fonte sonora com uma música sendo tocada também em uma posição fixa de distância conhecida, começando com distâncias pequenas e aumentando para distâncias maiores, de forma a tentar aferir até qual distância ele fornecia um resultado estável.

Com isso, percebeu-se que o cálculo da distância tem precisão de aproximadamente 5 cm para distâncias menores que 50 cm, e para distâncias maiores que 50 cm o cálculo se torna impreciso a ponto de não se conseguir medir o erro. Essa inconfiabilidade no cálculo se dá devido à instabilidade do algoritmo da multilateração, e por termos os microfones separados por uma distância pequena.

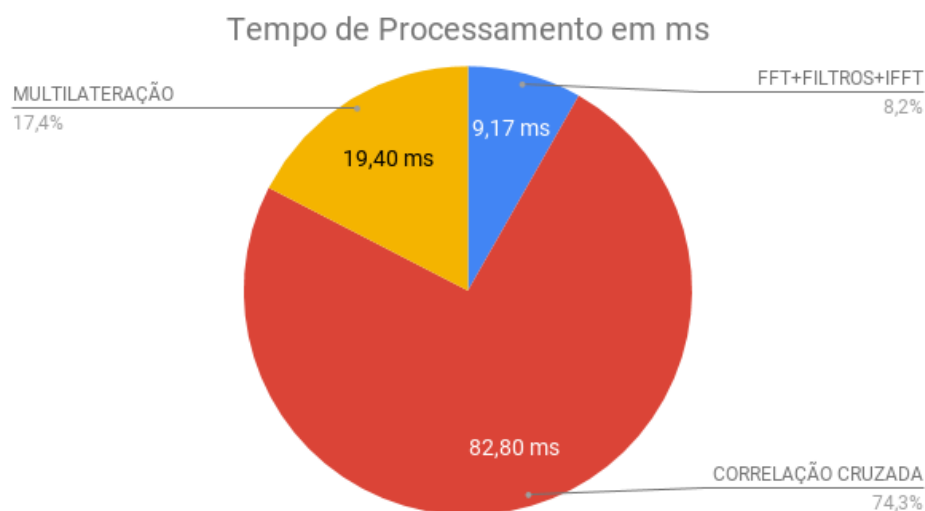
5.3.6 Performance

Um dos objetivos deste projeto era o de testar um algoritmo de multilateração que pudesse ser operado com processamento reduzido. Dito isto, foi medido o tempo de processamento total e o tempo de processamento de cada módulo de operação do protótipo através de timer de software, obtendo-se os resultados apresentados na tabela [4](#).

Tabela 4 – Performance do processamento

Módulo	Tempo (ms)
FFT+FILTROS+IFFT	9,17
CORRELAÇÃO CRUZADA	82,80
MULTILATERAÇÃO	19,40
Total	111,37

Fonte: Autoria Própria.

**Figura 32 – Gráfico do tempo de processamento do protótipo em ms.**

Fonte: Autoria Própria.

5.4 LIMITAÇÕES

Considerando todos os testes acima mencionados, percebemos algumas limitações as quais o dispositivo está sujeito.

Ao sopesar o funcionamento do dispositivo no que tange resposta em frequência, observou-se um melhor desempenho no cálculo da TDOA ao receber um sinal de entrada constituído por uma composição de frequências (palma, música), em comparação com um sinal de menos frequências (assovio, estalo). Este comportamento se deve a uma diminuição da periodicidade do sinal, de forma que diminua a possibilidade de se obter a TDOA com base no deslocamento de um período a frente ou anterior do sinal, que aumenta a diferença entre os picos de máximo nas curvas de correlação cruzada.

Percebe-se também que, conforme mencionado na seção [5.3.5.2](#), para distâncias próximas (até 50 cm) temos uma confiabilidade de ± 5 cm. Porém, para distâncias maiores, a incerteza se torna grande a ponto dos resultados não serem confiáveis e não ser possível estabelecer um intervalo de confiança. Isto acontece essencialmente por causa da distância entre os microfones. Para distâncias próximas àquelas entre os microfones, a precisão é maior, e para distâncias

muito maiores, a precisão se torna menor. O teste descrito anteriormente foi feito com a posição do eixo z fixa, mas em testes esparsos, foi possível observar que o erro do cálculo da posição no eixo z é maior, e isso também devido ao posicionamento dos microfones 3 e 4, que tem um espaçamento menor em relação aos outros microfones nesse eixo.

Um dos motivos pelo qual não foi aumentada a distância entre os microfones foi pela limitação da memória RAM do processador. Se as distâncias fossem maiores, o tempo de buffer precisaria ser proporcionalmente maior e, se não for alterada a taxa de amostragem, seria necessário um buffer com capacidade para mais amostras. Para aumentar de 512 para 1024 amostras, não haveria espaço suficiente na RAM no processador utilizado.

A partir dos resultados descritos na seção [5.3.5.1](#), pode-se constatar uma instabilidade no próprio algoritmo da multilateração, pois a solução da multilateração pelo método linear é boa para entradas exatas, mas não se comporta bem com imprecisões na entrada. Essa solução exclui informações que, na teoria, são redundantes mas na prática podem ajudar a melhorar a precisão. Outros métodos de solução da multilateração levam em conta essas informações, o que podem torná-los mais precisos, bem como mais complexos. Uma forma de contornar esse problema seria utilizar o método matemático da regularização, que consiste em um processo de adição de informação com o intuito de resolver um problema que não possui uma solução única, ou o comportamento da solução muda de acordo com as condições iniciais. ([NATARAJAN, 1995](#))

6 TEMPO E RECURSOS DESPENDIDOS NO PROJETO

6.1 CRONOGRAMA

O cronograma efetivo do projeto é mostrado no quadro a seguir.

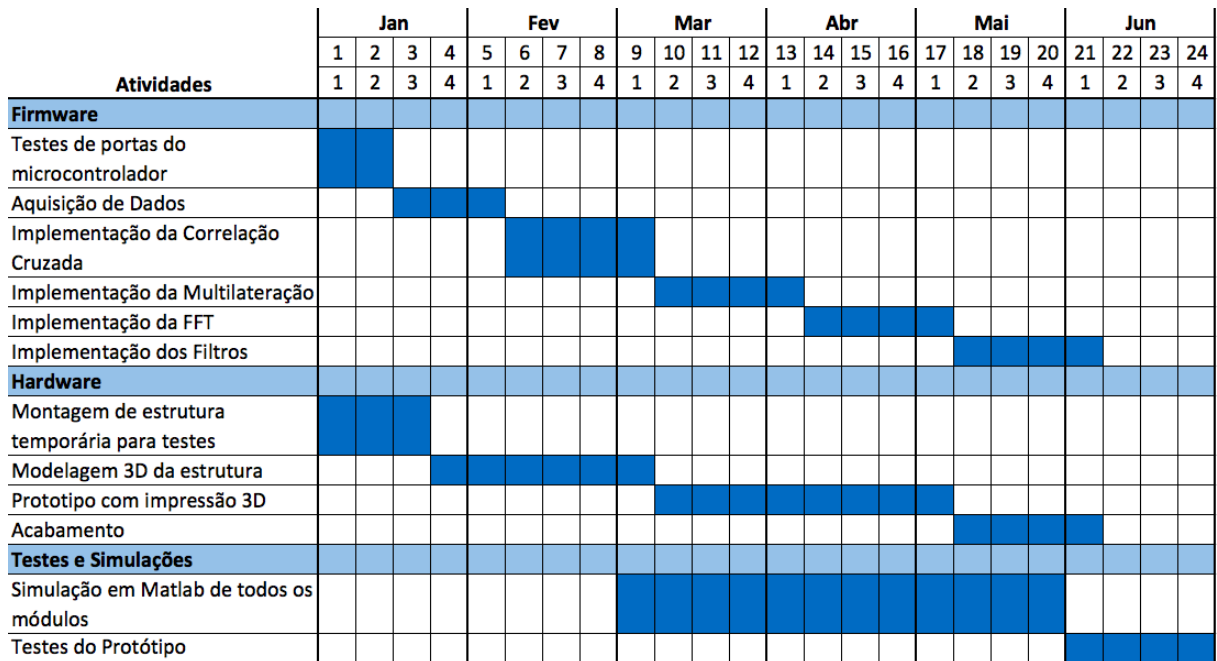


Figura 33 – Cronograma do desenvolvimento do projeto.

Fonte: Autoria Própria.

6.2 TEMPO DEMANDADO

A Tabela 5 a seguir apresenta o intervalo de tempo demandado, em horas, para cada atividade e o tempo total estimado para realização do projeto.

Tabela 5 – Estimativa de tempo para o desenvolvimento do protótipo.

Atividade	Tempo Estimado (h)
Pesquisa de soluções e possíveis algoritmos	40
Desenvolvimento do hardware do dispositivo	60
Desenvolvimento do firmware do dispositivo	250
Simulação em Matlab para comparação de resultados	50
Testes para calibração	30
Testes de produto	10
Elaboração de documentação	150
Total	590

Fonte: Autoria Própria.

6.3 CUSTOS

A Tabela 6 a seguir mostra os gastos estimados do projeto para desenvolvimento completo do projeto.

Tabela 6 – Estimativa de custos para o desenvolvimento do protótipo.

Descrição	Gasto Estimado (R\$)
1 Placa MBEB NUCLEO-L476RG	60,00
4 Rotary Encoder KY040	50,40
2 Display OLED SSD1306	39,50
1 Sensor DHT11	8,60
8 microfones MAX4466	49,00
300g de PLA	29,00
Total	236,50

Fonte: Aatoria Própria.

7 CONCLUSÃO

Mediante o desenvolvimento do projeto, foi possível construir o protótipo, e testar uma solução matemática da multilateração através de um algoritmo implementado em um dispositivo portátil, com processamento limitado, e com baixo número de microfones. Tendo todos estes itens prontos, foi possível fazer uma avaliação dos erros e acertos obtidos pelo algoritmo, bem como a funcionalidade do protótipo.

Alguns itens planejados, como a detecção de umidade, não foram executados devido a interpretação de uma influência pouco relevante para o cálculo da velocidade do som. Já outros, foram adicionados para um melhor funcionamento do projeto, como a adição de um microfone, pois no projeto original constavam apenas 4 microfones, mas foi percebido um aumento do grau de complexidade da solução, bem como uma maior necessidade de capacidade de processamento.

Com a realização dos testes foi possível verificar a atuação da correlação cruzada, observar ao funcionamento da solução da multilateração em um ambiente com condições favoráveis (ambiente amplo, com poucas reflexões e ruídos), e mensurar a performance do processamento. Através desses experimentos concluiu-se que, para o ambiente descrito acima, o protótipo apresenta resultados confiáveis na identificação do ângulo de localização do emissor, mas se mostra pouco confiável na mensuração da distância em que esse emissor se encontra.

Já o desempenho geral do protótipo foi considerado satisfatório com as pequenas alterações feitas ao longo do projeto, pois seus níveis de acertos da localização estavam acima de 90%. A interface planejada é de fácil uso e permite uma boa interação com o usuário. O tamanho do display poderia ser maior, o que facilitaria a visualização, porém, também elevaria o custo do protótipo. A possibilidade de edição de filtros torna o protótipo adaptável para aplicações específicas, apesar de o mesmo ter sido programado de forma genérica. Portanto, o protótipo foi considerado funcional.

O custo do projeto foi de R\$236,50, conforme mostrado na tabela 6, o que torna o protótipo além de funcional, acessível para diversas pessoas e situações.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Considerando a possibilidade de o equipamento ser produzido comercialmente, ou de ser aprimorado para uma aplicação específica, sugere-se:

- Aprimorar o algoritmo utilizado, principalmente na etapa de identificação da distância, utilizando uma aproximação mais metódica, ao invés da simples linearização do problema, minimizando inconsistências na identificação da localização de longa distância.

- Adaptar o hardware de acordo com a aplicação desejada, de forma a ajudar o usuário a obter uma melhor experiência. Uma possibilidade de aplicação com hardware adaptado seria a de indicar a direção do som para deficientes auditivos, onde poderiam-se usar microfones acoplados a pessoa juntamente com motores de vibração distribuídos em seu torso, de forma a indicar através da vibração qual a direção de um possível sinal sonoro.
- Fazer a calibração dos microfones para poder mostrar a potência do sinal em Watts ou em decibel.
- Reconhecimento de assinatura
- Adição de circuito para utilizar bateria
- Display maior e colorido
- Diversas otimizações possíveis no código para permitir o cálculo da localização em tempo real
- Colocação de EVA por volta da caixa para diminuir o problema das reflexões.

REFERÊNCIAS

- ANDERSEN, A. C. **Comparative Analysis of Multilateration Methods for Signal Emitter Positioning**. [S.l.], 2011.
- BUCHER, R.; MISRA, D. A synthesizable vhdl model of the exact solution for three-dimensional hyperbolic positioning system. **VLSI Design**, v. 15, n. 2, p. 507–520, 2002. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/vlsi/2002/935925/cta/>.
- DALSKOV, D.; OLESEN, S. K. **Locating Acoustic Sources with Multilateration - Applied to Stationary and Moving Sources**. Dissertação (Mestrado) — Aalborg University, 2014. Disponível em: <https://projekter.aau.dk/projekter/files/198526294/main.pdf>.
- FREITAS, M. A. B. **MEDINDO A VELOCIDADE DO SOM COM O MICROFONE DO PC**. [S.l.], 2005. Disponível em: <http://www.if.ufrj.br/~carlos/trablicen/marco/monografiaMarco.pdf>.
- GUSTAFSSON, F.; GUNNARSSON, F. Positioning using time-difference of arrival measurements. In: **Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003. Proceedings. (ICASSP '03). 2003 IEEE International Conference on**. [s.n.], 2003. v. 6, p. VI–553–6 vol.6. ISSN 1520-6149. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1201741/>.
- MATTERHACKERS. 2018. Disponível em: <https://www.matterhackers.com/store/l/black-pro-series-pla-filament-175mm-1kg/sk/MY6C8H7E>.
- MAXIM INTEGRATED PRODUCTS. **Low-Cost, Micropower, SC70/SOT23-8, Microphone Preamplifiers with Complete Shutdown**. [S.l.], 2001. Disponível em: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/MAX4465-MAX4469.pdf>.
- MBED. **NUCLEO-L476RG**. 2018. Disponível em: <https://os.mbed.com/platforms/ST-Nucleo-L476RG/>.
- MOUSER. 2018. Disponível em: <https://www.mouser.com/ds/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>.
- NATARAJAN, B. K. Sparse approximate solutions to linear systems. **SIAM J. Comput**, 1995. ISSN 0097-5397.
- SYSTECH, S. **Advance Information: 128 x 64 Dot Matrix OLED/PLED Segment/Common Driver with Controller**. [S.l.], 2008. Disponível em: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SSD1306.pdf>.
- TEKDAS, O.; ISLER, V. Sensor placement for triangulation-based localization. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, v. 7, n. 3, p. 681–685, July 2010. ISSN 1545-5955.
- V., O. A.; W., S. R. **Discrete-Time Signal Processing**. Prentice-Hall, 1999. Disponível em: http://d1.amobbs.com/bbs_upload782111/files_24/ourdev_523225.pdf.