

Desenvolvimento de Estratégia de Geolocalização Bidimensional com Base em Ondas Sonoras

Henrique Guimarães Coutinho
Universidade Federal do ABC (UFABC)
Santo André – SP, Brasil
henrique.coutinho@aluno.ufabc.edu.br

Abstract—The present paper has aimed to recognize the position of an object soundwave emitter by the creation of an automatized system capable of appointing the point where the main object is putted. The research project is inserted in the context of the rocket modeling group of Federal University of ABC (UFABC), Rocket Design, that demands a new form to analyze the trajectory of it's rockets during their launchings and be able to, from it, extract important informations, such as the velocity and acceleration of the launch. In addition, the project grounds methods to utilize open-source electronics platform applied to engineering problems. In specific terms, the project has focus to develop an automatized system capable of measuring the position of an object in a 2D plane through the admeasurement of the interval of time of latency to the sound wave to fly a determined space. The object of study used a sound emitter and utilizes the technique Time Difference of Arrival (TDoA) to determinate the position of the object through many sound sensors around the main object. To aim the goal, it was created a sensor with Arduino capable of recognize sound waves as input tension for further analyze, as well as a sensor that can read the environment temperature. The definitive collect of the data could be done, and the position of the emitter of sound waves two-dimensionally verified by the creation of a code of sweep, able to appoint the position of the sound wave emitter based on the ambient temperature and the time difference of arrival between pairs of sensors. The creation of another code, responsible for the template of the position of the components, enable to compare the data that was obtain with the reality. Consequently, the results captured by the sensor respond that the positions that were found has been from 42 centimeters up to 2 meters far from the real localization of the emitter, in a field 10.93 x 2.90 meters wide. Analyzing the data that was collected, the literature was search for investigate the limiting factors for the develop of a system with better accuracy and precision. Yet, the system could be expand to a dynamics state: by analyzing consecutives positions of the trajectory of an object, informations of the cinematics of the object could be inferred. In future studies, by the upgrade of the sensor used, would be possible, in a similar way, to return points of the trajectory of the rockets from UFABC Rocket Design in it's launchings, and, therefore, execute structural upgrades to optimize this values.

Resumo — O presente trabalho visou aferir a posição de um objeto emissor de ondas sonoras a partir da criação de um sistema automatizado capaz de apontar o ponto onde está posto do objeto principal. O projeto de pesquisa se insere no contexto da demanda do grupo de foguetemodélismo da Universidade Federal do ABC, Rocket Design, de possuir uma nova forma de análise da trajetória de seus foguetes durante seus lançamentos, e poder, a partir dela, extrair informações importantes como a velocidade e aceleração de lançamento. Além disso, o projeto fundamenta métodos de utilizar placas de desenvolvimento para a aplicação em problemas de engenharia. Em termos específicos, o projeto visou o desenvolvimento de um sistema automatizado capaz de medir a posição de um objeto em um plano 2D através da aferição do intervalo de tempo de demora para a onda sonora percorrer um determinado espaço. O objeto de estudo possuiu um emissor de som e utilizou a técnica de triangulação por latência de tempo de diferença de chegada (TDoA – *Time Difference of Arrival*) para a determinação da posição do objeto através de diversos sensores sonoros ao redor do objeto principal. Para a conquista do objetivo, criou-se um sensor com Arduino capaz de captar ondas sonoras em forma de tensão de entrada para posterior análise, assim como um sensor capaz de captar a temperatura ambiente do meio de testes. A coleta definitiva de som pôde ser realizada e a posição de emissor de ondas sonoras bidimensionalmente aferida através da criação de um código de varredura, capaz de apontar a posição do emissor de ondas sonoras com base na temperatura ambiente e diferença de tempos de chegada entre pares de sensores. A partir da criação de um código de gabarito das posições dos componentes, consolidou-se os meios de executar a comparação entre os dados colhidos com a realidade. Portanto, os resultados captados pelo sensor foram que a posição encontrada para o emissor de ondas esteve entre 42 centímetros e 2 metros afastada da posição real dele, em um plano de testes de 10,93 x 2,90 metros. A partir dos resultados colhidos, ainda retomou-se a literatura para a investigação dos fatores limitantes para o desenvolvimento de um sistema de melhor acurácia e precisão. O sistema ainda poderia ser expandido para um panorama dinâmico: ao se analisar posições consecutivas da trajetória de um objeto se poderá extrair informações da cinemática do objeto. Em estudos futuros, mediante aprimoramento do sensor utilizado, seria possível retornar pontos da trajetória de foguetes da equipe Rocket Design em seus lançamentos e, dessa forma, poderá, então, executar melhorias estruturais para otimização de tais valores.

Palavras-chave— foguete; ondas sonoras; posição; trajetória; sensor.

I. INTRODUÇÃO

É inegável que o desenvolvimento aeroespacial possui relação direta com o desenvolvimento de um país. A exploração espacial modificou o panorama moderno a partir das inúmeras descobertas científicas que foram consequências diretas dessa atividade. Porém, a extensão do mercado espacial gerou também um mercado lucrativo, que se mantém de forma perene. Pode-se citar como exemplo o ramo de telecomunicações, estritamente dependente do funcionamento de satélites. Esses diversos benefícios resultantes da atividade aeroespacial justificam a necessidade de constantes investimentos nacionais para o desenvolvimento desse setor [1].

A vertente mais importante que viabiliza a elaboração de novas tecnologias para a área espacial é a pesquisa relacionada à produção e à otimização de foguetes. Um foguete é denominado como uma aeronave que obtém como propulsão o jato provocado pela expansão de gases gerados por um motor que queima propelentes [2]. Nesse cenário, enquadra-se a equipe de foguetemodélismo Rocket Design da Universidade Federal do ABC (UFABC). A entidade não apenas constrói e desenvolve foguetes, como também participa de diversos eventos e competições de foguetemodélismo, inclusive em cenário internacional. No ano de 2019, a equipe participou da Spaceport America Cup, competição no Novo México (EUA) e da Latin American Space Challenge (LASC), no Brasil, conquistando nessa última o segundo lugar na categoria “Apogeu 3 quilômetros”.

Os foguetes desenvolvidos pela Rocket Design já se valem de um acelerômetro para o acompanhamento de seu comportamento em voo. Além disso, iniciações científicas passadas do núcleo de pesquisa da entidade buscaram estudar a velocidade das aeronaves através da análise de gravações em vídeo dos momentos de lançamento e voo. Nesse contexto, vale-se o projeto em questão: há a necessidade de uma nova maneira de se obter dados acerca do comportamento do foguete no ar e da aferição de sua velocidade. Visou-se, portanto, a criação de um sistema automatizado que, a partir de ondas sonoras, conseguisse aferir com precisão a posição de um objeto. Com os resultados obtidos de consecutivas posições no espaço em um sistema dinâmico, em que o objeto estivesse se movimentando, seria possível retornar grandezas como velocidade e aceleração em diversos pontos de sua trajetória. O trabalho em questão foi executado na condição de iniciação científica da UFABC, e desenvolveu um sensor capaz de apontar a posição de um objeto emissor de ondas sonoras em um plano bidimensional, e abordou somente a vertente estática dos testes, buscando pontos emissores fixos na superfície de testes. Em estudos futuros, a otimização desse sensor possibilitaria, analogamente, retornar valores da posição do foguete e de seu deslocamento em diversos pontos de seu lançamento. Esses dados seriam valiosos para conduzir modificações estruturais futuras nos foguetes para otimização desses valores pela entidade.

Em outro aspecto mais amplo, o trabalho em questão pode ser utilizado para fundamentar outros projetos de geolocalização bidimensional, inclusive utilizando outros

tipos de ondas, uma vez que diferencia os métodos de aferição de posição na fundamentação teórica e executa o desenvolvimento de um sistema baseado em Arduino para aferir a posição de um emissor de ondas sonoras em plano bidimensional. Em outra instância, o presente trabalho demonstra a capacidade de aplicação da placa de prototipagem livre em problemas de engenharia ao discorrer a metodologia para a resolução da problemática específica.

II. OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho de pesquisa em questão consiste no desenvolvimento de uma nova forma de análise das posições de um objeto que poderá ser implementada para a análoga análise do comportamento dos foguetes da UFABC Rocket Design em voo.

Em termos específicos, o objetivo do trabalho foi a criação de um sensor automatizado utilizando um microcontrolador Arduino que fosse capaz de aferir a posição de um objeto emissor de ondas sonoras em um plano 2D utilizando diversos receptores ao seu redor. Ao analisar pontos consecutivos de posição, seria possível extrair informações adicionais como deslocamento, velocidade e aceleração do objeto em diversos pontos do caminho percorrido.

III. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Essa seção apresenta uma base bibliográfica dos principais conceitos que norteiam o desenvolvimento do presente trabalho de pesquisa.

A. Ondas Sonoras

Ondas sonoras são o exemplo mais importante de ondas longitudinais. A onda longitudinal propaga-se na mesma direção de sua velocidade, porém, seu gráfico de perturbação da pressão no meio pelo tempo pode ser estudado como se faria com uma onda qualquer transversal. Além disso, a velocidade de uma onda sonora se altera conforme a temperatura ambiente do meio estudado muda. Para configurar essa relação, vale-se da equação 1, onde v é a velocidade do som em m/s e T_c a temperatura ambiente em °C. [3]:

$$v = 331 \cdot \sqrt{1 + \frac{T_c}{273}} \quad (1)$$

Ademais, sabemos que, por definição, as ondas se propagam com velocidade igual a variação de x pela variação do tempo desse intervalo. Essa definição está expressa na equação 2. Para uma velocidade instantânea, temos a derivada da posição pelo tempo, definida matematicamente pela equação 3. Para o caso específico de uma fonte emitindo uma onda sonora para um receptor recebê-la, a velocidade é dada pela distância entre fonte e receptor (d) pelo intervalo de tempo, como visualizado na equação 4. [4]:

$$v_{x,méd} \equiv \frac{\Delta x}{\Delta y} \quad (2)$$

$$v_x \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

$$v \equiv \frac{d}{dt} \quad (4)$$

Nessas equações, temos $v_{x,méd}$ como a velocidade em x média, v_x como a velocidade instantânea em um ponto, v como a velocidade do som, Δx como a variação da posição, d como a distância entre a fonte e o receptor, e Δt diz respeito a variação do tempo.

B. Placa de Desenvolvimento Arduino

Um Arduino é uma placa de prototipagem de código livre. As placas Arduino são capazes de receber canais de entrada e, através de um código que é implementado na plataforma de desenvolvimento da placa – The Arduino Software (IDE) – o controlador as transforma em informações de saída. A linguagem de programação utilizada é C/C++. Ademais, diversas modificações e personalizações podem ser executadas na placa de desenvolvimento, de forma que sensores adicionais sejam implementados para atribuições específicas [5]. No projeto em questão, o Arduino será responsável por receber os valores dos microfones e executar o processamento desses valores visando o retorno da distância dos microfones à fonte emissora de ondas sonoras. O modelo de Arduino UNO REV 3 possui integrado o microcontrolador ATmega328P, e a fotografia de sua estrutura está expressa na figura 1. A placa possui velocidade de processamento de seu processador de até 16MHz.

Fig. 1. Placa de Desenvolvimento Arduino



Fonte: Loja Oficial Arduino (2021). [6]

C. Técnicas de Aferição de Posição

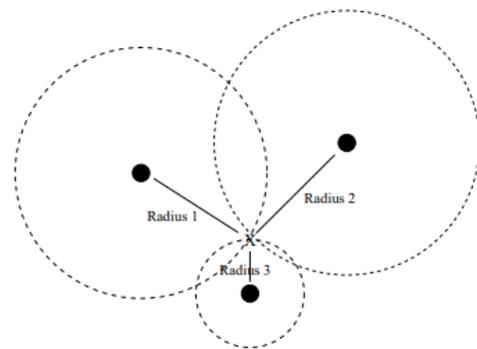
Na literatura, técnicas de aferição de posição são divididas em três subcategorias: triangulação, análise de cena e proximidade [7]. A técnica de triangulação utiliza a geometria para a aferição da posição exata de um objeto. Em um plano de três dimensões, é necessário o mínimo de quatro pontos para se inferir a posição do objeto desejado.

Além disso, a técnica subdivide-se em mais algumas divisões: detecção de posicionamento por latência, que utiliza medidas de distância, e por angulação, que se vale de cálculo de ângulos para encontrar a posição. Por último, a triangulação por latência possui três formas de ocorrer, por medição direta, por análise do tempo de voo ou por atenuação da intensidade do sinal.

A técnica de triangulação por latência por análise do tempo de voo ainda pode ser aplicada a partir de dois métodos

distintos. O primeiro deles é o método ToA (*Time of Arrival*) – Tempo de Chegada, em tradução direta -, que é utilizado quando é possível conhecer o tempo exato em que o sinal sai do emissor, o tempo exato no qual o sinal chega aos transmissores e a velocidade do sinal. A partir da relação estabelecida na equação (4) é possível apresentar graficamente uma circunferência que compreende, em toda a extensão de seu arco, posições possíveis para o emissor de sinal. Assim, sabendo-se o raio de no mínimo três circunferências que possuem um ponto de seu arco tocando o objeto em um plano de duas dimensões, pode-se saber o ponto exato da origem do sinal. A visualização espacial dessa técnica está expressa na Figura 2. [8].

Fig. 2. Técnica de triangulação para aferição de posição.



Fonte: HIGHTOWER, J.; BORRIELLO, G. (2001); [7]

O Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* - GPS) vale-se de uma técnica semelhante para retornar com precisão o paradeiro de algum objeto, mas considerando as três dimensões. Os satélites utilizam o envio de uma onda eletromagnética que contém informações da posição orbital do mesmo e do instante temporal, através de seu relógio atômico interno. Uma estação receptora em solo utiliza dados de no mínimo quatro satélites diferentes para retornar a posição de um objeto desejado [9].

Já o segundo método é o TDoA (*Time Difference of Arrival*) – Diferença do Tempo de Chegada, em tradução livre -, que compreende uma metodologia mais versátil. Nela, não é necessário conhecer o tempo exato em que foi feita a emissão do sinal, e, apenas pela diferença dos tempos de chegada registrados pelos receptores, é possível apontar a posição do objeto emissor. Com a equação (5) extrai-se, a partir da diferença de tempo entre a chegada de sinal em dois receptores (Δt) a diferença entre a distância entre o alvo (emissor) e um ponto de referência, e a distância entre o alvo (emissor) e o segundo ponto de referência (Δd), sendo c a velocidade da onda que está sendo utilizada para a emissão do sinal.

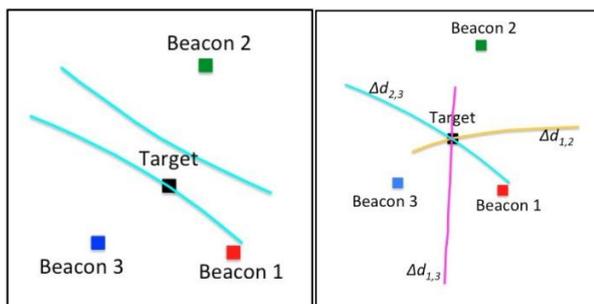
$$\Delta d = c \cdot \Delta t \quad (5)$$

Em duas dimensões, essa equação leva à fórmula (6), onde a coordenada (x_1, y_1) representa o ponto cartesiano onde está posicionado o sensor 1, (x_2, y_2) representa a posição do sensor 2, e (x, y) aponta a posição do emissor de ondas.

$$\Delta d = c \cdot \Delta t = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} - \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} \quad (6)$$

Para encontrar a resposta para as incógnitas (x, y) na equação (6) pode-se utilizar regressão não linear para executar a criação de diversas hipérbolas em um plano cartesiano, uma para cada intervalo de tempo entre sinais de um par de sensores. A partir da visualização das formas geométricas criadas infere-se que a intersecção entre as figuras é justamente o ponto alvo emissor de ondas. Para a criação dessas formas gráficas por regressão não linear, pode-se utilizar técnicas específicas [10]. Por exemplo, Torrieri (1984) propôs um algoritmo iterativo como técnica para resolução da problemática [11], já Depeng et. al (2011) utilizou sensoriamento compreensivo para a criação das hipérbolas [12]. A visualização gráfica dessa técnica está expressa na figura 3. Nela, o ponto *target* é o emissor de ondas sonoras, os pontos *beacon 1, 2 e 3* são os receptores de sinal e, por fim, $\Delta d_{x,y}$ representa a hipérbole formada pela análise dos dados dos sensores x e y .

Fig. 3. Hipérbolas criadas pela técnica de TDoA para aferição da posição do objeto emissor.



Fonte: O' KEEFE (2017). [8]

A técnica de triangulação por latência de tempo de voo TDoA será utilizada para a determinação da posição do emissor de ondas sonoras no presente trabalho.

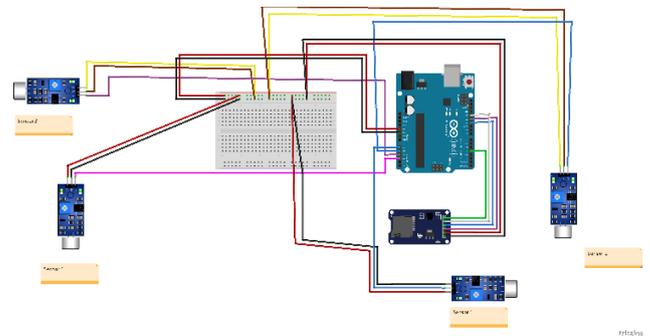
IV. METODOLOGIA

A. Materiais e Métodos

A metodologia do projeto se deu em duas dimensões. Por toda a extensão da metodologia, o estudo foi feito considerando uma condição estática para o emissor de ondas sonoras, onde o emissor não se desloca no plano. A primeira etapa da metodologia consistiu na pesquisa na literatura das técnicas de aferição de posição em duas dimensões e dos procedimentos utilizados em cada uma delas. Além dessa temática, foram pesquisados conceitos básicos que norteiam sinais e ondulatória, para melhor entendimento do comportamento das ondas sonoras. Por fim, foram estudados, também, os métodos de criação de gráficos utilizando a linguagem de programação Python, para posterior demonstração geométrica dos resultados obtidos no projeto, em forma de gráfico.

Como segunda etapa, houve a própria criação do circuito físico e da rotina de código em C++ que em conjunto são capazes de captar os dados sonoros com o Arduino para posterior tratamento, processamento e análise. Para a finalidade proposta, utilizou-se uma rotina repetitiva de leitura das tensões de entrada dos sensores e escrita desses valores no cartão SD, acompanhado do valor de tempo percorrido, em milissegundos, entre a ligação do Arduino com a fonte de energia e o instante de leitura. O arquivo de texto retornado por esse procedimento continha os valores das tensões de entrada dos 4 sensores e o instante temporal, separados por vírgula, para que fossem lidos como um arquivo de planilha de extensão .csv, capaz de dividir linhas diferentes de dados em colunas distintas através do uso de um demarcador, como vírgula, ponto e vírgula ou outros. Dessa maneira, foi possível extrair os valores necessários para a observação da oscilação de tensão dos sensores associados aos tempos de leitura. Assim, criou-se o sensor apresentado na figura 4.

Fig. 4. Esquemática do circuito gravador de ondas sonoras.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor na plataforma Fritzing.

Para montar o circuito definitivo foram usados um Arduino UNO REV 3, 4 módulos sensores de som com comparador LM393 e um Módulo Cartão Micro SD que possibilita a leitura e gravação de dados em um cartão micro SD HC da S3+ de 16Gb de memória. O circuito definitivo está apontado na figura 6. A tela LCD ligada ao sistema nessa fotografia serviu apenas para o melhor entendimento do funcionamento do sistema durante a sua criação e foi desligada após essa ação de modo a evitar o consumo desnecessário de energia pela placa Arduino.

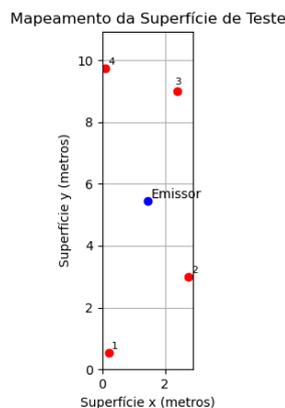
Fig. 5. Fotografia do circuito gravador de ondas sonoras.



Fonte: Fotografia feita pelo próprio autor.

Para a terceira etapa metodológica, foi desenvolvido o código de mapeamento da superfície de teste. A superfície de teste escolhida foi a garagem da residência do autor, devido às distâncias elevadas entre as paredes e ausência de superfícies e estruturas no interior do ambiente que pudessem impedir a propagação livre dos sinais sonoros. Assim, o código foi desenvolvido em Python, utilizando com auxílio a biblioteca Matplotlib para criação do gráfico. A plataforma de desenvolvimento utilizada foi o Visual Studio Code. A figura 6 expõe a superfície de testes, de 2,90 x 10,93 metros. Aqui, há a representação do ponto emissor de ondas sonoras, representado pela cor azul, e dos receptores, representados pela coloração vermelha. O sensor 1 foi posto na posição cartesiana (0,20 ; 0,55), o sensor 2 na posição (2,75 ; 3,00), o 3 em (2,40 ; 9,00), o 4 em (0,10 ; 9,75) e, por fim, o emissor de ondas sonoras foi posto próximo ao centro do plano de testes, no ponto (1,45 ; 5,45).

Fig. 6. Mapeamento da superfície de testes.



Fonte: Gráfico gerado utilizando Python. Código de autoria do próprio autor.

Em adição ao mapeamento, foi desenvolvido um código de gabarito. Com esse código, ao inserir-se as posições dos sensores e do emissor de ondas sonoras, é possível, através da aplicação da equação (6), saber com exatidão quais as diferenças de tempo de chegada do sinal entre os sensores que devem ser esperadas de serem coletadas na fase de testes. Com a configuração de disposição dos equipamentos demonstrada, os valores esperados calculados estão apresentados na tabela 1.

TABELA I

Tempos de Diferença de Chegada (TDOA) esperados entre sensores

Sensores envolvidos no TDoA	Tempo (ms)
1 -> 2	6,530918048070267
1 -> 3	3,952806695812979
1 -> 4	1,573063987402165
2 -> 3	-2,578111352257287
2 -> 4	-4,957854060668101
3 -> 4	-2,379742708410814

Fonte: Criado pelo próprio autor.

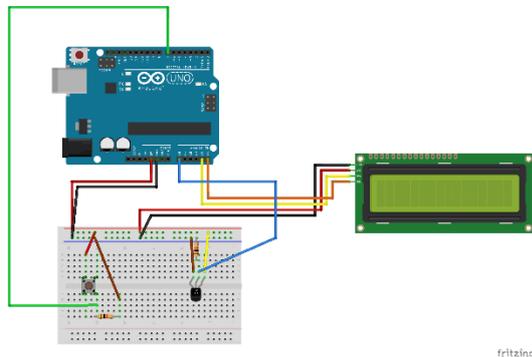
Para a quarta etapa metodológica, criou-se um código de varredura, responsável por encontrar a posição do emissor de ondas sonoras, pelo método TDoA, a partir do conhecimento do tempo de diferença de chegada dos sinais entre os sensores, coletados pelos 4 microfones do sensor criado, exposto na figura 6, e as posições respectivas deles. O código em questão executa o mesmo cálculo que o código de gabarito, com a diferença de que o executa, iterativamente, para pontos consecutivos do plano, de forma a varrer toda a superfície, utilizando uma discretização especificada. Todos os códigos utilizados nesse projeto podem ser verificados no [Git Hub](#) do autor. Dessa forma, o código salva os valores de diferença de tempo para cada ponto e depois os testa, de forma a encontrar o ponto com menor erro total, em comparação com os valores encontrados pelo sensor processados pelo microcontrolador dentro da placa Arduino, utilizando a equação (7). A rotina então devolve o mapa de mapeamento da superfície de teste com a posição encontrada para o emissor de sinais, juntamente com a posição específica do ponto encontrado.

$$ER = |t_{12}' - t_{12}| + |t_{13}' - t_{13}| + |t_{14}' - t_{14}| + |t_{23}' - t_{23}| + |t_{24}' - t_{24}| + |t_{34}' - t_{34}| \quad (7)$$

Nela, t_{u1u2}' é o tempo de diferença de chegada para os sensores $u1$ e $u2$ em cada ponto testado pelo código, e t_{u1u2} é o tempo de diferença de chegada captado pelo sistema físico para os sensores $u1$ e $u2$. A equação (7) é executada para cada ponto testado na varredura. Um vetor é responsável por armazenar todos os valores de erro, e a posição x e y do menor valor é justamente a posição com o menor erro associado, e, conseqüentemente, onde há melhor adequação para a posição do sensor.

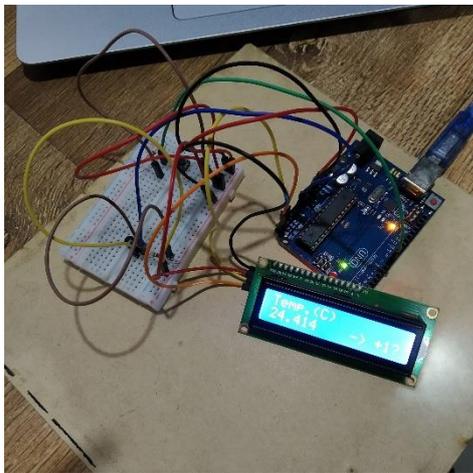
Para determinar-se com precisão a velocidade de propagação da onda sonora no meio é essencial o conhecimento da temperatura ambiente: como constatado pela equação (1), a velocidade do som é diretamente dependente dessa grandeza. Para obter com precisão o valor da temperatura ambiente no momento dos testes foi, portanto, criado um sistema auxiliar para captação dessa propriedade física. Este segundo sensor foi montado utilizando o sensor de temperatura LM35DZ, que usa diodos para medir a temperatura. A tensão de saída muda linearmente com o aumento da temperatura. Em vista disso, ao saber-se a tensão retornada do sensor ao Arduino, extrai-se a temperatura com a utilização de um código carregado no Arduino. O sensor possui erro na medição de $\pm 0,5$ °C a 25°C e retorna a temperatura direto na unidade Celsius. [16] A precisão alta do componente permite obter, por consequência, uma velocidade de propagação da onda associada a erros baixos. A esquematização e fotografia do sistema auxiliar descrito anteriormente estão organizados na figura 7 e 8, respectivamente.

Fig. 7. Esquemática do circuito auxiliar para determinação da temperatura ambiente.



Fonte: Esquema elaborado pelo próprio autor na plataforma Fritzing.

Fig. 8. Gráfico de perturbação da pressão no ar pelo tempo das ondas recebidas.



Fonte: Fotografia feita pelo próprio autor.

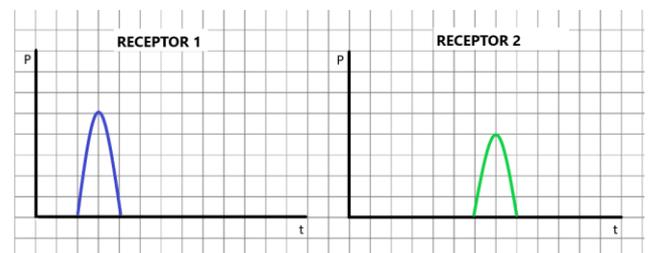
Para o sistema foram utilizados um Arduino UNO REV 3, o sensor de temperatura LM35DZ, dois resistores de 10k Ω , um LCD 16x2 azul acoplado com um módulo I2C e um *pushbutton* responsável por ser um gatilho físico para a realização das medições. Por intermédio de uma rotina específica, a cada momento que o botão é pressionado, o sistema realiza dez medições de temperatura com intervalo de um segundo entre elas, e imprime a média aritmética na tela LCD, até nova requisição de medição. A criação desse circuito correspondeu a quinta parte metodológica.

Para o emissor de ondas sonoras, foi utilizado um *smartphone* Xiaomi Redmi 7, posicionado como um objeto estático, e o alerta de notificação “Bip”, composto de dois picos sonoros consecutivos de frequência alta, correspondeu as ondas sonoras emitidas. Todo o sistema foi ativado remotamente através da notificação de chegada de mensagem em um aplicativo de mensagens instantâneas. Os 4 sensores de som foram posicionados a distâncias pré-definidas em

torno do objeto principal. O esquema está representado na figura 7, já apresentada.

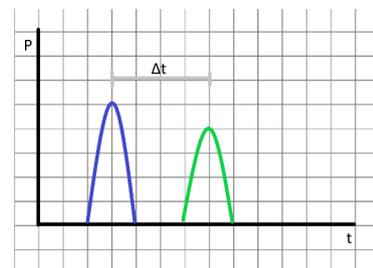
Para o teste definitivo, correspondente a quinta etapa metodológica, as gravações dos módulos de som iniciaram no mesmo instante de tempo, através da rotina de programação e foram salvas no cartão SD inserido no módulo micro SD, acompanhado do instante temporal. Uma vez captados os dados, foi possível analisar os pulsos sonoros e reconhecer os valores de crista das ondas sonoras recebidas pelos receptores. Assim, utilizando o Google Planilhas para a apresentação gráfica dos dados foi possível, ao compará-los, determinar o intervalo de tempo de diferença de chegada entre pares de sensores valores. O esquema que exemplifica essa etapa da metodologia está apresentado nas figuras 9 e 10.

Fig. 9. Gráfico da perturbação da pressão do ar pelo tempo da onda recebida por um par de receptores.



Fonte: Próprio autor.

Fig. 10. Gráfico da perturbação da pressão do ar pelo tempo da onda recebida por um par de receptores.



Fonte: Próprio autor.

Com as diferenças de tempo de chegada colhidas pelos sensores e tratadas em planilha, foi possível inserir esses valores, juntamente com a temperatura ambiente, no código de varredura e retornar a posição esperada do emissor de ondas sonoras. A partir da comparação entre os valores de tempo colhidos com os esperados, assim como entre as posições do emissor colhidas e esperadas, pôde-se extrair o erro do sensor.

B. Etapas de Pesquisa

Com base na metodologia exposta no tópico anterior, as atividades foram ordenadas cronologicamente e são apresentadas no cronograma disposto na tabela 2. Nela, os bimestres estão representados pelas letras B e as atividades estão separadas como especificado na lista a seguir.

Atividades:



A1: Revisão Bibliográfica. A2: Projeto e implementação do circuito. A3: Desenvolvimento da rotina para Arduino. A4: Testes preliminares do Sensor no Sistema Estático. A5: Elaboração do Relatório Parcial para a Universidade Federal do ABC. A6: Criação dos Códigos de Gabarito e Varredura em Python A7: Análise dos Dados Obtidos em Estado Estático. A8: Análise da Posição Encontrada para o Emissor de Ondas Sonoras. A9: Elaboração do Relatório Final para a Universidade Federal do ABC.

TABELA II
Cronograma de trabalhos

Atividades/Bimestre	B1	B2	B3	B4	B5
A1	XX				
A2	XX	XX			
A3		XX			
A4		XX			
A5			XX		
A6			XX	XX	
A7				XX	
A8				XX	XX
A9					XX

Fonte: Próprio autor.

V. RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados do trabalho de pesquisa em questão estão relacionados as diversas etapas metodológicas impostas. A partir da pesquisa bibliográfica dos temas que nortearam o trabalho em questão, pôde-se encontrar caminhos para a resolução do objetivo proposto. Em termos específicos, pôde-se escolher o método de aferição de posição mais adequado para a finalidade de encontrar a posição de um objeto emissor de ondas sonoras apenas obtendo o conhecimento dos sinais dos receptores de som durante a linha temporal do teste. Ademais, com a fundamentação teórica, foi possível selecionar os componentes mais adequados para a criação dos circuitos de gravação de áudio em cartão SD externo e do circuito termômetro.

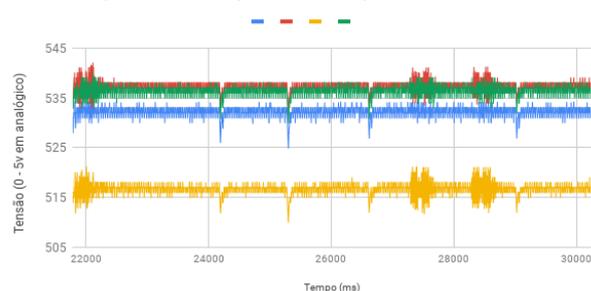
Após essa retomada da literatura, os sistemas foram criados em plataforma de simulação e transferidos para construção definitiva. O sensor de temperatura funcionou como o esperado e retornou-se valores coerentes para a temperatura ambiente sucessivas vezes e em diversas condições. A captação dessa grandeza foi de extrema importância para a aferição da velocidade de propagação do som no meio. Prosseguindo, o circuito de gravação dos dados de som em cartão SD foi construído com sucesso. Em seguida, pôde-se realizar os testes de gravação de áudio, nas condições expostas no desenvolvimento da etapa metodológica. Foram realizadas várias emissões de ondas sonoras no teste definitivo para observar a resposta dos sensores aos impulsos sonoros emitidos. Para a análise da diferença de chegada temporal, a amplitude da onda sonora foi visualizada nas vizinhanças da

oscilação referente a captação do sinal emitido pelo alto-falante. A temperatura ambiente captada pelo circuito termômetro foi de 31,592 °C. Na figura 11 e 12 estão demonstradas a resposta dos sensores para o teste definitivo, composto por duas partes, em toda a extensão temporal de captação de sinais. O decréscimo do valor de tensão médio recebido pelo sensor 2 na segunda etapa se deu por um ajuste físico na sensibilidade do componente. No entanto, como visualizado, a mudança de sensibilidade não afetou a leitura dos valores.

Fig. 11. Gráfico da tensão recebida pelo Arduino pelos 4 sensores de som pelo tempo entre as linhas 0-5000 da planilha.

Gráfico de oscilação de tensão por tempo 0-5000

Azul - Sensor 1, Vermelho - Sensor 2, Amarelo - Sensor 3, Verde - Sensor 4

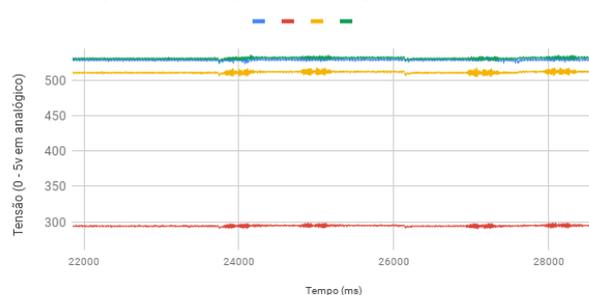


Fonte: Captura de tela do Google Planilhas feita pelo próprio autor.

Fig. 12. Gráfico da tensão recebida pelo Arduino pelos 4 sensores de som pelo tempo entre as linhas 6000-10000 da planilha.

Gráfico de oscilação de tensão por tempo 6000-10000

Azul - Sensor 1, Vermelho - Sensor 2, Amarelo - Sensor 3, Verde - Sensor 4

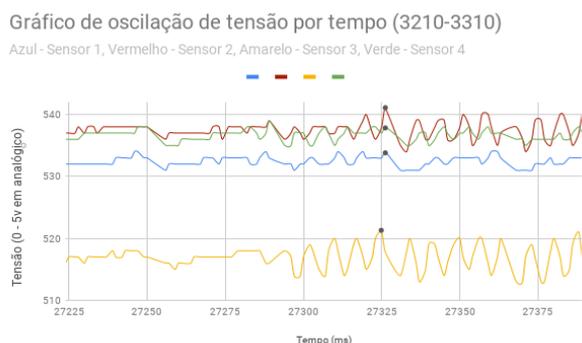


Fonte: Captura de tela do Google Planilhas feita pelo próprio autor.

Analisando os gráficos apresentados, é possível observar de forma clara a oscilação da tensão referente aos dois picos de frequência consecutivos emitidos pelo celular. Demonstra-se, portanto, que os sensores de som estão captando com sucesso as ondas sonoras. Foram observados 7 picos de tensão e desses 7, para análise, foi descartado o primeiro pico, pela impossibilidade de se analisar o começo da oscilação. Para identificar o pico de tensão que é referente a resposta do sensor a chegada da onda sonora, não se considerou, necessariamente, o valor mais alto de tensão detectado na onda, mas sim o ponto que fosse mais próximo do início da captação do sinal e mais proeminente em relação às suas vizinhanças. Para a melhor análise das oscilações sonoras,

aproximou-se o gráfico de tensão por tempo próximo aos pontos de picos de tensão. A figura 13 demonstra o gráfico do primeiro sinal a ser analisado e os pontos considerados para comparação entre o tempo de chegada do sinal em cada sensor. O mesmo procedimento foi utilizado para todas as análises.

Fig. 13. Gráfico da tensão recebida pelo Arduino pelos sensores de som 1, 2 e 3 pelo tempo no segundo pico de resposta.



Fonte: Captura de tela do Google Planilhas feita pelo próprio autor.

Assim, observou-se que, para esse sinal, os picos de tensão para os sensores 1, 2, 3 e 4 ocorreram, respectivamente, nos pontos de tempo 27326, 27326, 27325 e 27326. O código de gabarito foi rodado e nele foram verificados os tempos de diferença de chegada esperados para a configuração física da superfície de testes utilizada, demonstrada na metodologia. O procedimento foi repetido para todos os sinais. Na tabela 3 estão expostas as diferenças de tempo captadas para os 6 sinais, em comparação com a diferença que era esperada, retornada pelo código de gabarito.

TABELA III

Tempos colhidos e tempos esperados para cada par de sensor nos 6 sinais analisados.

Par de sensores	Tempos colhidos						Tempo esperado
	Sinal 1	Sinal 2	Sinal 3	Sinal 4	Sinal 5	Sinal 6	
1 e 2	0,00	11,0	9,00	0,00	6,00	15,0	6,53
1 e 3	-1,00	-1,00	7,00	0,00	6,00	3,00	3,95
1 e 4	0,00	3,00	7,00	-4,00	2,00	0,00	1,57
2 e 3	-1,00	-12,0	-2,00	0,00	0,00	-12,0	-2,58
2 e 4	0,00	-8,00	-2,00	-4,00	-4,00	-15,0	-4,96
3 e 4	1,00	4,00	0,00	-4,00	-4,00	-3,00	-2,38

Fonte: Próprio autor.

As diferenças de tempo de chegada colhidas foram inseridas no código de varredura, assim como a temperatura ambiente colhida pelo circuito termômetro. Na tabela 4 estão expostas as posições encontradas do emissor e seu erro em relação a posição real do emissor de som.

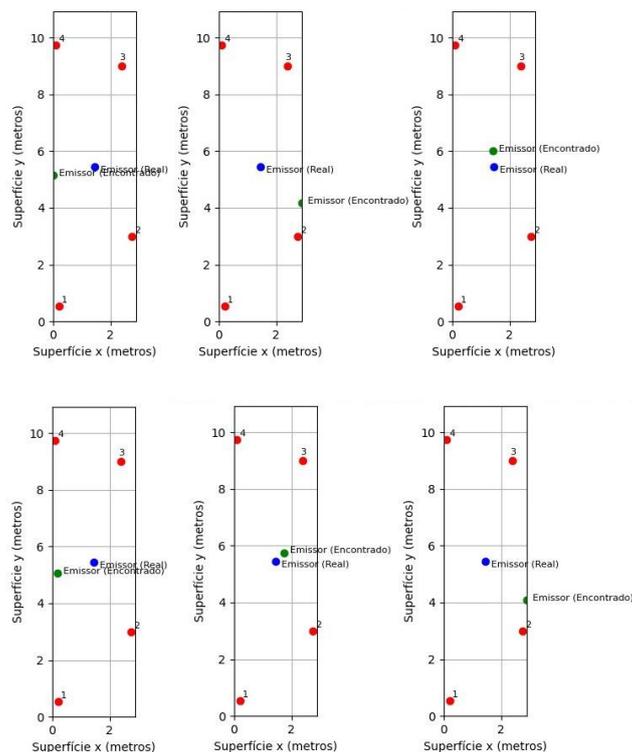
TABELA IV
Posições encontradas para o emissor nos 6 diferentes sinais

RESULTADOS			
Posição emissor / número do sinal	x (m)	y (m)	Erro do ponto ao real (m)
1	0,00	5,15	1,48
2	2,90	4,17	1,93
3	1,43	6,00	0,55
4	0,18	5,06	1,33
5	1,74	5,75	0,42
6	2,90	4,08	2,00

Fonte: Próprio autor.

Com o fim de complementar a análise dos resultados, gerou-se através do código de varredura, os gráficos que demonstram o mapeamento da superfície de testes e a posição do emissor de ondas sonoras encontrado em relação a posição do emissor real, para cada caso. Esses gráficos estão expostos na figura 14.

Fig. 14. Mapeamento da superfície de testes gerado pelo código de varredura, para cada os sinais 1, 2, 3, 4, 5 e 6.



Fonte: Compilação de gráficos feito pelo próprio autor.

Ao comparar os resultados obtidos, observou-se que todos os valores de posição retornados estão compreendidos dentro do retângulo de 2,90 x 2,00 metros por toda a extensão do eixo x e entre as posições 4,00 e 6,00 no eixo y. Em adição, os erros

entre a medição empregada pela rotina e a posição real do emissor de ondas sonoras estiveram compreendidos entre 42 centímetros e 2 metros.

Por conseguinte, os resultados encontrados levantaram diversas questões. Infere-se, a partir dos dados, que o sensor criado consegue responder a posição do sensor em um espaço retangular de, pelo menos, 2,90 x 2,00 metros. As razões que podem estar ligadas a essa precisão verificada do componente criado são: a velocidade de leitura do Arduino (*clock*), a latência de resposta dos microfones aos impulsos sonoros recebidos, a latência de escrita no cartão SD e a reflexão das ondas sonoras nas paredes do ambiente de teste.

Para discutir essas razões, buscou-se embasamento na literatura. Thothadri (2001) realizou um trabalho denominado *An Analysis on Clock Speeds in Raspberry Pi and Arduino Uno Microcontrollers* – Uma análise das velocidades de *clock* nos microcontroladores Raspberry Pi e Arduino Uno, em tradução direta, e aponta, como conclusão de seu trabalho, que utilizando o parâmetro da velocidade de *clock* para testagem das placas de desenvolvimento, nenhum dos dois respondeu como o esperado. O autor ainda acrescenta que o Arduino Uno possui boa estabilidade para o desenvolvimento de projetos com baixa velocidade de computação, deixando claras as limitações do componente, que, segundo o autor, não executa as funções internas dependentes do tempo – como a função *millis()*, presente no código utilizado na presente pesquisa - de forma correta em certas condições de frequência de execução do processador. [19]

Em adição, a metodologia de gabarito e varredura baseada na técnica de aferição de posição TDoA foi consolidada. A partir da comparação de resultados entre o código de gabarito e o de varredura verificou-se boa acurácia e precisão entre os códigos, apenas a depender das condições impostas, como discretização de menor tamanho e casas decimais utilizadas no dado da temperatura ambiente inserido na rotina em Python. Portanto, para melhoria do sistema, deve-se alterar a parte física de captação sonora e mitigar fontes de erro.

Por fim, as estratégias para a aferição da posição de objeto em um plano 2D através do uso de ondas sonoras foram assentadas, e foi possível discutir a precisão e a acurácia do sensor e da metodologia imposta em encontrar a posição de um emissor de ondas sonoras, ao captar valores de som por 4 sensores diferentes. Após a conquista desse objetivo, o sistema poderia ser transferido para um sistema dinâmico, e, mediante a aplicação dos mesmos métodos, seria possível extrair informações de deslocamento do objeto. Além disso, outras análises poderiam ser feitas, e mudanças executadas no sistema físico, de modo a otimizar a construção dos circuitos e metodologia para geolocalização em 2D utilizando a técnica de aferição de posição TDoA.

VI. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

O trabalho em questão visou a aferição da posição de um objeto emissor de ondas sonoras em duas dimensões que se

insere na demanda do grupo de foguetemodélismo da Universidade Federal do ABC. Esse grupo necessita de novas maneiras de analisar a trajetória dos foguetes em seus lançamentos. Em termos específicos de objetivo, o trabalho buscou criar um sensor automatizado capaz de aferir a posição de um objeto em um plano, utilizando uma placa de desenvolvimento Arduino e receptores de som ao redor do emissor.

Mediante a pesquisa bibliográfica sobre técnicas de aferição de posição, escolheu-se a metodologia de triangulação por latência de tempo de diferença de chegada (TDoA – *Time Difference of Arrival*) para atingir a finalidade proposta pelo trabalho. Esse método utiliza a diferença da chegada dos sinais nos diferentes receptores para conseguir concluir a posição de um emissor de sinal. A partir dessa retomada, a metodologia da presente pesquisa se desenvolveu. Os testes se deram em um sistema estático, em que o emissor de ondas sonoras não se move no plano. Durante o decorrer das fases metodológicas foram criados dois circuitos para compor o sistema: um circuito com Arduino Uno capaz de gravar áudio utilizando módulos de som em um cartão SD e um circuito auxiliar, também com um Arduino, para aferir a temperatura ambiente do ar. Essa grandeza é deveras importante para conhecer-se com clareza a velocidade de propagação do som no meio.

Em conseguinte, criou-se o mapeamento da superfície de testes e gabarito utilizando a linguagem de programação Python. Essa etapa é importante para observar a posição dos sensores e do emissor no plano, assim como observar as diferenças temporais esperadas para o teste definitivo e, dessa forma, é possível analisar as diferenças de tempo de chegada dos sinais nos sensores em comparação às diferenças de tempo captadas pelo circuito de gravação de ondas sonoras, e ainda confrontar as localizações obtidas dos componentes com as localizações reais onde eles estão inseridos. Além disso, foi criado um código de varredura, que recebe os valores temporais de diferença de chegada entre pares de sensores e a temperatura ambiente, e é capaz de apontar, através do método TDoA, a posição do emissor sonoro e demonstrá-la graficamente no plano.

A partir desse desenvolvimento, o progresso do trabalho agora se deu coletando os valores de tensão captados pelos microfones e analisando-os, tendo em vista o gabarito fornecido pelo mapeamento da superfície. A superfície de teste foi uma garagem, de 2,90 x 10,93. Nesse plano, os resultados do teste definitivo apresentaram erros entre o emissor encontrado pela varredura e a posição real de 42,0 centímetros a 2,00 metros, linearmente. Ainda, levantaram-se questões que podem ter contribuído para a acurácia e precisão do dispositivo constatada, como a velocidade de resposta do Arduino e do cartão SD utilizado, a reflexão das ondas sonoras nas paredes em volta do ambiente de teste e a sensibilidade dos módulos de som. Investigou-se ainda, na literatura, as características da velocidade de processamento do Arduino, para confronto com as hipóteses levantadas. Concluiu-se que a velocidade de funcionamento do processador do Arduino é um fator limitante para o



desenvolvimento de rotinas que necessitam de alta velocidade computacional, mas há mais detalhes que podem ter atuado como fator limitante para o trabalho.

Portanto, a metodologia para a geolocalização bidimensional de um emissor de ondas sonoras estático através dos sinais que chegam a sensores de som foi consolidada, e, também, foi discutida a precisão e acurácia do sistema criado, assim como limitações do sistema para melhoria dos valores retornados. Através de pesquisa na literatura, constatou-se que a velocidade de processamento do Arduino é um fator limitante que pode dificultar a tomada da posição do emissor de ondas sonoras. Ademais, pode-se repetir as análises em um sistema dinâmico, em que o objeto emissor de ondas sonoras se move. No sistema dinâmico, a partir da aplicação dos mesmos métodos, seria possível extrair grandezas como velocidade e aceleração do objeto e executar várias observações sobre o movimento do ponto emissor de som, e a partir de novas medições poder-se-ia analisar o sensor criado de forma a otimizar a metodologia de geolocalização em 2D utilizando a técnica de aferição de posição TDoA.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente ao meu orientador desse projeto de pesquisa, professor doutor Cesar Monzu Freire, professor da UFABC, pela orientação e direcionamento durante o desenvolvimento desse trabalho acadêmico. Agradeço também o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento do trabalho, através do fornecimento de bolsa. Além disso, gostaria de agradecer ao Marcos Siríaco Martins pelo convite de participação como palestrante na Latinware 2021 para a divulgação desse trabalho, assim como pela doação de equipamentos de eletrônica utilizados na pesquisa anterior a essa, e consequentemente, nessa também. Por fim, gostaria de agradecer aos amigos, namorada e familiares com quem dividia o progresso da pesquisa e pedia ajuda na resolução das problemáticas com as quais me deparava.

REFERÊNCIAS

- [1] AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA. Benefícios da Exploração Espacial. 2020. Disponível em < <https://www.gov.br/aeb/pt-br/programa-espacial-brasileiro/aplicacoes-espaciais/beneficios-da-exploracao-espacial>> . Acesso em 10 abr. 2021.
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. Regulamentos Brasileiros de Aviação Civil. Definições, regras de redação e unidades de medida: RBAC 01. Brasília, 2008.
- [3] SERWAY, R; JEWETT JÚNIOR., J. Princípios de Física Volume 2: Oscilações, Ondas e Termodinâmica. 5.ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.
- [4] SERWAY, R; JEWETT JÚNIOR., J. Princípios de Física Volume 1: Mecânica Clássica e Relatividade. 5.ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.
- [5] ARDUINO. What Is Arduino? 2020. Disponível em: < <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>> . Acesso em: 17 mai. 2020.
- [6] ARDUINO. Arduino UNO REV3. 2021. Disponível em < <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>> Acesso em: 27 mar. 2021.
- [7] HIGHTOWER, J., BORRIELLO, G. Location Sensing Techniques. 2001. 8f. Technical Report – University of Washington, Seattle, 2001.
- [8] O' KEEFE, B. Finding Location with Time of Arrival and Time Difference of Arrival Techniques. ECE Senior Capstone Project. 2017. Disponível em: < https://sites.tufts.edu/eesenior/designhandbook/files/2017/05/FireBrick_OKeefe_F1.pdf> Acesso em: 10 abr. 2021.
- [9] ZANOTTA, D.; CAPPELLETO, E.; MATSUOKA, M. O GPS: unindo ciência e tecnologia em aulas de física. Rev. Bras. Ensino Fis., São Paulo, v. 33, n. 2, p 1-6, jun. 2011. Disponível em: < https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172011000200014> Acesso em 18 mai. 2020.
- [10] : SHI, G.; MING, Y. Survey of Indoor Positioning Systems Based on Ultra-wideband (UWB) Technology. Springer. Wireless Communications, Networking and Applications. 2016. p. 1269-1278. Disponível em: . Acesso em: < https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-81-322-2580-5_115> 10 abr. 2021. DOI: 10.1007/978-81-322-2580-5_115.
- [11] TORRIERI, D. Statistical theory of passive location systems. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. v. AES-20, n. 2, p. 183-197. 1984. Disponível em: < <https://ieeexplore.ieee.org/document/4103919>>. Acesso em: 10 abr. 2021. DOI: 10.1109/TAES.1984.310439.
- [12] DEPENG, Y.; HUSHENG, L.; PETERSON, G.; FATHY, A. Compressive sensing TDOA for UWB positioning system. IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS). Phoenix. p. 194-197. 2011. Disponível em < <https://ieeexplore.ieee.org/document/5725485> >. Acesso em: 10 abr. 2021. DOI: 10.1109/RWS.2011.5725485.
- [13] DIY HACKS AND HOW TOS. Miniature Beeping Circuit Prank. 2012. Disponível em: . Acesso em: 10 abr. 2021. Disponível em: < <https://www.instructables.com/Miniature-Beeping-Circuit-Prank/>> Acesso em: 10 abr. 2021.
- [14] TMRH10. TMRpcm: Advanced Features. 2016. Disponível em: < <https://github.com/TMRh20/TMRpcm/wiki/Advanced-Features>> Acesso em: 10 abr. 2021.
- [15] GREATSCOTTLAB. Make Your Own Spy Bug (Arduino Voice Recorder). 2018. Disponível em: < <https://www.instructables.com/Make-Your-Own-Spy-Bug-Arduino-Voice-Recorder/>> . Acesso em: 10 abr. 2021
- [16] BABOS, F. Sensor de temperatura: LM35 | TMP36 | DS18B20 (Completo). 2020. Disponível em: < <https://flaviobabos.com.br/sensor-de-temperatura-arduino/>> . Acesso em: 15 mar. 2021
- [17] TATSCH T., D. Localização indoor utilizando Bluetooth Low Energy e aprendizado de máquina. 2018. 36f. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Santa Catarina, São José, 2018
- [18] MITTELSTADT S., R. Bluepath: Sistema de Localização Indoor. 2018. 58f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2018
- [19] THOTHADRI, M. An Analysis on Clock Speeds in Raspberry Pi Pico and Arduino Uno Microcontrollers. American Journal of Engineering and Technology Management. v. 6 n. 3, 2021. pp. 41-46. DOI: 10.11648/j.ajetm.20210603.13.