

**HENRIQUE SOUZA DE MELO
LUCAS RODRIGUES DA CONCEIÇÃO
PEDRO HENRIQUE LAGE FURTADO DE MENDONÇA**

**LOCALIZAÇÃO DE FONTES DE SINAIS
ACÚSTICOS**

São Paulo
2020

**HENRIQUE SOUZA DE MELO
LUCAS RODRIGUES DA CONCEIÇÃO
PEDRO HENRIQUE LAGE FURTADO DE MENDONÇA**

**LOCALIZAÇÃO DE FONTES DE SINAIS
ACÚSTICOS**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para ob-
tenção do Título de Engenheiro Eletricista.

São Paulo
2020

**HENRIQUE SOUZA DE MELO
LUCAS RODRIGUES DA CONCEIÇÃO
PEDRO HENRIQUE LAGE FURTADO DE MENDONÇA**

**LOCALIZAÇÃO DE FONTES DE SINAIS
ACÚSTICOS**

Trabalho apresentado à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para ob-
tenção do Título de Engenheiro Eletricista.

Área de Concentração:
Sistemas Eletrônicos

Orientador:
Cássio Guimarães Lopes

Co-orientador:
Vítor Heloiz Nascimento

São Paulo
2020

Henrique Melo

Henrique Souza de Melo

Lucas Rodrigues da Conceição

Lucas Rodrigues da Conceição

Pedro Mendonça

Pedro Henrique Lage Furtado de Mendonça

Cássio Lopes

Prof. Dr. Cássio Guimarães Lopes

Vitor Heloiz Nascimento

Prof. Dr. Vítor Heloiz Nascimento

RESUMO

O projeto tem objetivo de desenvolver um sistema de localização de fonte de sinais por rede de sensores. O foco do trabalho é a localização de uma fonte acústica. Essa tarefa tem relevância em aplicações como resgate de pessoas em escombros, localização de locutores em espaço livre, complementação de posicionamento indoor e localização de falhas em estruturas. O desenvolvimento ocorreu em maior parte nas dependências dos autores e a cooperação entre os membros da equipe foi realizada à distância devido à crise do COVID-19 em 2020. O projeto foi desenvolvido ao longo do ano de 2020 (datas de início e conclusão 17/03/2020 e 14/12/2020, respectivamente) pelo grupo de 3 alunos da graduação em Engenharia Elétrica — Énfase em Eletrônica e Sistemas da EPUSP: Henrique Melo, Lucas Rodrigues e Pedro Mendonça, orientados pelo Prof. Dr. Cássio Guimarães Lopes e coorientados pelo Prof. Dr. Vítor Heloiz Nascimento. O sistema é composto por uma rede de sensores (microfones) conectados por cabos a uma unidade de aquisição de sinais, que por sua vez permite o processamento dos sinais amostrados para serem utilizados na localização. A localização da fonte a partir desses sinais foi implementada utilizando métodos encontrados na literatura. Inicialmente foi realizado um estudo para a avaliação do Estado da Arte dos métodos de localização por rede de sensores. Os métodos estudados então foram validados em um simulador desenvolvido para auxiliar o desenvolvimento do projeto. Foi avaliada a implementação em sistemas físicos reais os métodos validados em simulação. Finalmente é construído o sistema final, sobre o qual é realizado uma série de testes que permitem avaliar o funcionamento do sistema, e é comentado sobre suas aplicações. O custo total do sistema é de aproximadamente R\$400,00.

ABSTRACT

Signal source localization is a classic problem in signal processing, relevant in many applications [1]. Sound source localization is a parameter estimation problem that can be efficiently tackled by an acoustic sensor network. In recent years it has gained special attention due to its implementation in wireless acoustic sensor networks (WASN)s [2, 3]. This work studies the main techniques used in this problem, based on energy and temporal features of the signals. We do not address one specific application of such devices, but present this study as a first step for the development of more focused systems. One application of interest is structural health monitoring (SHM). We first review the formulation of the main algorithms used in this task and verify their performance in a simulation environment. Then we present the actual, physical implementation of the network. Finally, we discuss results and further directions.

Keywords — sensor networks, acoustic sensor network, WASN, sound source localization

LISTA DE FIGURAS

1	Árvore do Projeto	15
2	Sinal transmitido pela fonte do simulador	28
3	Sinal recebido por um nó do simulador	28
4	Sinal recebido por um nó do simulador	28
5	Representação da plataforma de testes da rede de sensores acústicos usando um microcontrolador e microfones conectados a ele.	30
6	Plataforma de testes executando a solução pelo EBL em ambiente interno.	32
7	Montagem para testes TOA	33
8	Plataforma de testes executando a solução pelo TDOA com método de Foy em ambiente interno	35
9	Ilustração da configuração do hardware.	37
10	Exemplo de tela da aplicação de localização de fontes.	38
11	Comparação do sinal transmitido e o sinal captado por um nó, poluído por reverberação do ambiente interno.	41
12	Comparação do sinal transmitido e o sinal captado por um nó, poluído por vento.	42
13	Comparação do sinal transmitido e o sinal captado por um nó, poluído pelo ruído de um cortador de grama nas redondezas da montagem experimental.	42
14	Comparação do sinal transmitido e o sinal captado por um nó em ambiente externo com pouca reverberação, ruído e vento.	43
15	Foto de um sistema com 4 microfones sendo testado em ambiente externo, com pouca reverberação, ruído e vento.	44
16	Sinal de pulso sintetizado para uso nos testes.	45
17	Comparação dos métodos com sinal de pulsos. A rede contava com 6 nós. .	45
18	Comparação dos métodos com sinal de música. A rede contava com 6 nós. .	46

19	Comparação dos métodos com sinal de voz. A rede contava com 6 nós.	46
20	Comparação dos métodos de solução de sistema linear. O sinal de pulsos foi usado. A rede contava com 6 nós.	47
21	Comparação do efeito da posição da fonte. O sinal de pulsos foi usado. A rede contava com 6 nós.	48
22	Comparação do efeito da posição da fonte. O sinal de pulsos foi usado. A rede contava com 6 nós.	49
23	Comparação do efeito da posição da fonte. O sinal de pulsos foi usado. A rede contava com 6 nós.	49
24	Comparação do efeito do número de nós. O sinal de pulsos foi usado. A rede contava com 4 nós.	50
25	Comparação do efeito do número de nós. O sinal de pulsos foi usado. A rede contava com 5 nós.	51
26	Comparação do efeito do número de nós. O sinal de pulsos foi usado. A rede contava com 6 nós.	51
27	Comparação do efeito do número de nós. O sinal de pulsos foi usado. A rede contava com 4 nós.	52
28	Comparação do efeito do número de nós. O sinal de pulsos foi usado. A rede contava com 5 nós.	52
29	Comparação do efeito do número de nós. O sinal de pulsos foi usado. A rede contava com 6 nós.	53

LISTA DE ABREVIAÇÕES

ADC	<i>analog-to-digital converter</i>
ASN	<i>acoustic sensor network</i>
DMA	<i>direct memory access</i>
DOA	<i>direction of arrival</i>
EBL	<i>energy based localization</i>
GCC	<i>generalized cross-correlation</i>
HOC	<i>head of cluster</i>
lstsq	<i>least squares method</i>
NLMS	<i>normalized least mean squares</i>
RLS	<i>recursive least squares</i>
TOT	<i>time of transmission</i>
TOA	<i>time of arrival</i>
TDOA	<i>time difference of arrival</i>
TOF	<i>time of flight</i>
WASN	<i>wireless acoustic sensor network</i>
WSN	<i>wireless sensor network</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

D	dimensão do espaço vetorial adotado
d_i	distância da fonte emissora ao nó receptor i
f_s	Frequência de amostragem
g_i	ganho do sensor i
N	Número de sensores
\mathbf{p}_i	posição do nó i
p_{in}	n-ésima componente da posição do nó i
$R_{ij}(\tau)$	Correlação Cruzada Generalizada dos sinais captados nos nós i e j
$s(t)$	energia do sinal emitido pela fonte no instante t a 1m da fonte
t_0	instante de emissão do sinal pela fonte (<i>TOT - time of transmission</i>)
t_i	instante de chegada do sinal ao nó i (<i>TOA - time of arrival</i>)
Δt_i	tempo de propagação do sinal emitido pela fonte até o nó i (<i>TOF - time of flight</i>)
τ_{ij}	diferença de tempo de chegada entre o nó i e j (<i>TDOA - time difference of arrival</i>)
$\hat{\tau}_{ij}$	estimador de diferença de tempo de chegada entre o nó i e j
θ	posição da fonte
θ_n	n-ésima componente da posição da fonte
ν	velocidade de propagação do sinal no meio
$x(t)$	sinal emitido pela fonte
$x_i(t)$	leitura do sinal no nó i
$y_i(t)$	energia lida pelo sensor i no instante t

SUMÁRIO

1	Introdução	11
1.1	Apresentação do problema	11
1.2	Motivação e aplicações	12
1.3	Panorama do projeto e organização do documento	13
2	Estado da arte	16
2.1	Propagação de sinais acústicos no ar	16
2.2	Localização baseada na energia	17
2.2.1	Modelagem	17
2.2.2	Linearização	18
2.3	Localização baseada no TOA	19
2.3.1	Modelagem	19
2.3.2	Linearização	20
2.4	Localização baseada no TDOA	21
2.4.1	Estimação dos TDOAs	21
2.4.2	Modelagem pelo método de Chan	21
2.4.3	Linearização	23
2.4.4	Modelagem pelo método de Foy	24
3	Metodologia	27
3.1	Ambiente de Simulação	27
3.2	Testes em Hardware	30
3.2.1	Testes EBL	31
3.2.2	Testes TOA	32

3.2.3	Testes TDOA	34
4	Proposta	36
4.1	Configuração do hardware	36
4.2	Implementação em software	37
4.2.1	Solução de sistemas lineares	38
5	Resultados	40
5.1	Condições ambientais	40
5.1.1	Ambiente interno	40
5.1.2	Vento	41
5.1.3	Ruído	41
5.1.4	Ambiente externo	42
5.2	Resultados	43
5.2.1	Comparação dos métodos	44
5.2.2	Comparação dos algoritmos de solução do sistema linear	47
5.2.3	Efeito da posição da fonte	48
5.2.4	Efeito do número de nós	49
6	Conclusão	54
6.1	Análise dos resultados	54
6.2	Próximos passos	55
	Referências	56
	Apêndice A – Cronograma de Execução	58

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do problema

A localização de fontes acústicas por redes de sensores (ASN–Acoustic Sensor Networks) consiste na captura de parâmetros dos sinais emitidos pela fonte de interesse que dependem diretamente da posição em que a fonte se encontra, tais como: amplitude, energia, tempo de chegada nos sensores, etc. Para melhorar as condições em que as capturas são realizadas, diversos sensores são espalhados pelo campo de interesse, o que aumenta a probabilidade de que a fonte esteja razoavelmente próxima de algum sensor quando emitir sinais: isto melhora significativamente o desempenho do sistema de localização.

No contexto de redes de sensores, utiliza-se o conceito de grafos [4, 5] para modelagem do fluxo de dados e da estratégia de processamento. Um nó da rede, ou agente, representa uma entidade capaz de fazer medições locais e realizar algum tipo de processamento. Dependendo da topologia de rede adotada, a qual depende fundamentalmente dos recursos disponíveis, tal processamento pode ser feito totalmente no local (rede distribuída), por um nó-líder local (*head-of-cluster*), perfazendo uma rede parcialmente distribuída, ou mesmo por um nó central global que coordena todo o sistema (rede centralizada).

Os problemas que empregam ASNs podem ser classificados em dois tipos: estimação de sinais, ou estimação de parâmetros [2]. Os problemas de estimação de sinais visam estimar um sinal desejado, usualmente pela fusão das medições realizadas pelos inúmeros sensores. Problemas de estimação de parâmetros buscam extrair certos parâmetros dos sinais de áudio, como, por exemplo, a posição da fonte. O presente projeto busca solucionar o problema de localização de uma fonte acústica por meio de uma rede conectada de sensores acústicos.

Existem também sistemas conhecidos como *Wireless Acoustic Sensor Networks* (WASNs), que consistem de uma ASN implementada de forma que não seja necessário conexão física por cabos entre os nós sensores. A utilização desse tipo de rede de sensores introduz uma série de desafios maiores que fogem do escopo do projeto, e portanto não serão utilizadas

neste trabalho.

Restrições típicas de Um sistema de localização de fontes são:

- O sistema deve ter baixo custo;
- O sistema deve ser portátil;
- O sistema deve ter baixo consumo energético,
- O sistema deve ser robusto: contabilizar as diferenças nos sensores (*e.g.* diferentes respostas em frequência) e ser resiliente a níveis razoáveis de ruído.

Essas características impõe uma série de limitações técnicas, tornando o projeto desafiador. Por exemplo, a taxa de amostragem e resolução dos sinais são limitadas; o hardware empregado não poderá ser sofisticado, o que acaba implicando na necessidade de desenvolver algoritmos de processamento de baixa complexidade computacional e numericamente robustos à precisão limitada. O software a ser desenvolvido deverá fazer o melhor aproveitamento possível dos recursos à disposição.

1.2 Motivação e aplicações

Um sistema funcional de localização de fontes acústicas é um “template” de solução de uma miríade de problemas correlatos, tais como resgate de pessoas em escombros, localização de locutores e de fontes de poluição sonora [6].

Também são contempladas aplicações de alto valor agregado, tais como detecção de descargas parciais em transformadores de potência, identificação e localização de falhas em estruturas aeronáuticas e de concreto (SHM–Structural Health Monitoring), prevenção de furto em tubulações de óleo e gás, monitoramento de turbinas eólicas, navios, silos, etc. [7, 8].

Desta forma, o desenvolvimento bem-sucedido de um protótipo funcional de localização de fontes acústicas com precisão aceitável e baixo custo é o primeiro elo numa cadeia de desenvolvimento cujo produto final atende a uma variedade de nichos de mercado.

Uma última aplicação, de viés acadêmico, é como testbed para sistemas adaptativos distribuídos, que permitirá o desenvolvimento de novas estratégias de processamento utilizando dados reais, ao invés de dados sintéticos.

1.3 Panorama do projeto e organização do documento

O desenvolvimento do projeto foi realizado ao longo do ano de 2020. Devido à crise relativa a pandemia de COVID-19 as atividades de desenvolvimento do projeto foram afetadas. O desenvolvimento teve de ser realizado à distância, nas dependências dos autores. Foi realizada apenas uma visita ao laboratório da Universidade ao longo do desenvolvimento do trabalho, para que fosse possível a utilização de ferramentas que não estavam disponíveis nas dependências dos autores (e.g., osciloscópio). No apêndice A está detalhada e execução do projeto em um cronograma.

A implementação de uma rede com processamento distribuído nos sensores apresentaria uma grande dificuldade adicional referente a sincronização dos nós distintos, portanto adotamos uma solução parcialmente distribuída. A solução escolhida apresenta nós sensores distribuídos em um ambiente, que não realizam nenhum processamento, enquanto um *head-of-cluster* (HOC) recebe os dados dos sensores e realiza a localização. O HOC apresenta uma solução para a localização, podendo ser associada a outros HOCs, para criar um sistema de localização com processamento distribuído. A associação de diferentes HOCs dispensa o problema do sincronismo, pois cada HOC apresenta sua solução para a localização. Essa associação pode ser realizada por diferentes meios de comunicação, inclusive sem-fios.

Inicialmente foi realizado um estudo do estado da arte referente a métodos de localização de fonte por redes acústicas. A finalidade do estudo foi de melhor fundamentar as decisões durante o desenvolvimento do projeto, analisando as técnicas existentes para solucionar o problema da localização. Os principais métodos estudados foram TOA - *time of arrival*, EBL - *energy based localization* e TDOA - *time difference of arrival*.

O método EBL faz uso do fato de que a energia do sinal capturado em um sensor está relacionado com a distância entre o sensor e a origem do sinal. Similarmente o método TOA emerge do fato do tempo de chegada estar também relacionado a distância entre o sensor e a origem do sinal. O método TDOA recai em um problema de determinação de cruzamento de hipérboles, que surgem da análise da diferença do tempo de chegada entre pares de sensores. Cada um desses métodos está mais detalhado no capítulo Estado da arte.

Além dos métodos estudados, é comum a utilização do método DOA - *direction of arrival*, que consiste da determinação da origem do sinal entre ângulos de chegada estimados por grupos de sensores.

Uma vez realizado o estudo do estado da arte, e definido quais seriam os métodos utilizados para a localização de fonte, foi criado um ambiente de simulação em Python. O simulador permite determinar diferentes posições para sensores, e posição de fonte. O simulador então aplica um modelo de propagação de sinal de forma a simular como cada um dos sensores recebe o sinal propagado. Com esta ferramenta foi possível estudar o comportamento de diferentes métodos de localização livre das limitações e dificuldades de um sistema real. O simulador permite visualizar graficamente a posição da fonte, dos sensores e da solução. Também permite visualizar como cada sensor recebe o sinal.

Com os métodos escolhidos validados em simulador, partimos para a prototipagem dos métodos em microcontroladores, de forma a avaliar como as técnicas de localização estudadas se comportam em um sistema físico real. Os detalhes referentes ao simulador e aos testes realizados em plataformas físicas podem ser encontrados no capítulo Metodologia.

Em posse das informações referentes ao funcionamento dos métodos em um sistema real, foi possível tomar decisões a respeito de quais métodos seriam adotados no produto final, e também dos requisitos de hardware para o bom funcionamento do sistema. O sistema final concebido é mais detalhado no capítulo Proposta.

Com o sistema funcionando, foram realizadas uma série de testes para avaliar o desempenho em diferentes condições, operando com diferentes métodos de localização, com diferentes tipos de sinais e topologias de rede acústica. Foi criada uma plataforma de testes para permitir a realização dessa etapa. Os resultados dos testes são apresentados no capítulo Resultados.

Uma visão panorâmica do projeto e suas frentes é capturada pela Árvore do Projeto, conforme ilustra a Figura 1.

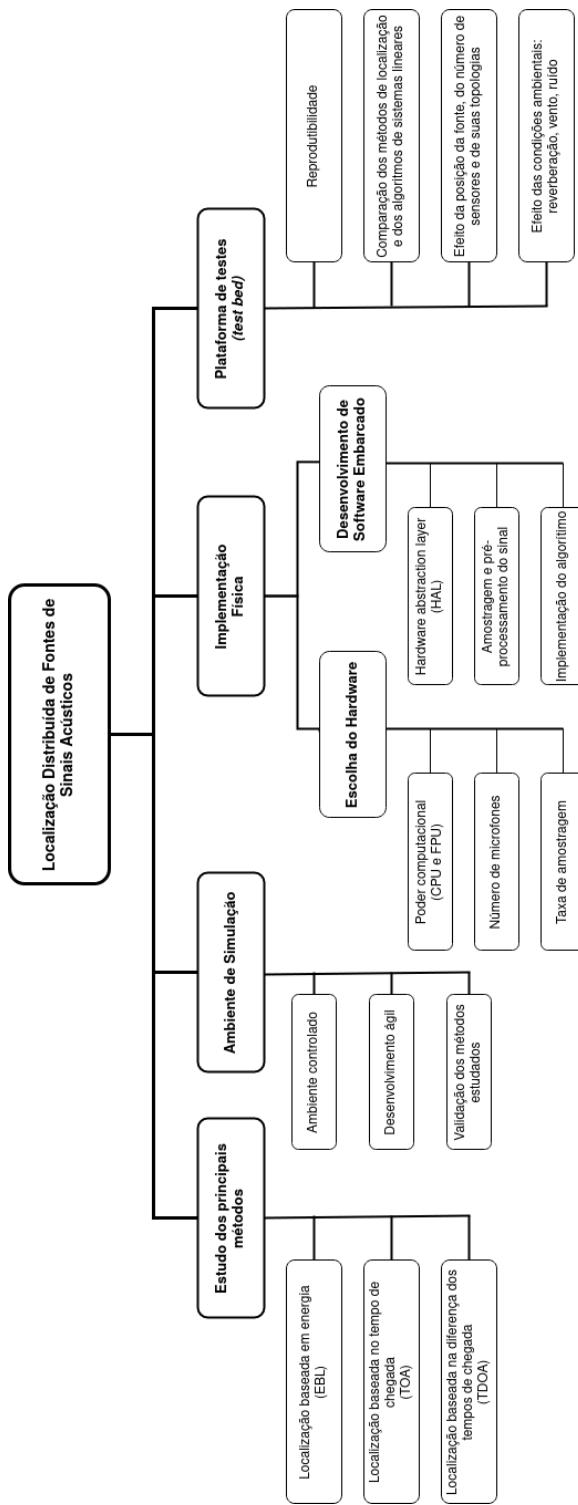


Figura 1: Árvore do Projeto

2 ESTADO DA ARTE

O primeiro passo deste projeto foi o estudo da bibliografia disponível sobre o tema. Muitos trabalhos já foram desenvolvidos no estudo de sistemas de localização de fontes de sinais. Suas aplicações são discutidas em publicações como [2] e [9]. Os principais algoritmos de processamento de sinais são apresentados em trabalhos como [3]. Foram também desenvolvidos estudos de codificação de áudio com foco especificamente em ASNs [10], para comportar as limitações de transferência de dados. Dispositivos de estimação de direção de chegada de sinais sonoros, com foco em aplicações de localização de fontes sonoras já foram apresentados em [6].

Focamos em estudar os principais modelos matemáticos para propagação de sinais sonoros e os algoritmos matemáticos para estimativa da posição de uma fonte de sinais a partir de medidas obtidas por nós sensores. Foram estudados os três principais métodos de localização: localização baseada na energia do sinal (*EBL — energy based localization*), localização baseada no TOA (*time of arrival*) e localização baseada no TDOA (*time difference of arrival*).

2.1 Propagação de sinais acústicos no ar

O modelo de propagação utilizado neste trabalho se baseia na proposta apresentada e validada em [11], na qual se considera uma emissão de sinal sonoro omnidirecional em um meio isotrópico, com atenuação simples. A energia do sinal, nessas condições, decairá com o quadrado da distância à fonte, com a velocidade do som no ar assumida constante.

Usando dessas premissas, o sinal captado pelo nó i no instante t será:

$$x_i(t) = \sqrt{g_i} \frac{x(t - \Delta t_i)}{\|\mathbf{p}_i - \boldsymbol{\theta}\|^{\alpha/2}} = \sqrt{g_i} \frac{x(t - \Delta t_i)}{d_i^{\alpha/2}} \quad (2.1)$$

onde g_i é o ganho do sensor; Δt_i o tempo de propagação do sinal ao nó (*time of flight, TOF*); $x(t)$ o sinal emitido pela fonte no tempo t ; \mathbf{p}_i a posição do nó; $\boldsymbol{\theta}$ a posição da

fonte; α uma constante, aqui considerada como dois [11]; d_i a distância da fonte ao nó.

Casos mais genéricos, como meios de velocidade do som variável, são tratados em [12]. Estudos em meios anisotópicos foram apresentados em [13].

2.2 Localização baseada na energia

A localização da fonte sonora baseada na leitura de energia dos sensores (EBL - *energy based localization*) é uma solução tradicional ao problema de localização de fontes sonoras por ASNs [3], [11]. Uma das motivações para a abordagem EBL é o fato de que a potência acústica emitida pelas fontes tende a variar mais lentamente no tempo do que a amplitude do sinal correspondente, o que permite a diminuição da taxa de amostragem em relação ao processamento direto do sinal. Isso reduz também a necessidade de sincronização precisa entre nós, além de ser um método computacionalmente atraente [3]. Outras vantagens são as baixas exigências de comunicação entre sensores e robustez em relação a perturbações nos parâmetros do modelo (2.1) e a ruído [11].

2.2.1 Modelagem

O algoritmo de localização via EBL se baseia no modelo de propagação apresentado na equação 2.1. A energia lida pelo sensor i no instante t , $y_i(t)$, calculada sobre um intervalo de tempo $[t - \ell, t]$, será:

$$y_i(t) = g_i \frac{s(t - \Delta t_i)}{\|\mathbf{p}_i - \boldsymbol{\theta}\|^\alpha} = g_i \frac{s(t - \Delta t_i)}{d_i^\alpha} \quad (2.2)$$

onde $s(t)$ é a energia lida à distância de 1m da fonte no intervalo de tempo $[t - \ell, t]$ (note que $y_i(t)$ e $s(t)$ se referem a leituras de energia). Considera-se que a energia do sinal sendo transmitido pela fonte varia lentamente em relação ao tempo de propagação Δt_i e ao tamanho da janela de gravação ℓ . Sob essas premissas, aproximamos $s(t - \Delta t_i) \approx s(t)$. Aqui, fizemos $\alpha = 2$ como discutido anteriormente. Definindo $\rho_i \triangleq g_i/y_i(t)$, reescrevemos, para cada um dos N nós, a expressão (2.2):

$$\begin{aligned} d_1^2 &= \|\mathbf{p}_1 - \boldsymbol{\theta}\|^2 = \frac{g_1}{y_1(t)} s(t) = \rho_1 s(t) \\ d_2^2 &= \|\mathbf{p}_2 - \boldsymbol{\theta}\|^2 = \frac{g_2}{y_2(t)} s(t) = \rho_2 s(t) \\ &\vdots \\ d_k^2 &= \|\mathbf{p}_k - \boldsymbol{\theta}\|^2 = \frac{g_k}{y_k(t)} s(t) = \rho_k s(t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Que representa um sistema de equações não lineares em $\boldsymbol{\theta}$ e com $s(t)$ como incógnita.

2.2.2 Linearização

Um processo de linearização do sistema, como o apresentado em [14], é aplicado sobre o sistema 2.3. Subtraindo da k -ésima equação a primeira:

$$d_k^2 - d_1^2 = \|\mathbf{p}_k - \boldsymbol{\theta}\|^2 - \|\mathbf{p}_1 - \boldsymbol{\theta}\|^2 = s(t)(\rho_k - \rho_1)$$

Que pode ser expandido como:

$$\|\mathbf{p}_k\|^2 - 2\mathbf{p}_k^T \boldsymbol{\theta} + \|\boldsymbol{\theta}\|^2 - \|\mathbf{p}_1\|^2 + 2\mathbf{p}_1^T \boldsymbol{\theta} - \|\boldsymbol{\theta}\|^2 = s(t)(\rho_k - \rho_1)$$

Gerando essa equação para cada possível par de equações, temos um sistema que é linear em $\boldsymbol{\theta}$ e mantém como incógnita $s(t)$:

$$-2(\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_1)^T \boldsymbol{\theta} - (\rho_k - \rho_1)s(t) = -\|\mathbf{p}_k\|^2 + \|\mathbf{p}_1\|^2 \quad (2.4)$$

Para um ambiente D -dimensional, escrevemos, para cada distinto par k, ℓ de nós:

$$\mathbf{a}_1 = \begin{bmatrix} -2(p_{k_1} - p_{\ell_1}) & \dots & -2(p_{k_D} - p_{\ell_D}) & -(\rho_k - \rho_\ell) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_D \\ s(t) \end{bmatrix}$$

$$b_1 = -\|\mathbf{p}_k\|^2 + \|\mathbf{p}_\ell\|^2$$

Onde p_{ij} é a j -ésima componente do vetor de localização do nó i . Geramos assim um sistema de equações lineares em $\boldsymbol{\theta}$ e $s(t)$, com $D + 1$ incógnitas, cujos coeficientes são facilmente determinados pela posição e medida dos sensores: $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$. Um sistema linear gerado utilizando esta técnica irá possuir $N - 1$ equações linearmente independentes, onde N é o número de sensores. Para que o sistema tenha solução são necessários:

- Para $D = 2$, pelo menos 3 equações linearmente independentes, ou seja, no mínimo 4 sensores;
- Para $D = 3$, pelo menos 4 equações linearmente independentes, ou seja, no mínimo 5 sensores.

Baseado no equacionamento apresentado, para a implementação do método basta que se conheça a posição de cada nó p_i , o que é conhecido quando a rede é fisicamente colocada no campo de interesse, e energia recebida, a qual é facilmente determinada em cada nó: pode ser estimada como uma média temporal do quadrado das amostras coletadas dentro de uma janela de observação, após descontar o valor médio dessas, como proposto em [11]. A subtração da média compensa possíveis *offset* do ADC.

2.3 Localização baseada no TOA

O método do tempo de chegada (TOA) implica em utilizar a informação do tempo em que o sinal chegou até os sensores para determinar o local da fonte. Normalmente, não é conhecido o momento em que ocorre o evento acústico, apenas o instante em que o sinal é detectado nos sensores. A utilização deste método pode ser realizada através da resolução de um sistema de equações para determinar as coordenadas da fonte onde ocorreu o evento, e também o tempo em que o evento ocorreu. Esse método exige uma base de tempo comum entre os nós (sincronismo), dificultando sua aplicação em um sistema distribuído.

As equações são obtidas através da modelagem física do problema. Em princípio as equações provenientes da modelagem física não são lineares, entretanto pode-se realizar uma linearização do problema, semelhante à utilizada na Seção 2.2.

2.3.1 Modelagem

O tempo que um sinal demora para viajar da fonte sonora até um sensor é dado por:

$$\Delta t_i = \frac{d_i}{\nu}$$

onde ν representa a velocidade de propagação, Δt_i o tempo total de propagação (*time of flight*), e d_i a distância total percorrida pelo sinal.

Sendo θ a posição (desconhecida) da fonte sonora, \mathbf{p}_k a posição (conhecida) do k -ésimo microfone, t_0 o tempo em que ocorreu o evento que produziu as ondas sonoras e t_k como sendo o instante que o sinal chega no k -ésimo sensor, o tempo de propagação é:

$$\Delta t_k = t_k - t_0$$

A distância entre sensor e fonte é:

$$d_k = \|\mathbf{p}_k - \boldsymbol{\theta}\| \quad (2.5)$$

Para N sensores, tem-se N equações do tipo:

$$\nu(t_k - t_0) = d_k \quad (2.6)$$

2.3.2 Linearização

A técnica utilizada, semelhante àquela apresentada na seção 2.2.2, consiste em elevar as equações ao quadrado e subtrair uma de outra, de forma que os termos não lineares de todas as incógnitas desaparecem.

Elevando a equação 2.6 ao quadrado temos:

$$\nu^2(t_k - t_0)^2 = d_k^2$$

Subtraindo a equação $k - 1$ da k -ésima equação, com $k \in [2, N]$:

$$\nu^2(t_k - t_0)^2 - \nu^2(t_{k-1} - t_0)^2 = d_k^2 - d_{k-1}^2$$

$$\begin{aligned} \nu^2(t_k - t_0)^2 - \nu^2(t_{k-1} - t_0)^2 &= \|\mathbf{p}_k - \boldsymbol{\theta}\|^2 - \|\mathbf{p}_{k-1} - \boldsymbol{\theta}\|^2 \\ \nu^2(t_k^2 - t_1^2 - 2t_k t_0 + 2t_{k-1} t_0) &= \|\mathbf{p}_k\|^2 - \|\mathbf{p}_{k-1}\|^2 - 2\boldsymbol{\theta}^T \mathbf{p}_k + 2\boldsymbol{\theta}^T \mathbf{p}_{k-1} \\ \nu^2 t_k^2 - \nu^2 t_1^2 + 2\nu^2(t_{k-1} - t_k) &= \|\mathbf{p}_k\|^2 - \|\mathbf{p}_{k-1}\|^2 + 2(\mathbf{p}_{k-1} - \mathbf{p}_k)^T \boldsymbol{\theta} \end{aligned}$$

Finalmente:

$$2\nu^2(t_{k-1} - t_k)t_0 - 2(\mathbf{p}_{k-1} - \mathbf{p}_k)^T \boldsymbol{\theta} = \|\mathbf{p}_k\|^2 - \|\mathbf{p}_{k-1}\|^2 - \nu^2 t_k^2 + \nu^2 t_{k-1}^2, k \in [2, N] \quad (2.7)$$

Concatenando t_0 ao final do vetor de coordenadas de $\boldsymbol{\theta}$ formando um vetor \mathbf{x} , e concatenando $2\nu^2(t_{k-1} - t_k)$ ao final do vetor $-2(\mathbf{p}_{k-1} - \mathbf{p}_k)$, formando o vetor \mathbf{a}_k^T , e chamando $\|\mathbf{p}_k\|^2 - \|\mathbf{p}_{k-1}\|^2 - \nu^2 t_k^2 + \nu^2 t_{k-1}^2$ de b_k :

$$\mathbf{a}_k \mathbf{x} = b_k, \quad k \in [2, N] \quad (2.8)$$

Basta empilhar os vetores linha \mathbf{a}_k para formar matriz \mathbf{A} e empilhar os escalares b_k para formar o vetor \mathbf{b} .

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (2.9)$$

A partir daqui pode-se utilizar as métodos de álgebra linear para aproximar os valores de \mathbf{x} .

É importante notar que para esse método ser utilizado para localização de fontes em duas dimensões, são necessários pelo menos quatro sensores. Para localização em duas dimensões temos três incógnitas (tempo t_0 e as duas coordenadas de θ), enquanto, utilizando esta técnica, o sistema gerado após a linearização irá possuir $N - 1$ equações. Analogamente, para localização em três dimensões serão necessários pelo menos cinco sensores.

2.4 Localização baseada no TDOA

O método da diferença dos tempos de chegada (*time difference of arrival — TDOA*) para a localização de fontes resume-se a dois problemas: problema de estimativa das diferenças de tempo de chegada e o problema de localização da fonte uma vez em posse dos TDOAs. Nesse trabalho nos atentamos a dois métodos clássicos, a saber, o método de Chan [15] e método de Foy [16]. Esse método, assim como o TOA, exige uma base de tempo comum entre os nós.

2.4.1 Estimação dos TDOAs

Para sinais com forma conhecida a priori, e bem comportados, a diferença dos tempos de chegada pode ser estimada de forma simples, definindo o tempo de chegada como o cruzamento do sinal por um certo limiar. Para sinais arbitrários isso não basta: Na literatura há tantas publicações sobre estimadores de TDOA quanto métodos de localização dado os TDOAs, mas a forma mais implementada é por meio da correlação cruzada dos sinais captados em diferentes sensores [3, 17, 18]. Assim, nesse trabalho a estimativa de TDOAs é feita por essa técnica.

Tendo uma estimativa de TDOA, o próximo passo é obter uma localização da fonte a partir dessa grandeza.

2.4.2 Modelagem pelo método de Chan

O método de Chan é uma das abordagens clássicas para o problema de localização de fontes. Para a dedução, partimos das hipóteses de que o tempo de chegada (TOA) é conhecido e que há sincronismo perfeito na base de tempo comum dos sensores.

A distância entre o nó i e a fonte é dado por:

$$\begin{aligned}\mathbf{d}_i &\triangleq \boldsymbol{\theta} - \mathbf{p}_i \\ \|\mathbf{d}_i\| &\triangleq \|\boldsymbol{\theta} - \mathbf{p}_i\| = \nu(t_i - t_0)\end{aligned}\quad (2.10)$$

em que ν é a velocidade de propagação do sinal que foi transmitido pela fonte no instante t_0 (*time of transmission* — TOT) e recebido pelo sensor i em t_i .

Fazendo a subtração de \mathbf{p}_i com \mathbf{p}_j e utilizando a definição da diferença dos tempos de chegada $\tau_{ij} \triangleq t_i - t_j$ temos:

$$\|\mathbf{p}_i\| - \|\mathbf{p}_j\| = \nu \cdot \tau_{ij} \quad (2.11)$$

Repare que desenvolver o método à partir da equação 2.11 faz com que o instante de transmissão (t_0) seja eliminado; assim, deduzir a posição da fonte a partir do TDOA tem a vantagem de não ser necessário ter conhecimento do instante de transmissão.

É importante ressaltar que os instantes de chegada t_i e t_j não precisam ser obtidos. É apenas necessário conhecimento da diferença (TDOA) entre eles, estimada por $\hat{\tau}_{ij}$ como já discutido. Agora isolamos o termo \mathbf{p}_i de 2.11 e substituímos \mathbf{p}_i e \mathbf{p}_j pela definição em 2.10:

$$\|\boldsymbol{\theta} - \mathbf{p}_i\| = \nu \cdot \hat{\tau}_{ij} + \|\boldsymbol{\theta} - \mathbf{p}_j\|$$

Aplicamos a definição de norma vetorial:

$$\sqrt{\sum_{n=1}^D (\theta_n - p_{i_n})^2} = \nu \cdot \hat{\tau}_{ij} + \sqrt{\sum_{n=1}^D (\theta_n - p_{j_n})^2}$$

em que p_{i_n} é a n -ésima componente do vetor de posição do nó i .

Elevando essa expressão ao quadrado, expandindo as somatórias e reordenando a equação chega-se a:

$$-2 \cdot \sum_{n=1}^D (\theta_n \cdot (p_{i_n} - p_{j_n})) + \sum_{n=1}^D (p_{i_n}^2 - p_{j_n}^2) = (\nu \cdot \hat{\tau}_{ij})^2 + 2 \cdot \nu \cdot \hat{\tau}_{ij} \cdot \|\mathbf{p}_j\| \quad (2.12)$$

Adotando um nó de referência e escrevendo 2.12 na sua forma matricial com a seguinte definição de produto interno $\langle a, b \rangle = \sum_{n=1}^D a_n \cdot b_n$ tem-se:

$$\begin{aligned}
& -2 \cdot \begin{bmatrix} p_{i_1} - p_{ref_1} & p_{i_2} - p_{ref_2} & \dots & p_{i_D} - p_{ref_D} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dots \\ \theta_D \end{bmatrix} = \\
& \quad \left[(\nu \cdot \hat{\tau}_{iref})^2 + \langle \mathbf{p}_{ref}^2, 1 \rangle - \langle \mathbf{p}_i^2, 1 \rangle + 2 \cdot \nu \cdot \hat{\tau}_{iref} \cdot \|\mathbf{p}_{ref}\| \right]
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Nesse ponto, o método de Chan [15] adota um nó de referência e utiliza a equação 2.13 dos outros nós para obter um sistema de equações a partir do qual se obtém as coordenadas da fonte ($\boldsymbol{\theta}$) em função de $\|\mathbf{p}_{ref}\|$. Então substitui-se $\boldsymbol{\theta}$ na expressão 2.10, eleva ao quadrado e é obtida uma expressão quadrática do tipo $a \cdot \|\mathbf{p}_{ref}\|^2 + b \cdot \|\mathbf{p}_{ref}\| + c = 0$ que pode ser resolvida pelo método de Bhaskara. Com as raízes, o método obtém as coordenadas da fonte, que estavam em função de $\|\mathbf{p}_{ref}\|$.

Assim, o método de Chan apresenta uma solução analítica para o problema usando $D + 1$ sensores, porém a solução analítica só utiliza o número mínimo e suficiente de nós, assim, não é possível refinar a solução com a adição de mais sensores.

2.4.3 Linearização

Similarmente ao que foi apresentado nos métodos anteriores, nesse trabalho nós propomos a agregar a incógnita $\|\mathbf{p}_{ref}\|$ em 2.13 resultando em um método derivado do trabalho de Chan [15] como visto em 2.14.

$$\begin{aligned}
& -2 \cdot \begin{bmatrix} p_{i_1} - p_{ref_1} & p_{i_2} - p_{ref_2} & \dots & p_{i_D} - p_{ref_D} & \nu \cdot \hat{\tau}_{iref} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \dots \\ \theta_D \\ \|\mathbf{p}_{ref}\| \end{bmatrix} = \\
& \quad \left[(\nu \cdot \hat{\tau}_{iref})^2 + \langle \mathbf{p}_{ref}^2, 1 \rangle - \langle \mathbf{p}_i^2, 1 \rangle \right]
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Assim obtemos uma equação com $D + 1$ incógnitas **lineares** usando os valores conhecidos: \mathbf{p}_i , \mathbf{p}_{ref} , $\hat{\tau}_{iref}$ e ν . Logo, com $D + 2$ sensores ($D + 1$ incógnitas mais o sensor de referência) obtém-se um sistema do tipo $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$.

O sistema obtido pelo empilhamento da equação 2.14 é o que foi implementado nesse trabalho como método de Chan modificado.

2.4.4 Modelagem pelo método de Foy

Uma vez desenvolvido a modelagem para o método de Chan, o entendimento da modelagem de outros métodos torna-se mais fácil, portanto a modelagem do método de Foy [16] será apresentada de forma agilizada. Esse método é um clássico da literatura e muito utilizado ainda hoje, pois apresenta diversas vantagens [16], a saber:

1. É possível mesclar diferentes tipos de medidas no mesmo sistema de equações (medidas de energia, diferenças de tempo, tempos de chegada, direção de chegada, etc.);
2. Fácil de detectar quando não converge;
3. Múltiplas medidas são combinadas corretamente, levando em conta fatores geométricos e com pesos proporcionais a acurácia das medidas;
4. A convergência é fácil e rápida mesmo com palpites iniciais distantes.

A grande diferença do método de Foy para os demais já apresentados nesse trabalho, é que ele obtém a linearização do conjunto de equações por meio da expansão por série de Taylor mantendo os dois primeiros termos. Então utiliza um método iterativo para solucionar, partindo de um palpite inicial para a posição da fonte e buscando a correção local (minimização do erro) desse palpite, por meio da determinação da solução linear local por mínimos quadrados.

A modelagem de Foy começa por definir o que o autor denomina de “forma funcional” [16] pela relação algébrica abaixo:

$$f_k(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{p}_i) \triangleq u_k = m_{i,k} - e_k \quad (2.15)$$

em que $m_{i,k}$ é a k-ésima medida (ângulo, energia, TOA, TDOA, etc.) entre a fonte e o nó i, u_k é o valor real dessa medida e e_k é o desvio da medida empírica para o valor real. Assim, o problema matemático se torna estimar a posição da fonte ($\boldsymbol{\theta}$) dado as medidas $m_{i,k}$, f_k e a posição dos nós (\mathbf{p}).

Assume-se a hipótese de que os erros e_k são estatisticamente distribuídos com média zero $\langle e_k, e_k \rangle = 0$. Escreve-se a matriz de covariância dos erros (\mathbf{R}) assumindo o i, j -

ésimo elemento como sendo o produto interno dos erros i, j :

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & \langle e_1, e_2 \rangle & \dots & \langle e_1, e_n \rangle \\ \langle e_2, e_1 \rangle & 0 & \dots & \langle e_2, e_n \rangle \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \langle e_n, e_1 \rangle & \langle e_n, e_2 \rangle & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Dado uma estimativa (ou palpite inicial) da posição da fonte ($\hat{\boldsymbol{\theta}}$), a posição real pode ser escrita como

$$\boldsymbol{\theta} = \hat{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{\delta}$$

Então insere-se essa forma na equação 2.15 e faz-se a expansão por séries de Taylor, mantendo apenas os termos de ordem zero e primeira ordem:

$$f_k(\boldsymbol{\theta}, \mathbf{p}_i) \triangleq m_{i,k} - e_k \approx f_k(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \mathbf{p}_i) + \nabla(f_k)|_{\hat{\boldsymbol{\theta}}} \times \boldsymbol{\delta} \quad (2.16)$$

Definindo as matrizes:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \nabla(f_1)|_{\hat{\boldsymbol{\theta}}} \\ \nabla(f_2)|_{\hat{\boldsymbol{\theta}}} \\ \dots \\ \nabla(f_n)|_{\hat{\boldsymbol{\theta}}} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\delta} = \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{bmatrix}, \quad \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} m_{i,1} - f_{1,est} \\ m_{i,2} - f_{2,est} \\ \dots \\ m_{i,n} - f_{n,est} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \dots \\ e_n \end{bmatrix}$$

As relações expressas por 2.16 podem ser reescritas como:

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\delta} \approx \mathbf{Z} - \mathbf{e} \quad (2.17)$$

Por fim, a escolha de $\boldsymbol{\delta}$ que fornece a menor soma quadrática dos erros é obtido por [16]:

$$\left[\mathbf{A}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{A} \right]^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Z} \quad (2.18)$$

Dessa forma, escolhe-se um palpite inicial para a posição da fonte: $\hat{\boldsymbol{\theta}}_0$ e calcula-se $\boldsymbol{\delta}$ por meio da equação 2.18. Assim, obtém-se uma nova estimativa: $\hat{\boldsymbol{\theta}}_1 = \hat{\boldsymbol{\theta}}_0 + \boldsymbol{\delta}$ que, por sua vez, pode ser inserida em 2.17 e repetir as iterações até atingir um valor de erro $\boldsymbol{\delta}$ aceitável.

A convergência pode ser monitorada pelo valor de $\boldsymbol{\delta}$, que deve ser decrescente. Para isso, o autor do método [16] recomenda comparar a norma de $\boldsymbol{\delta}$ de uma iteração com a iteração anterior e certificar-se que a razão de tais normas é bem menor que um. O

autor também recomenda um teste de validade dos dados por meio de $\det(\mathbf{A}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{A})$ ou $\det(\mathbf{A}^T \mathbf{A})$, descartando as amostras ou o palpite inicial de $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ caso esses determinantes resultem em um valor muito pequeno.

3 METODOLOGIA

A seguir serão detalhados o ambiente de simulação e as plataformas de testes implementados em sistemas físicos reais, que permitiram a melhor compreender o desempenho e funcionamento de cada método e das possibilidades de hardware a serem utilizados.

3.1 Ambiente de Simulação

Desenvolveu-se um ambiente de simulação de modo que os métodos de localização pudessem ser implementados de forma ágil e em um maior nível de abstração, além de fornecer um ambiente controlado.

Dado uma lista com as coordenadas dos nós e da fonte, bem como outros parâmetros de potência de ruído nos nós, tipo de sinal gerado na fonte, dentre outros, o simulador gera o sinal na fonte e o propaga aos nós seguindo as premissas e equacionamento descritos na seção 2.1. Os nós, por sua vez, formam uma rede em que compartilham informações sobre o sinal recebido e com isso a posição da fonte é estimada pelos diferentes métodos implementados.

Uma senoide com uma envoltória exponencial foi escolhida como sinal emitido pela fonte, pois representa de forma simples uma ampla gama de sinais acústicos: duração finita, energia limitada e banda estreita:

$$x(t) = \sin(2\pi f t) e^{-t/\lambda} \quad (3.1)$$

onde f é a frequência em Hz e λ a constante de decaimento. A leitura do nó i será, como apresentado na equação (2.1):

$$x_i(t) = \sqrt{g_i} \frac{x(t - \Delta t_i)}{\|\mathbf{p}_i - \boldsymbol{\theta}\|} + \epsilon(t)$$

restrito à janela $[0, \ell]$, sendo que o início do sinal de todos os nós é sincronizado com o início da transmissão pela fonte. $\epsilon(t)$ é ruído branco Gaussiano. Todos esses sinais têm a

mesma taxa de amostragem. As Figuras 2 a 4 ilustram esses sinais.

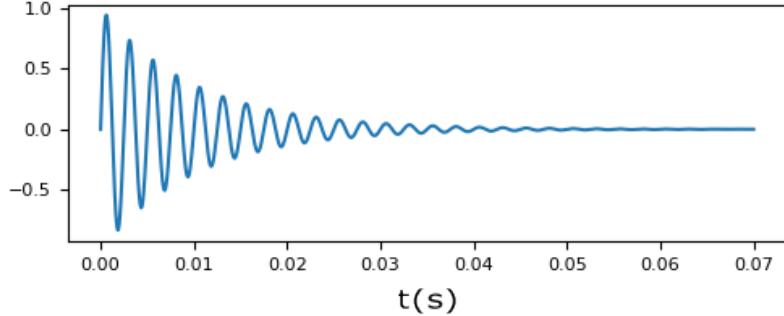


Figura 2: Sinal transmitido pela fonte como descrito na equação 3.1, com $f = 400$ Hz e $\lambda = 1$.

Em um cenário realista, não se sabe a posição da fonte e esta pode não ser estacionária – como, por exemplo, na localização de um locutor em espaço aberto. Logo, a métrica de SNR é definida levando em conta apenas a potência do ruído, como encontra-se na literatura [19]:

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\sigma_e^2} \right) \quad (3.2)$$

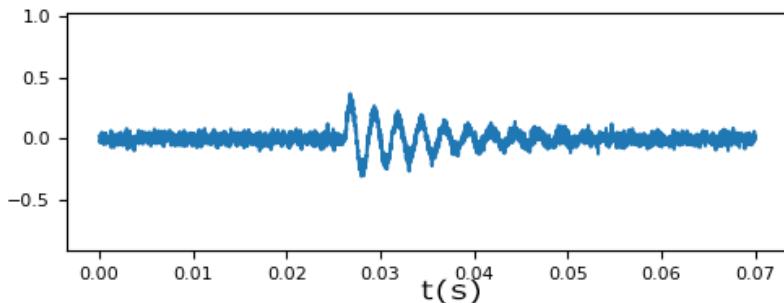


Figura 3: Sinal recebido por um nó à distância de 10 m, com potência de ruído $\sigma_e^2 = 0,001$ (SNR = 30 dB).

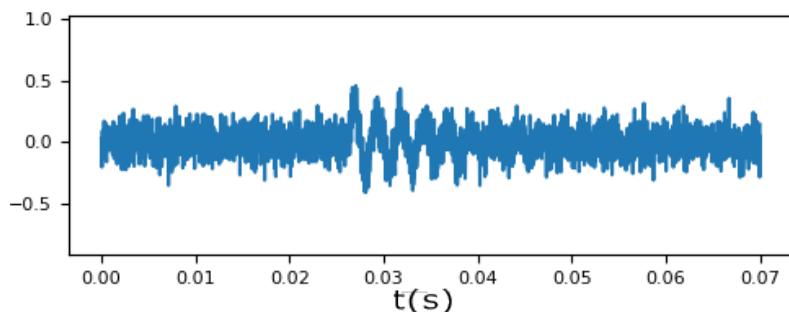


Figura 4: Sinal recebido por um nó à distância de 10 m, com potência de ruído $\sigma_e^2 = 0,01$ (SNR = 20 dB).

Foram geradas simulações variando a quantidade e posição dos nós, bem como a potência do ruído adicionado σ_e^2 .

Implementou-se os quatro métodos já detalhados anteriormente. Como palpite inicial para o método de Foy utilizou-se a posição média dos nós. Para o cálculo dos TDOA, tanto no método de Foy quanto de Chan, foi utilizada a correlação cruzada entre sinais capturados em diferentes nós. A implementação de TOA estima os tempos de chegada por meio da técnica de cruzamento de limiar [20].

As tabelas 1 a 3 detalham um sumário de vários testes obtidos com o simulador.

As simulações nos indicam que aumentar o número de microfones melhora a estimativa, desde que os nós adicionados contribuam com medidas de boa qualidade. Quando são introduzidos nós com medidas muito incertas, a estimativa piora. Nota-se, também, uma grande melhora das estimativas quanto maior a relação sinal ruído. O método do TOA, implementado aqui por cruzamento de limiar, é bastante prejudicado pois o sinal chega bastante atenuado. Seu desempenho melhora ao aumentar a potência recebida pelos nós: seja aumentando a potência transmitida ou diminuindo a distância entre nó e fonte.

Número do nó	Posição
Fonte	$[3 \ 2]^T$
1	$[-9 \ -5]^T$
2	$[-6 \ 8, 5]^T$
3	$[5 \ -7]^T$
4	$[10 \ 10]^T$
5	$[-2 \ 6]^T$
6	$[11 \ 1]^T$
7	$[2 \ -13]^T$
8	$[-14 \ 1]^T$

Tabela 1: Posição dos nós utilizados para testes da rede. A posição da fonte é sempre $[3, 2]^T$.

Número de nós	Erro médio do método (m)			
	Energia	TOA	TDOA-Chan	TDOA-Foy
4	$1,176 \pm 1,230$	$1,908 \pm 7,715$	$0,032 \pm 0,054$	$0,022 \pm 0,029$
5	$0,971 \pm 0,237$	$1,007 \pm 4,615$	$0,026 \pm 0,044$	$0,019 \pm 0,024$
6	$0,896 \pm 0,203$	$0,672 \pm 0,690$	$0,021 \pm 0,028$	$0,015 \pm 0,015$
7	$1,106 \pm 0,228$	$1,208 \pm 0,848$	$0,028 \pm 0,050$	$0,018 \pm 0,027$
8	$1,529 \pm 0,266$	$2,015 \pm 0,953$	$0,033 \pm 0,059$	$0,019 \pm 0,027$

Tabela 2: Valores de erro médio de estimativa, computado sobre 1000 realizações do experimento, para cada um dos métodos testados, variando-se o número de nós da rede. Os N nós selecionados são os N primeiros nós apresentados na tabela 1. A SNR utilizada foi de 30 dB.

SNR (dB)	Erro médio do método (m)			
	Energia	TOA	TDOA-Chan	TDOA-Foy
20	$2,372 \pm 1,903$	$3,369 \pm 3,587$	$2,513 \pm 2,110$	$1,908 \pm 1,350$
30	$1,176 \pm 1,230$	$1,908 \pm 7,715$	$0,032 \pm 0,054$	$0,022 \pm 0,029$
40	$0,306 \pm 0,081$	$2,106 \pm 0,359$	$0,008 \pm 0,004$	$0,006 \pm 0,003$
60	$0,010 \pm 0,005$	$1,618 \pm 0,695$	$0,002 \pm 0,000$	$0,001 \pm 0,000$

Tabela 3: Valores de erro médio de estimativa para cada um dos métodos testados, variando-se a SNR da rede. Para cada SNR executou-se 1000 realizações do experimento. São utilizados os 4 primeiros nós listados na tabela 1.

3.2 Testes em Hardware

Desenvolvemos plataformas de teste que nos aproximaram de uma aplicação real com o intuito de implementar os algoritmos validados anteriormente. As plataformas são constituídas por um microcontrolador conectado a microfones com fios longos o suficiente para espalhá-los no campo de interesse. Uma representação desse modelo pode ser visualizada na figura 5. As plataformas foram desenvolvidos com agilidade, nas placas de desenvolvimento mais facilmente acessíveis a fim de determinar quais seriam os requisitos do sistema final, e quais as dificuldades. O objetivo era obter resultados minimamente coerentes e que indicassem onde deveríamos investir mais no sistema. Na sequência, discute-se tais plataformas em maior detalhe.

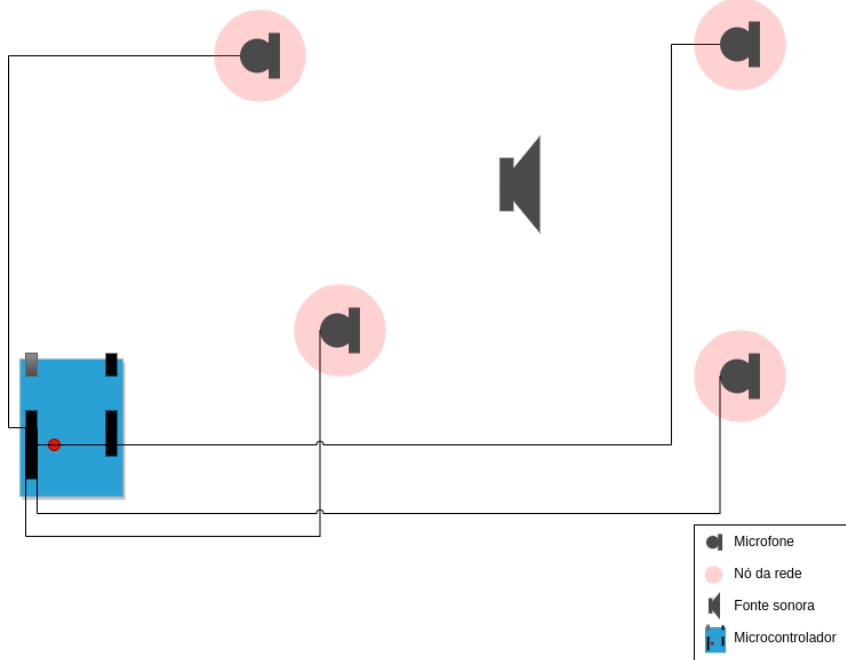


Figura 5: Representação da plataforma de testes da rede de sensores acústicos usando um microcontrolador e microfones conectados a ele.

3.2.1 Testes EBL

A primeira plataforma de testes envolveu o método baseado em energia, o EBL. Para essa tarefa, o hardware escolhido foi:

- Microcontrolador Arduino Uno¹.
- Módulo de microfones com amplificador operacional MAX4466².
- Cabos coaxiais³.

A ferramenta desenvolvida se encarrega de amostrar os sinais captados pelos microfones, computar sua energia como a soma do quadrado das amostras sobre uma janela temporal (descontando o valor médio do sinal) e estimar a posição pelo equacionamento descrito na seção 2.2. Foi desenvolvida uma etapa de calibração dos nós responsável por estimar o ganho de cada nó, apresentado na equação 2.2.

Inicialmente, utilizou-se um pequeno sistema no qual as distâncias da fonte aos nós eram da ordem de dezenas de centímetros, que pode ser visualizado em teste na figura 6. Tal sistema não apresentou funcionamento adequado devido às leituras de energia não serem coerentes com a distância à fonte, baseando-se no modelo da equação 2.2. A tabela 4 ilustra esse problema.

Nó j	Nó k	$(d_j/d_k)^2$	e_k/e_j
0	1	3,25	1,83
0	2	1,00	0,78
0	3	0,40	0,47
1	2	0,31	0,42
1	3	0,13	0,26
2	3	0,41	0,60

Tabela 4: Comparação da razão do quadrado das distâncias com a inversa razão de energia captada entre nós em um ensaio. Verifica-se que a terceira e quarta colunas têm valores bem distintos, em discordância ao modelo da equação 2.2. d_i é a distância do nó i à fonte enquanto e_i é a energia lida.

A hipótese para justificar o problema exposto na tabela 4 é que o sistema está sofrendo com muita reverberação em relação à potência de sinal, devido às suas dimensões e à

¹<https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>, acesso em 13 de outubro de 2020.

²<https://www.maximintegrated.com/en/products/analog/audio/MAX4466.html>, acesso em 13 de outubro de 2020.

³Por exemplo, <https://www.intelbras.com/pt-br/cabo-coaxial-bipolar-para-cftv-analogico-fc67cbr-fast-cam>, acesso em 13 de outubro de 2020.

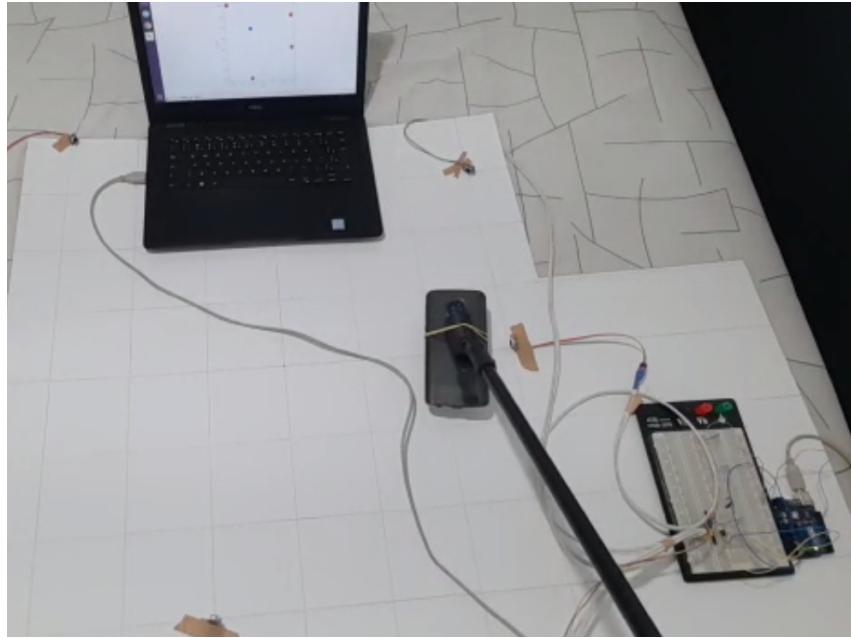


Figura 6: Plataforma de testes executando a solução pelo EBL em ambiente interno. O sinal transmitido inicialmente é ruído branco para mitigar efeitos de reverberação nos nós.

execução em ambiente interno. Na intenção de solucionar esse problema o experimento foi montado em ambiente externo e com cabos maiores.

Mesmo em ambiente externo, o sistema não gerou resultados bons. O processo de estimativa dos ganhos dos sensores não foi preciso o suficiente. Se realizado em ambiente interno, sofria com reverberação. Em ambiente externo, com ruído. Essa rotina deveria ser realizada, idealmente, em uma câmara anecoica. Além disso, o sistema implementado com Arduino operava sob taxa de amostragem baixíssima.

Os testes realizados no sistema de localização por EBL nos permitiram descartar esse método devido a sua altíssima sensibilidade à reverberação e necessidade de calibração precisa dos ganhos. Focamos nos métodos de localização por tempo para o produto final, pois são mais imunes aos problemas enfrentados com o método EBL.

3.2.2 Testes TOA

Para a plataforma de testes para o método TOA, foi utilizado um Arduino UNO com os mesmos microfones utilizados na montagem EBL, na configuração visualizada na figura 7.

O sistema foi montado utilizando o ADC do Arduino para monitorar os níveis de sinal de cada microfone. Quando o nível de cada microfone atinge um determinado limiar, é

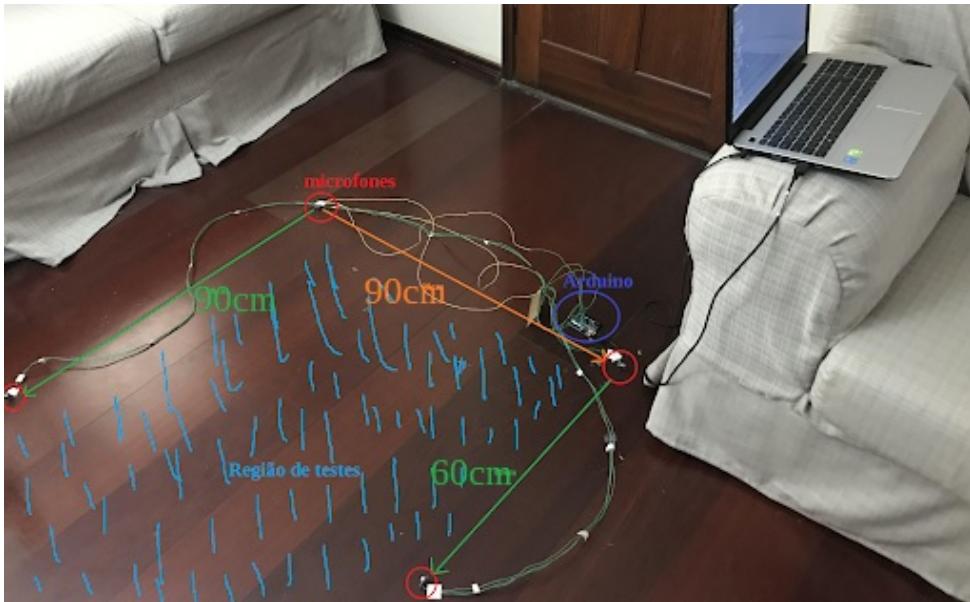


Figura 7: Montagem para testes TOA

registrado através de um *timer* para determinar o *Time of Arrival*. Então é elaborado o sistema linear de equações com as posições dos microfones e o *Time of Arrival* de cada microfone para o método TOA, conforme desenvolvido em 2.3.2.

O sistema possui três incógnitas e três equações, portanto é possível realizar a localização, de acordo com a linearização no método TOA estudado. Caso o sistema fosse montado com mais microfones, seria possível realizar a localização pelo método dos mínimos quadrados.

A taxa de amostragem do Arduino é limitada (9600Sps) e foi dividida a amostragem entre todos os 4 microfones, assim, a taxa de amostragem efetiva para cada microfone foi de 2400Sps . Considerando a velocidade do som no ar, com essa taxa de amostragem, o deslocamento da frente de onda é de $14\frac{\text{cm}}{\text{amostra}}$, assim, a precisão da localização é consideravelmente limitada pela baixa taxa de amostragem do Arduino.

Realizando testes sobre este sistema, foi possível observar o funcionamento da localização pelo método TOA e foi possível localizar a fonte sonora, porém com considerável erro.

A realização dos testes com TOA nos permitiu determinar que precisaríamos de uma plataforma com taxa de amostragem maior para o produto final, e que este método foi capaz de localizar a fonte sonora nas condições experimentais acima.

3.2.3 Testes TDOA

Para a plataforma de testes do TDOA foram utilizados microfones do mesmo modelo que aqueles do EBL, cabos de par trançado para transmitir o sinal do microfone e uma placa de desenvolvimento da STMicroelectronics (STM32F4-Discovery).

No microcontrolador configurou-se um timer para acionar o conversor analógico-digital (ADC) com uma frequência de 40 kHz. Ao ser acionado, o ADC amostra três canais, um para cada microfone, obtendo amostras de 12-bits (resolução de 0,73 mV/bit). A frequência do *clock* do ADC é muito maior que a frequência de seu timer de acionamento, assim, pode-se considerar que as amostras são tomadas no mesmo instante (o erro introduzido dessa forma, considerando a velocidade do som 340 m/s, é menor que um milímetro). As amostras obtidas pelo ADC são transferidas para um buffer que comporta até 60 mil amostras e essa transferência é feita por *direct memory access* (DMA), permitindo que o processador não seja interrompido durante a amostragem.

Com as amostras, determina-se o TOA de cada microfone por meio do cruzamento de limiar e então o TDOA é obtido pela diferença de TOAs. Além dessa abordagem, também implementou-se a obtenção dos TDOA por correlação cruzada dos sinais. O método de localização TDOA implementado foi de Foy pois funciona para qualquer número de microfones igual ou maior que três, e permite utilizar grandezas mistas (como TDOA e energia), converge rapidamente e não é exigente computacionalmente.

Como o método TDOA é mais resiliente à reverberação, o ambiente de teste escolhido era fechado, com cerca de cinco por cinco metros (figura 8). Os microfones tiveram seus ganhos calibrados utilizando uma fonte emitindo um sinal senoidal e, após calibração, o sistema foi testado com “pulsos” gerados com as mãos (palmas das mãos se batendo).

O método de Foy, por ser iterativo, poderia convergir, ou não, para uma solução numérica. No experimento montado, não se observou nenhum caso de divergência numérica, porém o sistema nunca acertou a posição da fonte quando usando cruzamento de limiar. Utilizando a correlação cruzada, o sistema convergiu algumas vezes para a fonte, mas ainda deixou muito a desejar. Observou-se predominantemente dois comportamentos de convergência diferentes:

- Após uma iteração o erro do método era grande (maior que 20) e sabido que a estimativa da fonte estaria fora do espaço do experimento, parava-se as iterações;
- O outro comportamento apresentava uma estimativa dentro do ambiente de 5 por 5 metros, porém a estimativa não correspondia com a posição da fonte sonora.



Figura 8: Plataforma de testes executando a solução pelo TDOA com método de Foy em ambiente interno

Antes de montar o experimento, o software embarcado foi depurado utilizando os dados do simulador e ambos apresentaram os mesmos resultados numéricos, validando a implementação do software embarcado. O cálculo do TDOA pelo limiar se mostrou ineficiente para um sistema real pois a matriz de TDOAs apresenta valores incondizentes para o ambiente.

Os testes realizados para TDOA nos permitiram determinar que deveríamos estimar os TDOA por correlação cruzada no produto final, e nos permitiram fundamentar as bases para implementação desse em uma plataforma mais adequada visto que a depuração e ciclo de desenvolvimento na plataforma embarcada foi muito mais demorado do que no projeto apresentado a seguir.

4 PROPOSTA

O projeto foi implementado utilizando um microcontrolador e um computador pessoal convencional¹. Os microcontroladores escolhidos para a tarefa foram da linha STM32 da STMicroelectronics. A placa utilizada principalmente foi a NUCLEO-F446RE². A escolha por esse hardware se deu principalmente pela alta taxa de amostragem obtida em seu ADC e por sua boa capacidade computacional, além da facilidade de desenvolvimento por meio da IDE (*integrated development environment*) do próprio fabricante.

O microcontrolador é conectado por meio de cabos devidamente blindados (para reduzir interferências) aos microfones. Os microfones são os mesmos apresentados na seção anterior. A Figura 5 ilustra essa parte do sistema. Essa implementação elimina a dificuldade de sincronismo entre os nós, que foge do escopo desse trabalho.

Esse sistema equivale a um *head-of-cluster* (HOC) (onde ocorre o processamento) com nós escravos (os microfones). Em desdobramentos futuros deste projeto, outros HOCs seriam implementados e uma rede parcialmente distribuída seria feita pela comunicação entre os diversos HOCs.

4.1 Configuração do hardware

O hardware foi configurado de forma a fixar taxa de amostragem de cada microfone em 16 kHz. Um vetor de amostras de cada sensor é coletado e transmitido ao computador, onde o processamento dos sinais é realizado para chegar à solução.

A configuração da taxa de amostragem do ADC é feita por meio do *trigger* de um *timer*. A transferência de amostras do ADC para a memória do microcontrolador é implementada por DMA (*direct memory access*), evitando a ocupação da CPU com essa tarefa. Cada sequência de amostragem dos microfones só é iniciada após a recepção de um caractere,

¹Modelo Dell Vostro 3480.

²https://www.st.com/content/st_com/en/products/evaluation-tools/product-evaluation-tools/mcu-mpu-eval-tools/stm32-mcu-mpu-eval-tools/stm32-nucleo-boards/nucleo-f446re.html, acesso em 4 de dezembro de 2020.

enviado pelo computador por comunicação serial, “disparando” as amostragens. Assim que o número desejado de amostras de cada canal é coletado, essas são enviadas para o computador, também por serial. A figura 9 ilustra essa configuração.

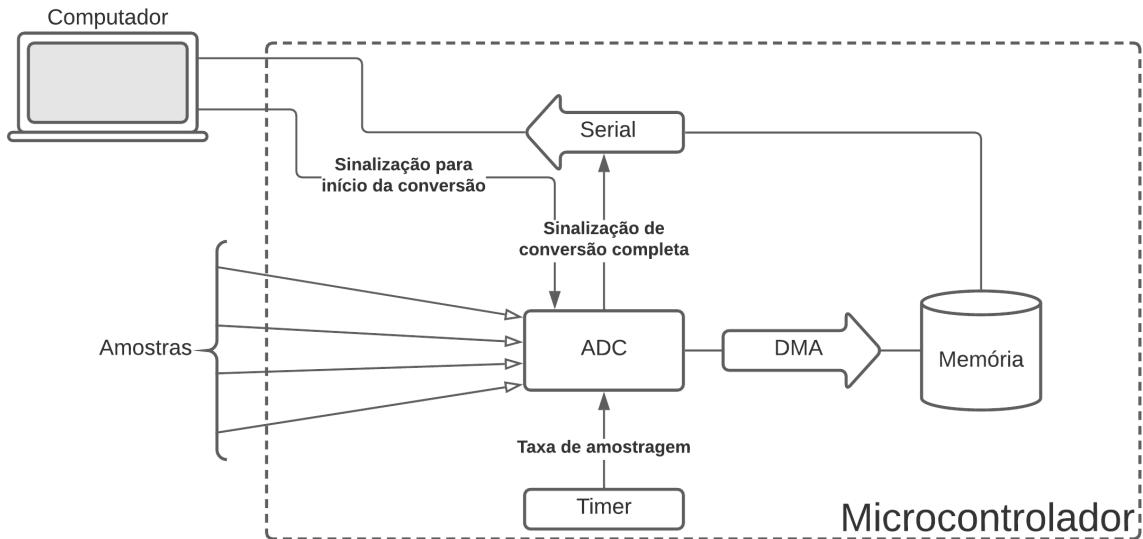


Figura 9: Ilustração da configuração do hardware.

4.2 Implementação em software

Foi desenvolvida uma aplicação, executada no computador, responsável por

- sinalizar para o microcontrolador o início das conversões analógico-digitais dos sinais dos microfones;
- receber por comunicação serial as amostras dos microfones;
- plotar o sinal captado por cada um dos microfones, bem como uma ilustração da topologia da rede de sensores;
- executar os métodos de localização da fonte, e plotar a estimativa de cada um,
- salvar as gravações e os resultados da execução.

A Figura 10 ilustra uma tela típica dessa aplicação.

Na aplicação, os métodos TOA, TDOA por método de Chan [15] e TDOA pelo método de Foy [16] foram desenvolvidos e podem ser executados. Foi implementada uma formulação alternativa do método TOA além da formulação já apresentada. Chamamos

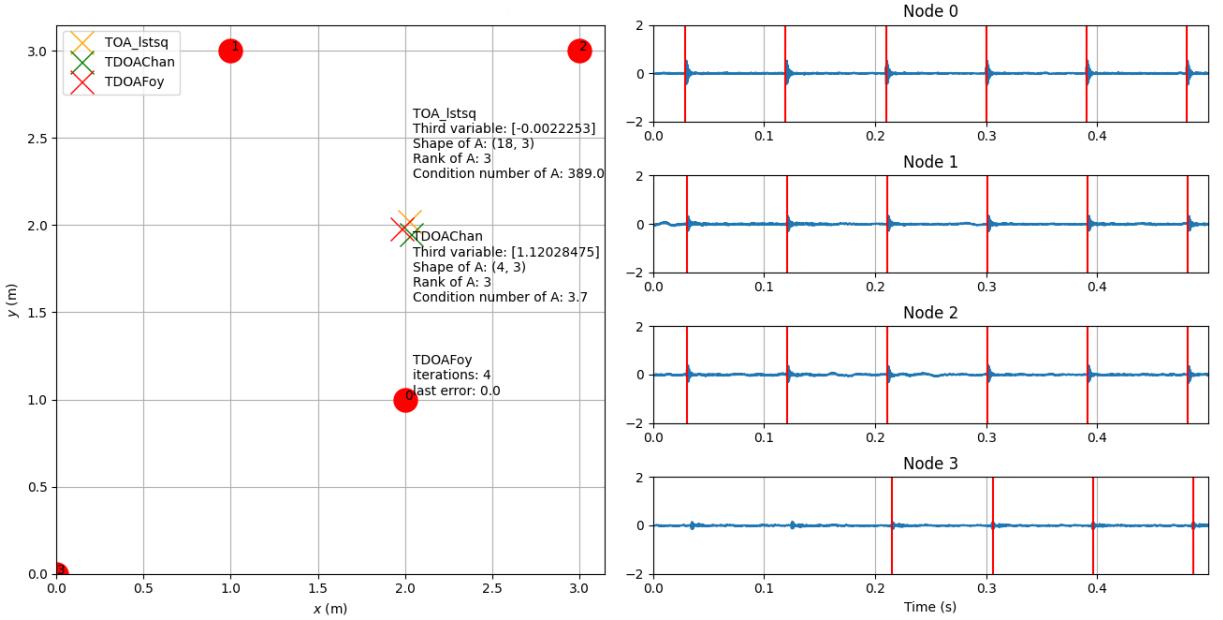


Figura 10: Exemplo de tela da aplicação de localização de fontes. No quadro à esquerda é representada a posição dos nós. Cada nó é identificado por um círculo vermelho, com seu índice escrito em cima. Estimativas de posição da fonte pelos métodos são marcadas nesse mapa, cada método com uma cruz de cor diferente. Informações adicionais relevantes sobre cada método são escritas à direita desse mapa. Na metade da direita da figura, é representado o sinal recebido por cada nó da rede. As barras vermelhas indicam cruzamentos do limiar configurado para o método TOA. Note que o nó três possui menos cruzamentos de limiar que os outros visto que está mais distante e assim o sinal captado é mais atenuado pelo meio de propagação (ar).

essa versão de TOA GCC. Essa variação estima as diferenças de tempo de chegada presentes na equação 2.7 por meio da correlação entre os sinais. A cada execução, pode-se selecionar quais métodos serão executados. Para cada método escolhido, pode-se também escolher qual será o método de solução do sistema linear gerado, como explicado na seção 4.2.1 a seguir.

Para melhorar a precisão das soluções, cada trecho de gravação era particionado em diversos *frames* (trechos de igual duração). De cada *frame* se obtém o conjunto de medidas que gera um sistema linear. Os sistemas de todos os *frames* eram agregados em um sistema linear de maior dimensão para melhorar a aproximação.

4.2.1 Solução de sistemas lineares

Com exceção do método TDOA de Foy, todos os métodos implementados geram um sistema linear de equações que deve ser resolvido numericamente.

A solução desse sistema foi implementada pelo método tradicional de mínimos qua-

drados, usando decomposição QR, e por soluções com filtros adaptativos. Os algoritmos adaptativos utilizados foram NLMS (*normalized least mean squares*) e RLS (*recursive least squares*). Utilizou-se uma abordagem para combinar a solução de diversos filtros adaptativos (FAs), sobre um mesmo sistema de equações, que denominamos de *cluster* de filtros. Um *cluster* de filtros é um grupo de filtros, cada um com uma inicialização distinta, cujas soluções são combinadas como a média ponderada pelo inverso do erro quadrático de cada um para gerar a solução final. Os parâmetros dos FAs, tal como o passo de cálculo (NLMS) e o fator de esquecimento (RLS) foram os mesmos para cada filtro dentro do cluster, mas em implementações futuras podem ser refinados em cada filtro, visando melhoria de desempenho. Nos testes, cada filtro no cluster era inicializado com uma solução inicial aleatória dentro da área cercada pelos nós da rede.

5 RESULTADOS

Para permitir uma análise mais aprofundada do problema de localização a ser resolvido, foi desenvolvido um sistema padronizado para realização de teste. A partir dos ensaios realizados foi possível determinar quais dos métodos utilizados apresentam os melhores resultados e quais condições ambientais mais degradam a solução. Essa seção tem o objetivo de apresentar os resultados dos testes quantitativos realizados. Uma conclusão acerca desses é apresentada no Capítulo 6.

O sinal emitido na fonte também sofreu variações. Além de analisar pulsos emitidos pela fonte, também foi analisado o caso onde o sinal emitido era um sinal de música, ou um sinal de voz.

Também foi avaliado o efeito de adicionar mais microfones ao sistema, e diversas posições de fonte de sinal.

5.1 Condições ambientais

Algumas condições ambientais têm grande influência na qualidade da estimação do sistema. Aqui elas são discutidas, antes de apresentar resultados no cenário mais favorável, o qual mostra resultados satisfatórios.

5.1.1 Ambiente interno

Os primeiros testes do sistema foram realizados em ambiente interno, apesar do objetivo final ser um sistema operante em ambiente externo por dois motivos. Primeiramente pela comodidade de se realizar os testes com agilidade durante o desenvolvimento, e segundo para validar o sistema sob condições mais severas.

Os métodos de localização funcionando sobre sinais capturados em ensaios em ambientes internos apresentaram desempenho pior em relação aos sinais capturados em ambientes externos.

O principal desafio ao realizar uma localização em ambiente interno é a presença de reverberação sobre o sinal capturado, que impede o funcionamento adequado dos métodos estudados. A figura 11 compara o sinal originalmente transmitido com o sinal com reverberação. Esse fenômeno atrapalha muito o funcionamento de todos os métodos de localização estudados e atrasou o desenvolvimento do projeto. A solução dessa dificuldade é, por si só, complexa e um possível tema de continuação desse trabalho.

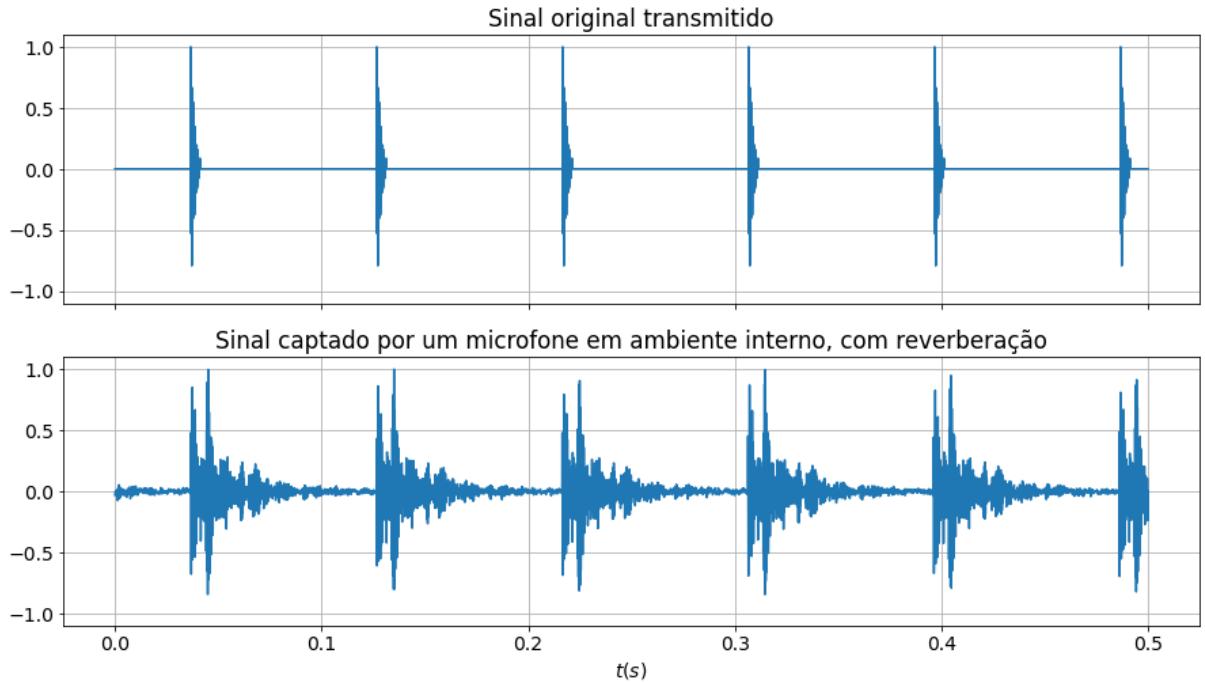


Figura 11: Comparação do sinal transmitido e o sinal captado por um nó, poluído por reverberação do ambiente interno.

5.1.2 Vento

A presença de vento soma aos sinais amostrados um sinal espúrio difícil de ser filtrado, tornando a implementação do sistema em ambientes com muito vento impraticável, sendo mais um tema interessante para a continuação desse trabalho. A Figura 12 evidencia isso.

5.1.3 Ruído

Na presença de ruído de fundo de potência relativamente baixa, a performance do sistema foi um pouco degradada, mas os métodos de TDOA de Foy e TDOA de Chan ainda apresentaram grande robustez à situação. A Figura 13 mostra um sinal com ruído ambiente, proveniente de um cortador de grama.

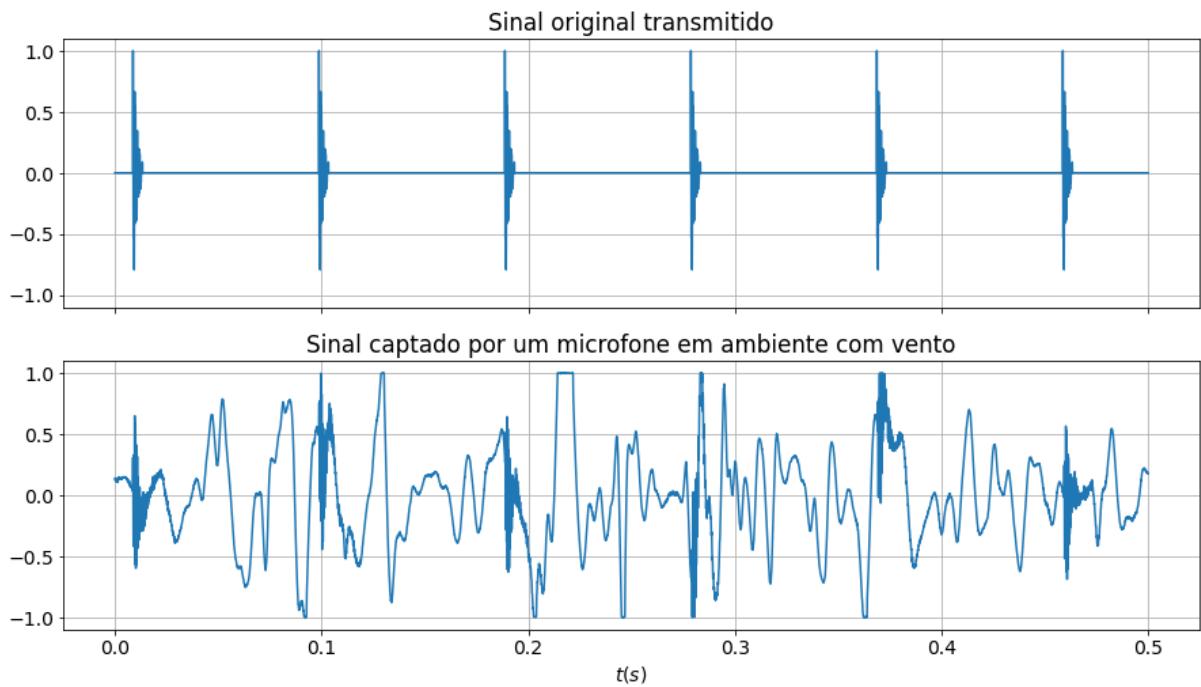


Figura 12: Comparação do sinal transmitido e o sinal captado por um nó, poluído por vento.

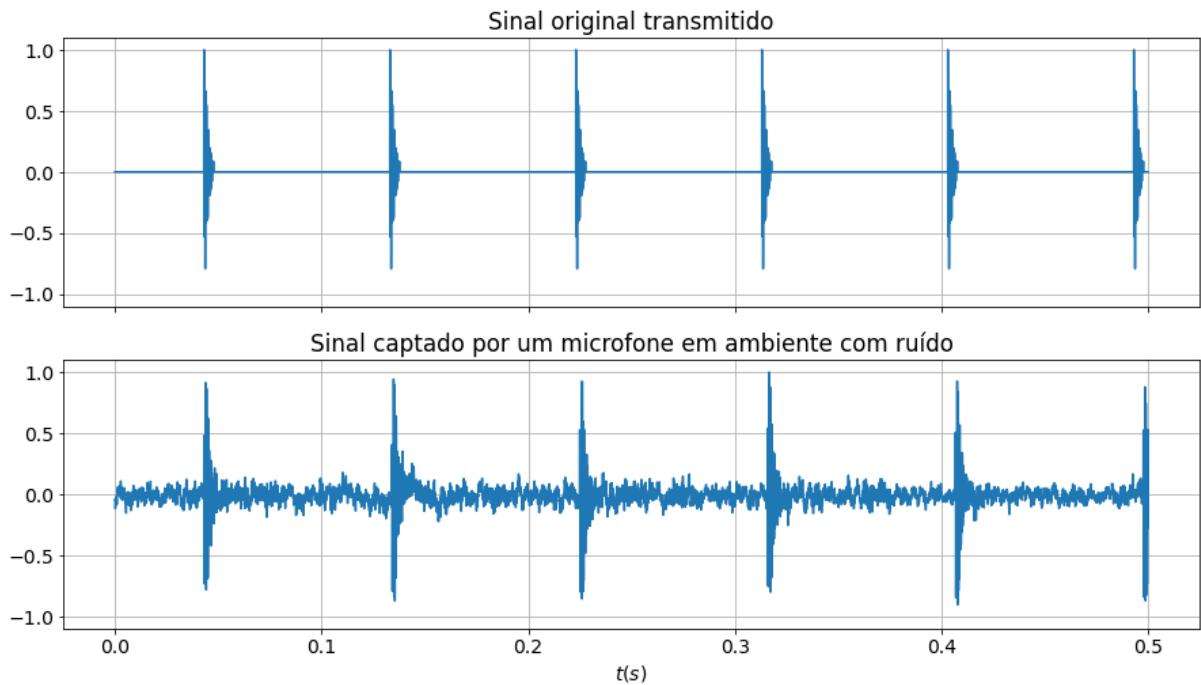


Figura 13: Comparação do sinal transmitido e o sinal captado por um nó, poluído pelo ruído de um cortador de grama nas redondezas da montagem experimental.

5.1.4 Ambiente externo

Em ambiente externo, livre de reverberação considerável, com pouco vento e pouco ruído, os métodos de localização implementados têm boa precisão. Como era de se esperar,

esse ambiente é o mais favorável para o funcionamento do sistema. Os resultados da Seção 5.2, a seguir, referem-se a tais condições. A Figura 14 mostra um sinal captado nessas condições e a Figura 15 traz uma foto do sistema com quatro microfones utilizado para captura dos sinais.

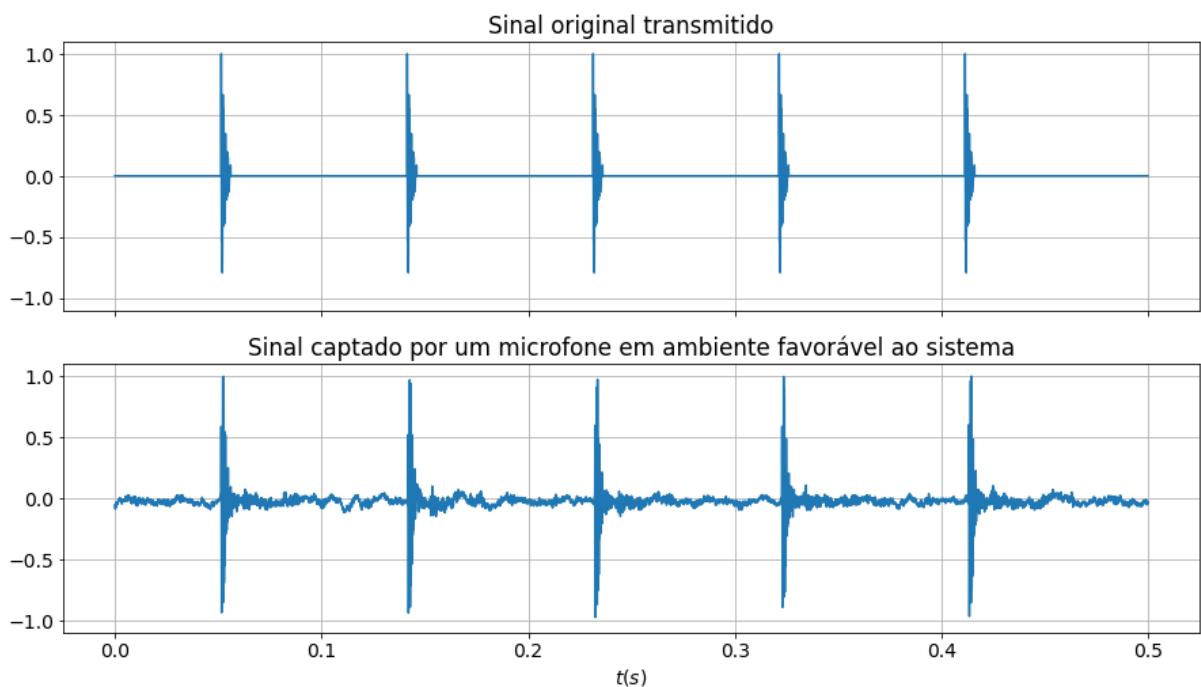


Figura 14: Comparação do sinal transmitido e o sinal captado por um nó em ambiente externo com pouca reverberação, ruído e vento.

5.2 Resultados

Uma vez determinado que o ambiente externo com pouco ruído e efeitos do vento é a condição adequada para o sistema funcionar, foram realizados testes comparando métodos de solução, com diferentes sinais e topologias da rede. Esses são aqui apresentados.

Nas tabelas fornecidas, o erro é apresentado como $\bar{e} \pm \sigma_e$, onde \bar{e} é o erro médio das localizações e σ_e o desvio padrão.¹ É fornecido juntamente o número de soluções que gerou essas estatísticas, uma vez que os algoritmos podem divergir, ou não conseguir a quantidade de dados necessária para calcular uma estimativa, dependendo da natureza dos sinais. Um dos algoritmos pode, portanto, gerar soluções menos frequentemente que outro, e isso se torna também uma possível métrica de desempenho.

¹Nos casos em que só é gerada uma solução, não estão definidos, obviamente, nem média, nem desvio padrão.



Figura 15: Foto de um sistema com 4 microfones sendo testado em ambiente externo, com pouca reverberação, ruído e vento. Os microfones e a fonte de sinais são acoplados a tripés, a cerca de 1,5 m do chão. Os retângulos vermelhos são posições com microfones (um deles atrás do computador), e fonte se encontra próxima ao centro. A implementação é como detalhada no capítulo 4.

Nas figuras apresentadas, os nós da rede são apresentados em círculos vermelhos e a posição real da fonte como um X preto. A estimativa média de posição de cada método é apresentada. Essa é cercada por uma elipse cujos semieixos em cada direção (x ou y) representam o desvio padrão das soluções naquela direção.

Erros de localização muito pequenos poderiam ser atribuídos também a imprecisões experimentais nas medidas de posição dos nós e da fonte.

5.2.1 Comparação dos métodos

Esses testes têm por objetivo analisar o desempenho de cada um dos métodos implementados operando sobre três tipos diferentes de sinais: o sinal de pulsos, música e um sinal de voz². O sinal de pulsos utilizado é uma sequência de repetições do sinal apresentado na figura 16.

Os sistemas lineares são solucionados sempre pelo método dos mínimos quadrados, que como mencionado na seção 4.2.1 é implementado com decomposição QR. A posição da fonte é sempre a mesma.

²Base de sinais de voz BRSpeechCorpus, desenvolvida e distribuída pelo Laboratório de Processamento de Sinais Acústicos (LASP) do Instituto Militar de Engenharia (IME). Disponível em <http://lasp.ime.eb.br/index.php?vPage=downloads>, acesso em 6 de dezembro de 2020.

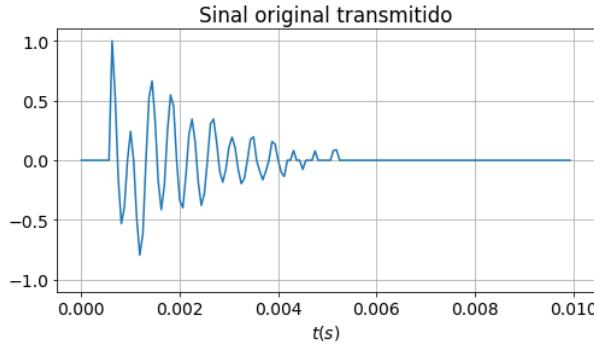


Figura 16: Sinal de pulso sintetizado para uso nos testes.

A tabela 5 e as figuras 17, 18 e 19 apresentam resultados.

Método	Pulsos		Música		Voz	
	Erro (m)	Número de soluções	Erro (m)	Número de soluções	Erro (m)	Número de soluções
TDOA Chan	0,53 ± 2,05	20	0,13 ± 0,23	20	101,66 ± 231,23	21
TDOA Foy	0,12 ± 0,09	20	0,33 ± 0,50	20	0,51 ± 0,52	16
TOA GCC	0,61 ± 0,47	20	0,16 ± 0,20	20	0,81 ± 0,71	21
TOA lstsq	0,08 ± 0,07	19	0,53 ± –	1	0,65 ± –	1

Tabela 5: Comparação dos métodos de localização. Calculado sobre 20 gravações de 0,5 s. Resultados podem ser visualizados nas figuras 17, 18 e 19. Observamos divergência para o método TDOA de Chan calculado sobre voz.

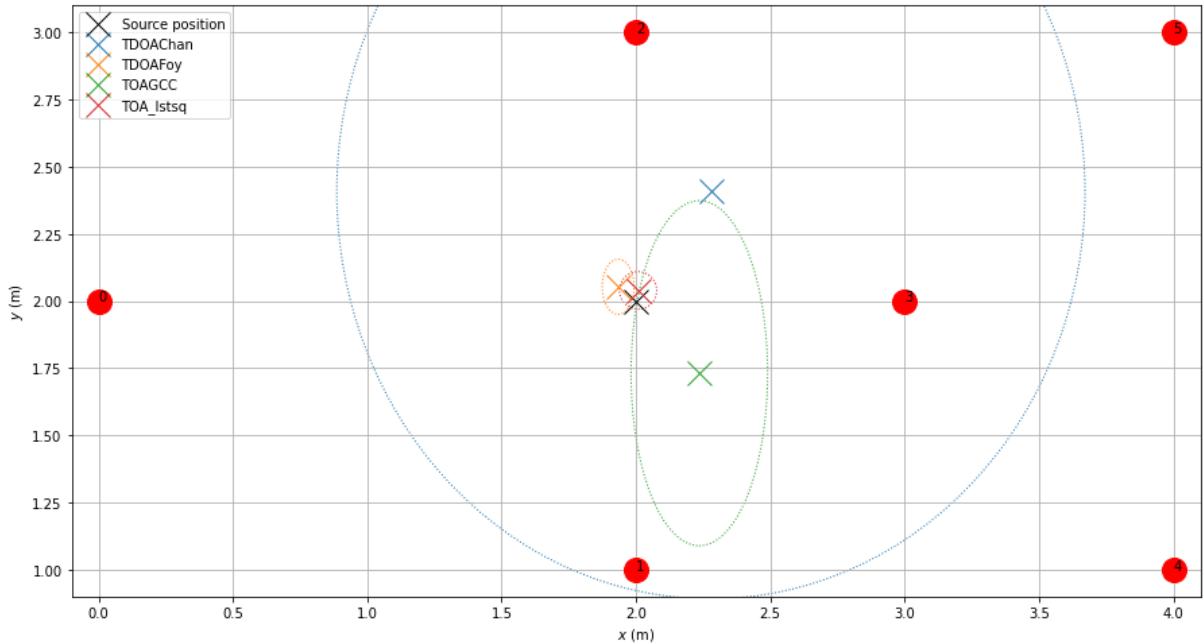


Figura 17: Comparação dos métodos com sinal de pulsos. A rede contava com 6 nós.

Observamos, com o sinal de pulsos, um melhor funcionamento do TOA e do TDOA de Foy, como visualizado na figura 17, que mostra suas estimativas na média próximas da localização real, e com desvio padrão baixo.

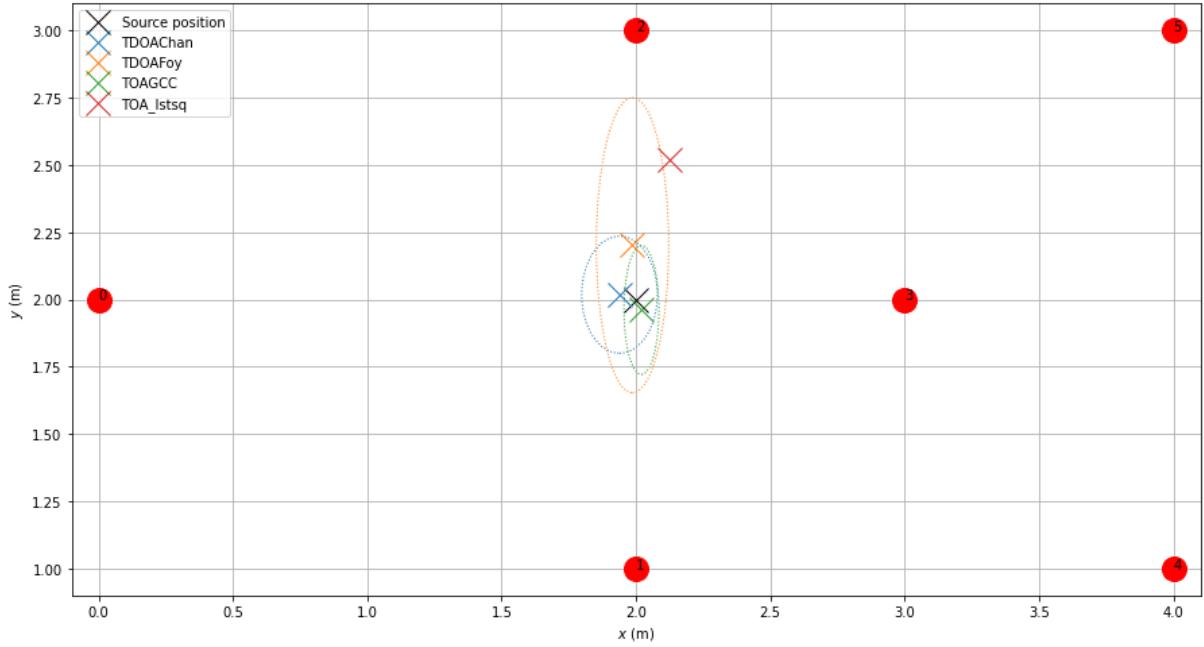


Figura 18: Comparação dos métodos com sinal de música. A rede contava com 6 nós.

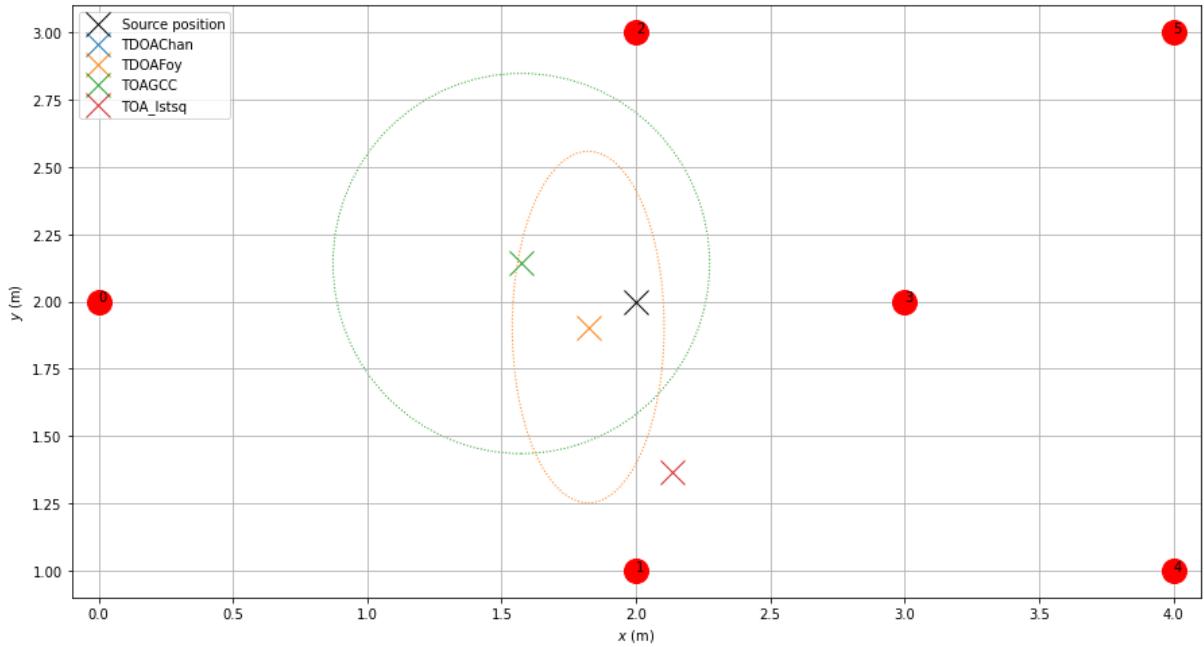


Figura 19: Comparação dos métodos com sinal de voz. A rede contava com 6 nós.

Com sinal de música, o TOA GCC e TDOA de Chan desempenham melhor (figura 18). Ambos são baseados na correlação, que é nitidamente obtida sobre sinais de música.

Com o sinal de voz, o desempenho de todos os métodos é pior, mas o mais aceitável é o do TDOA de Foy (vide figura 19). O mal desempenho se dá por algumas características naturais do sinal de voz, como sua intermitência (no sentido de que tem muitos momentos de “silêncio”). Uma estratégia prática para melhorar precisão sob essa condição seria não

realizar localizações quando a energia do sinal estiver abaixo de um certo limiar.

Vale ressaltar a dificuldade de operação do TOA sobre sinais diferentes da sequência de pulsos, por conta da dificuldade de identificação de cruzamentos do limiar.

5.2.2 Comparação dos algoritmos de solução do sistema linear

Esses testes buscam comparar o desempenho dos métodos de solução de sistemas lineares discutidos na seção 4.2.1. O único método executado é o TOA. A posição da fonte é sempre a mesma. O sinal usado é a sequência de pulsos.

Os métodos de solução de sistemas lineares executados são: método dos mínimos quadrados (QR com pivoteamento parcial), filtro RLS, filtro NLMS e cluster com 8 filtros NLMS.

A tabela 6 e a figura 20 apresentam resultados.

Método	Erro (m)	Número de soluções
TOA lstsq	$0,08 \pm 0,07$	19
TOA nlms	$0,14 \pm 0,07$	19
TOA nlms cluster	$0,09 \pm 0,03$	19
TOA rls	$0,08 \pm 0,07$	19

Tabela 6: Comparação dos métodos de solução de sistema linear. Calculado sobre 20 gravações de 0,5 s. Resultados podem ser visualizados na figura 20.

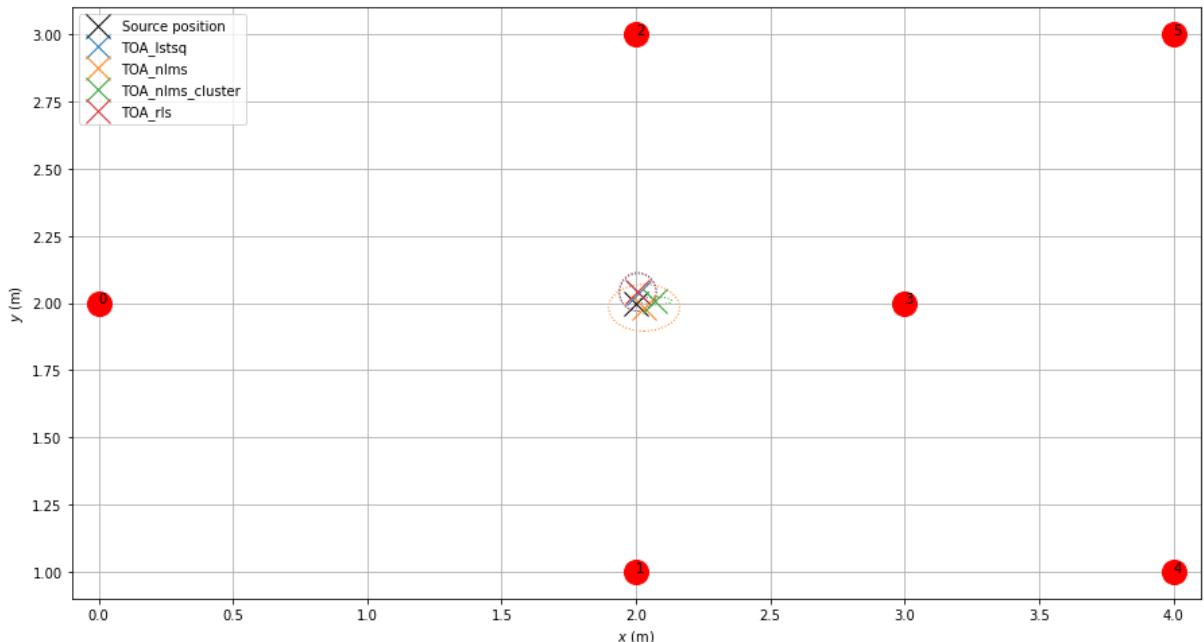


Figura 20: Comparação dos métodos de solução de sistema linear. O sinal de pulsos foi usado. A rede contava com 6 nós.

Observa-se um desempenho muito parecido para todos os métodos de solução de sistema linear, mas o que se mostrou mais interessante foi o cluster de filtros NLMS por conta da baixa variância da solução.

5.2.3 Efeito da posição da fonte

Nesses testes buscamos avaliar como a solução localiza uma fonte em diferentes posições. O sinal transmitido foi sempre a sequência de pulsos e os métodos comparados são os mesmos da seção 5.2.1. Os resultados são apresentados na tabela 7 e Figuras 21, 22 e 23.

Método	Posição 1		Posição 2		Posição 3	
	Erro (m)	Número de soluções	Erro (m)	Número de soluções	Erro (m)	Número de soluções
TDOAChan	0,53 ± 2,05	20	2,57 ± 6,02	20	3,27 ± 3,86	20
TDOAFoy	0,12 ± 0,09	20	0,16 ± 0,02	20	0,43 ± 0,02	20
TOA_lstsq	0,08 ± 0,07	19	0,22 ± 0,25	19	0,24 ± 0,07	11

Tabela 7: Comparação da solução dependendo da posição da fonte. Calculado sobre 20 gravações de 0,5 s. Resultados podem ser visualizados nas figuras 21, 22 e 23.

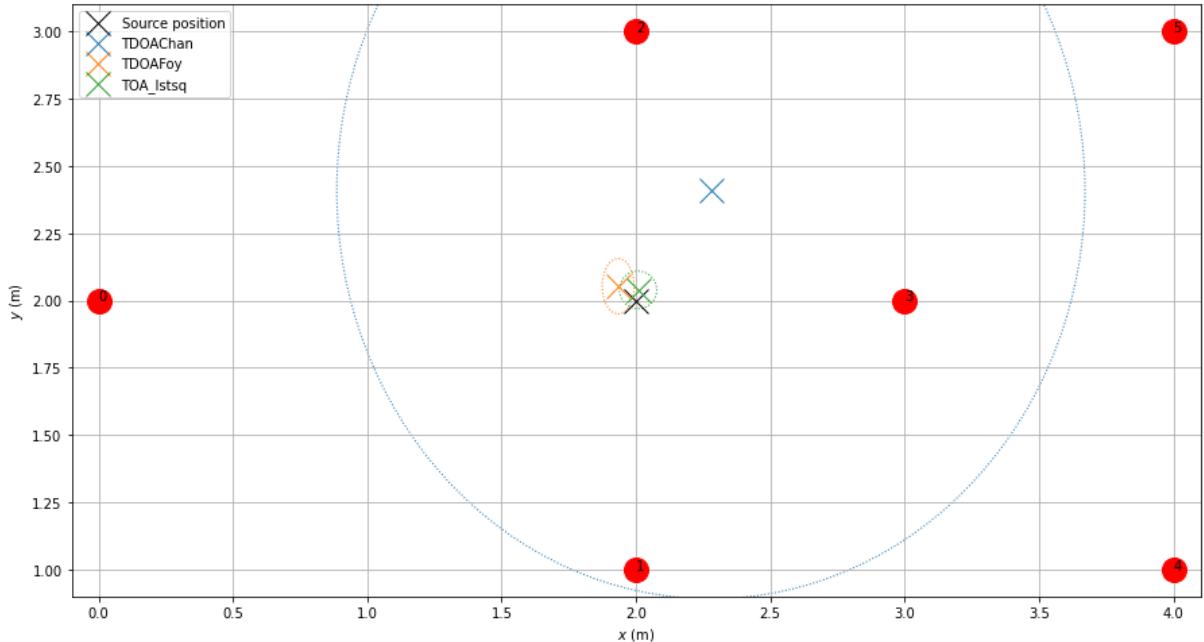


Figura 21: Comparação do efeito da posição da fonte. O sinal de pulsos foi usado. A rede contava com 6 nós.

Observamos que a fonte é identificada com maior precisão quando está mais próxima dos nós, e inserida no perímetro descrito por eles.

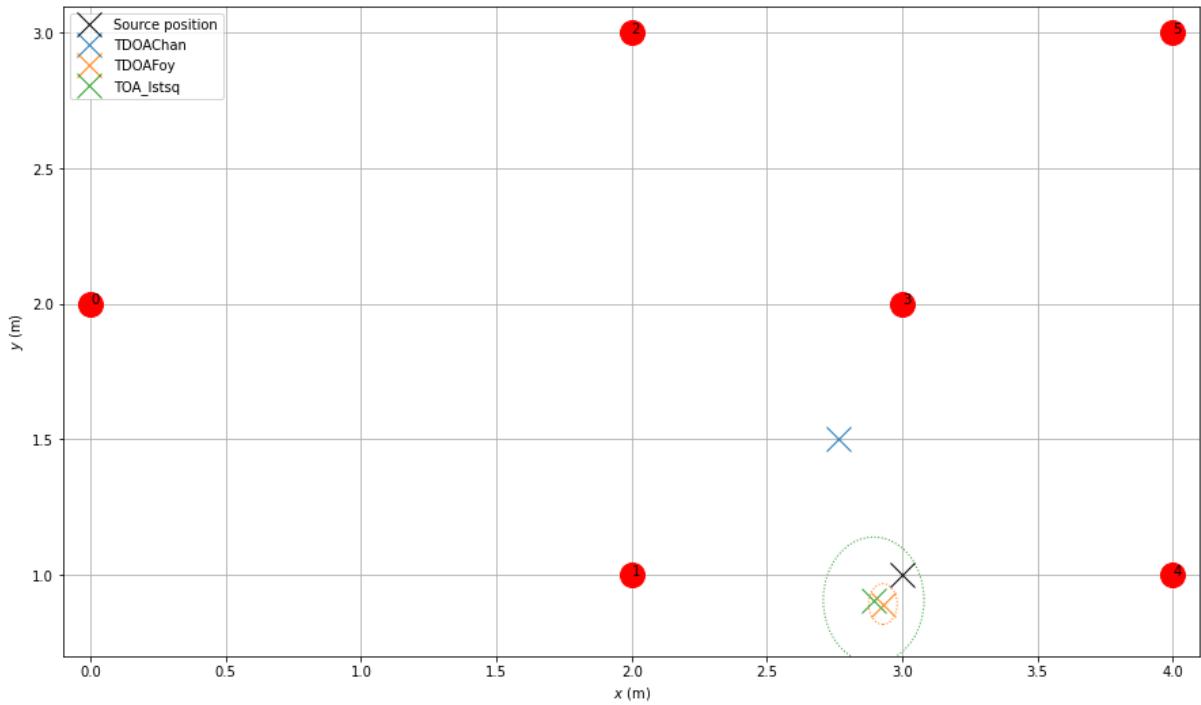


Figura 22: Comparação do efeito da posição da fonte. O sinal de pulsos foi usado. A rede contava com 6 nós.

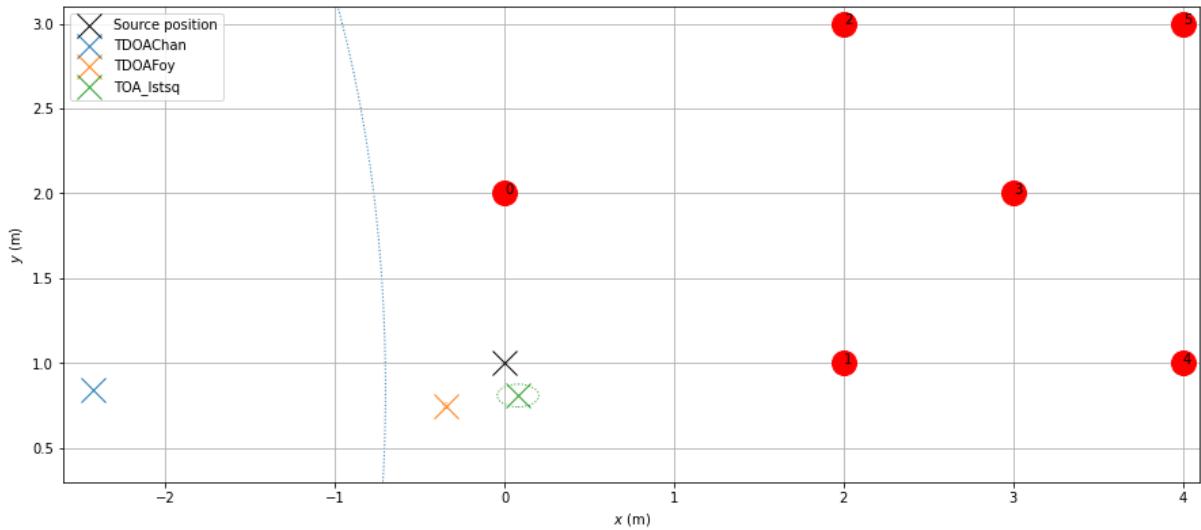


Figura 23: Comparação do efeito da posição da fonte. O sinal de pulsos foi usado. A rede contava com 6 nós.

5.2.4 Efeito do número de nós

Os testes apresentados nessa seção têm o objetivo de analisar como a solução se comporta dependendo do número de nós utilizado. São utilizados 4, 5 e 6 nós. A fonte foi colocada em duas possíveis posições. O sinal transmitido foi a sequência de pulsos. Os métodos utilizados foram os mesmos da Seção 5.2.1.

Os resultados para a fonte na primeira posição podem ser visualizados na tabela 8 e nas figuras 24, 25 e 26. Os resultados para a fonte na segunda posição, na tabela 9 e figuras 27, 28 e 29.

Método	4 nós		5 nós		6 nós	
	Erro (m)	Número de soluções	Erro (m)	Número de soluções	Erro (m)	Número de soluções
TDOAChan	$0,12 \pm 0,00$	20	$0,11 \pm 0,00$	20	$0,53 \pm 2,05$	20
TDOAFoy	$0,12 \pm 0,00$	20	$0,09 \pm 0,00$	20	$0,12 \pm 0,09$	20
TOA lstsq	$0,10 \pm 0,02$	19	$0,1 \pm 0,02$	19	$0,08 \pm 0,07$	19

Tabela 8: Efeito do número de nós na rede. Calculado sobre 20 gravações de 0,5 s. Resultados podem ser visualizados nas figuras 24, 25 e 26.

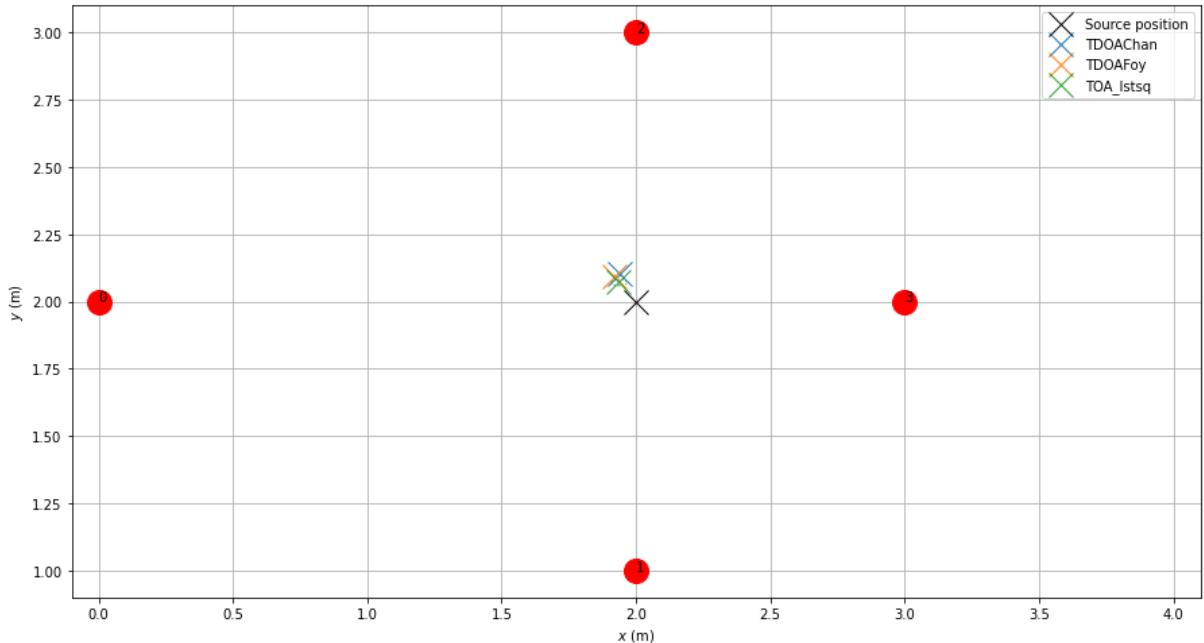


Figura 24: Comparação do efeito do número de nós. O sinal de pulsos foi usado. A rede contava com 4 nós.

Método	4 nós		5 nós		6 nós	
	Erro (m)	Número de soluções	Erro (m)	Número de soluções	Erro (m)	Número de soluções
TDOAChan	$2,1 \pm 5,95$	20	$2,31 \pm 6,80$	20	$2,57 \pm 6,02$	20
TDOAFoy	$0,51 \pm 0,00$	20	$0,38 \pm 0,06$	20	$0,16 \pm 0,02$	20
TOA lstsq	$0,46 \pm 0,08$	20	$0,23 \pm 0,42$	20	$0,22 \pm 0,25$	19

Tabela 9: Efeito do número de nós na rede. Calculado sobre 20 gravações de 0,5 s. Resultados podem ser visualizados nas figuras 27, 28 e 29.

Esses testes evidenciaram a relevância do número de nós da rede especialmente quando esses se aproximam mais da posição da fonte, levando à conclusão que uma rede operaria melhor se pudesse ter mais nós, o mais dispersos o possível, mas descartar medidas imprecisas que seriam advindas de nós muito distantes da fonte. Obviamente num sistema real não se conhece a posição da fonte, então a conclusão a respeito de quais nós têm medidas

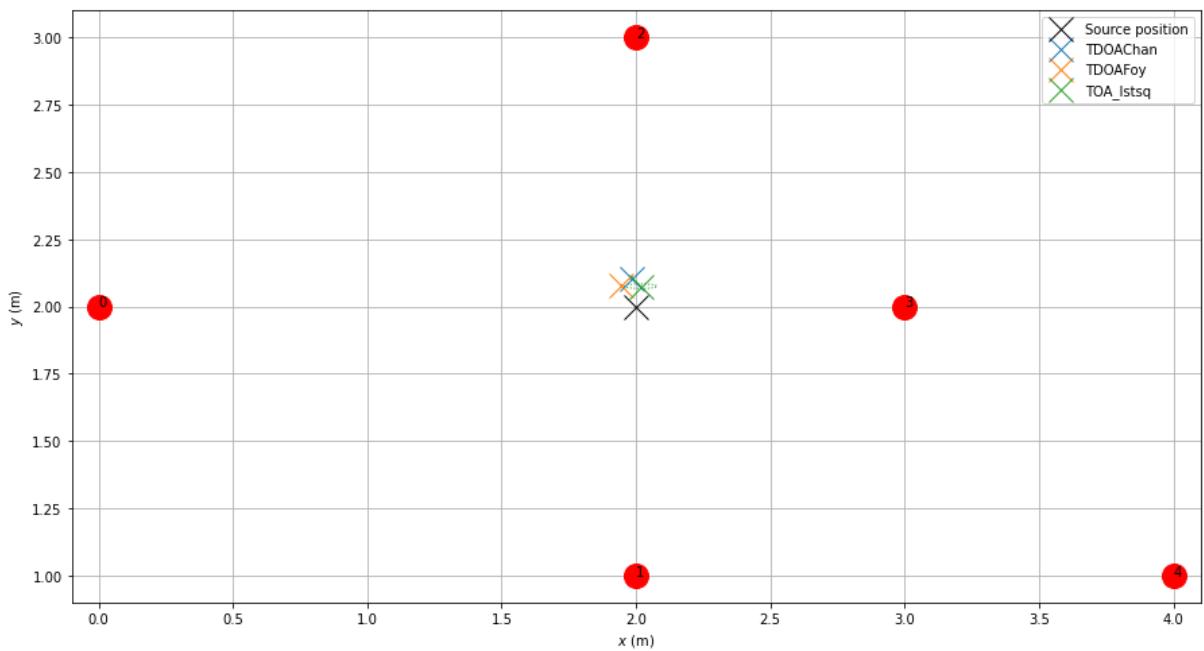


Figura 25: Comparação do efeito do número de nós. O sinal de pulsos foi usado. A rede contava com 5 nós.

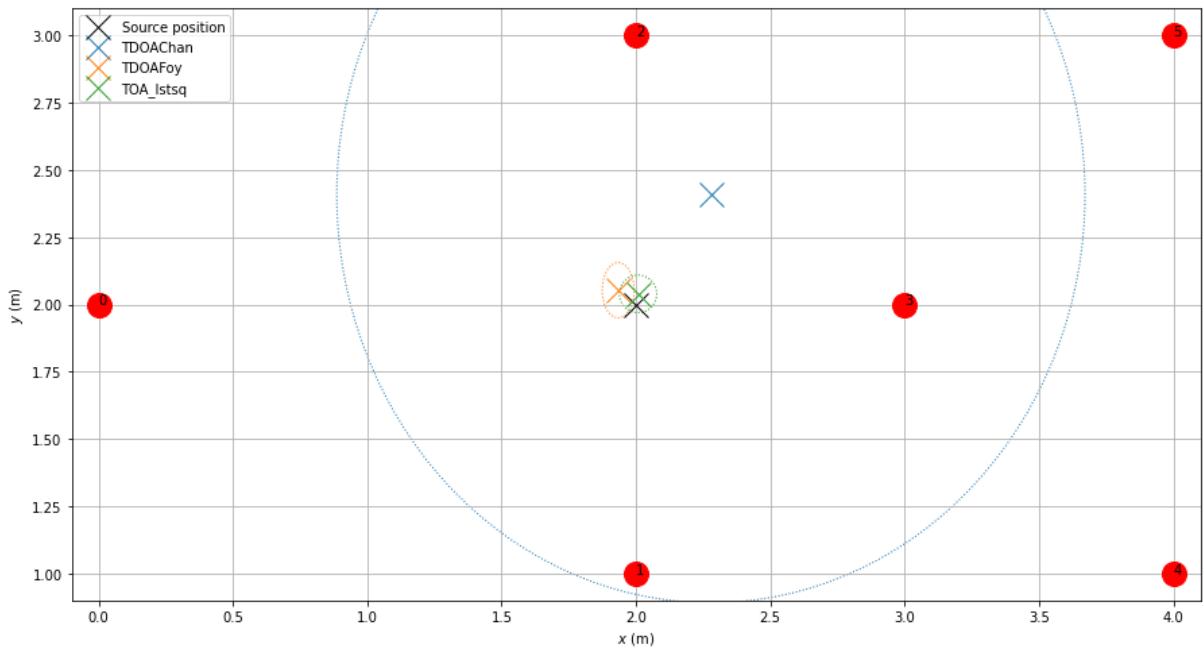


Figura 26: Comparação do efeito do número de nós. O sinal de pulsos foi usado. A rede contava com 6 nós.

“ruins” por estarem mais longe da fonte deve ser feita usando atributos dos sinais, como sua energia.

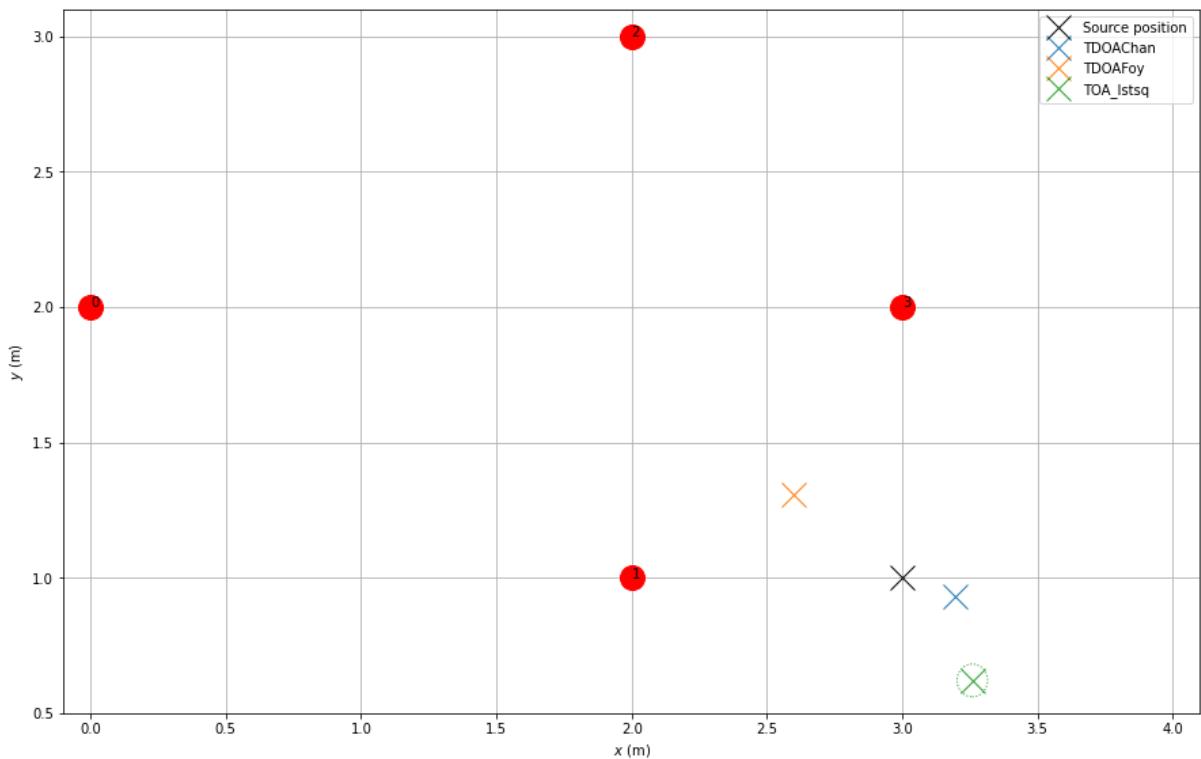


Figura 27: Comparação do efeito do número de nós. O sinal de pulsos foi usado. A rede contava com 4 nós.

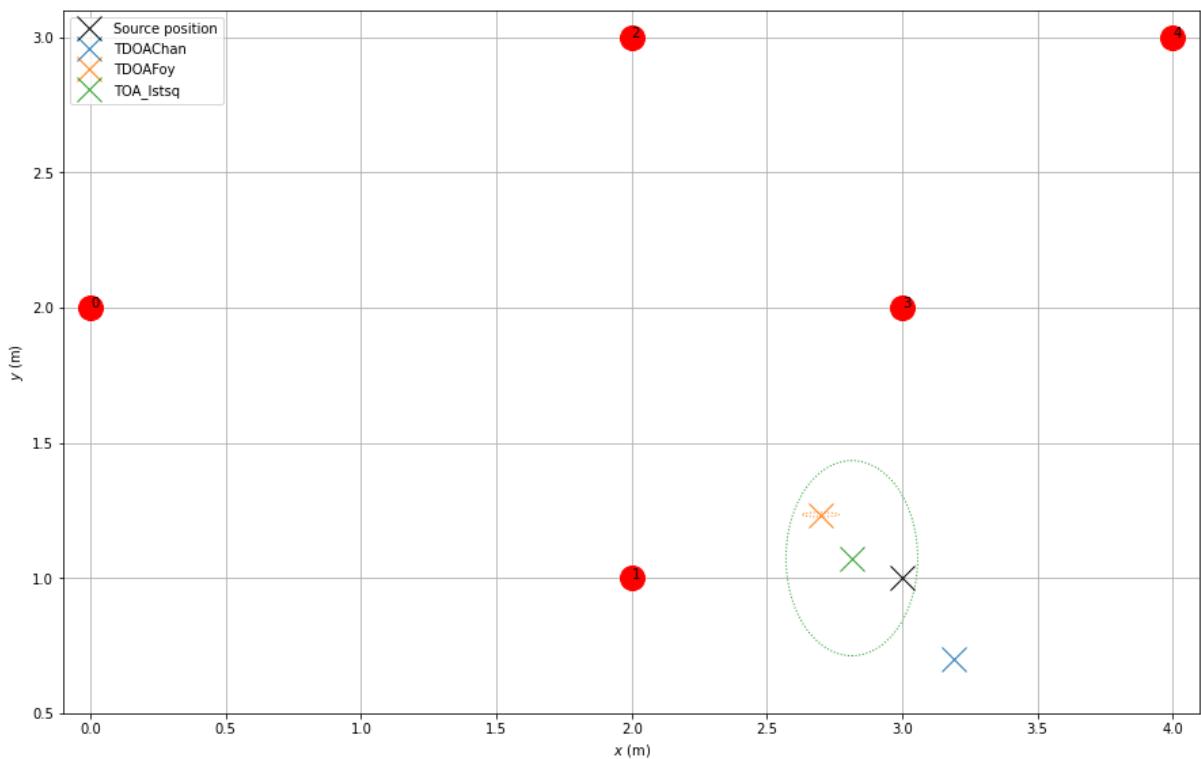


Figura 28: Comparação do efeito do número de nós. O sinal de pulsos foi usado. A rede contava com 5 nós.

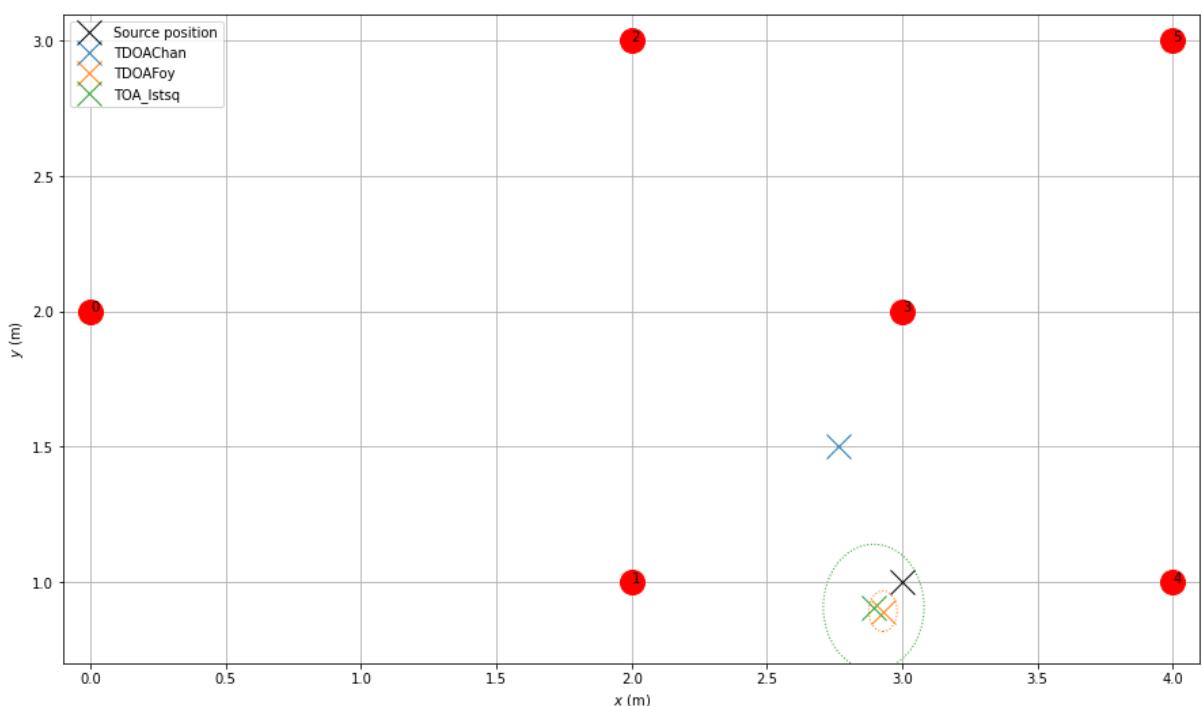


Figura 29: Comparação do efeito do número de nós. O sinal de pulsos foi usado. A rede contava com 6 nós.

6 CONCLUSÃO

Esse trabalho se apresentou como um desafio completo na área de sistemas eletrônicos, envolvendo processamento de sinais, hardware e software. O salto do estudo dos algoritmos e suas simulações para a implementação em um sistema físico trouxe muitas dificuldades que tiveram que ser superadas e desaceleraram o desenvolvimento do produto, dentre elas, principalmente, a degradação das medidas pela reverberação e as limitações dos sistemas embarcados de menor porte. Ainda assim, esse projeto se conclui com resultados muito satisfatórios na localização sob condições favoráveis, e com uma comparação extensa da aplicabilidade de diferentes algoritmos, tornando-se assim o primeiro passo no desenvolvimento de sistemas mais aplicados e focados, por exemplo um sistema de *structural health monitoring* apresentado como uma motivação na seção 1.2, que se caracterizaria como inovação tecnológica na indústria nacional. As limitações (falta de acesso a laboratórios, bibliotecas e reuniões de equipe) impostas pela pandemia de COVID-19 e o consequente isolamento social dificultaram, mas não impediram a conclusão do projeto com sucesso.

6.1 Análise dos resultados

Os resultados apresentados no capítulo Resultados mostram o algoritmo TDOA de Foy como o método mais robusto para a solução do problema, no sentido de apresentar resultados consistentes ao longo de todos os testes, demonstrando a maior independência do sinal de entrada e da topologia da rede. Nos casos em que o sinal a ser localizado tem natureza conhecida a priori, pode ser mais vantajoso fazer uso do método TOA, com um ajuste cuidadoso do limiar. O sistema de equações gerado por esse método pode ser solucionado por método dos mínimos quadrados. Foi demonstrada também a solução com a técnica desenvolvida de cluster de filtros adaptativos, que pode apresentar vantagens sobre o método de mínimos quadrados, principalmente nos casos de sistemas muito mal condicionados, ou quando a fonte se move. Esse último ponto também abre portas para estudos futuros sobre a associação de algoritmos adaptativos executados em paralelo.

6.2 Próximos passos

O projeto traz alguns próximos passos naturais no desenvolvimento dessa pesquisa. Três possíveis encaminhamentos são mais diretos:

1. Estudo do problema da reverberação para aplicação *indoor*.

O problema encontrado nos testes em ambiente fechado foi a reverberação. Estudos para reduzir o impacto desse fenômeno poderiam ser conduzidos para tornar o sistema aplicável a ambientes internos.

2. Foco em uma aplicação.

O sistema poderia ser incrementado e mais especificado para uma certa aplicação, dentre as várias listadas na apresentação do projeto. Nessa situação, os resultados indicam que seria possível atingir soluções consistentemente melhores por meio da escolha e ajuste do algoritmo mais adequado.

3. Tornar o sistema *wireless*.

Como já discutidas antes, WASNs têm grande relevância no estudo de processamento de sinais de áudio espacial. Esse sistema poderia ser desenvolvido para o funcionamento sem fio. Isso requer transformar cada nó em uma unidade de amostragem e computação, energeticamente independente e com comunicação sem fio com os demais nós.

Referências

- 1 KAY, S. M. *Fundamentals of Statistical Signal Processing*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1993. Estimation Theory.
- 2 Bertrand, A. Applications and trends in wireless acoustic sensor networks: A signal processing perspective. In: *2011 18th IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT)*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–6. ISSN 2373-0854.
- 3 COBOS, M. et al. A survey of sound source localization methods in wireless acoustic sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, Hindawi, v. 2017, p. 1–20, Aug 2017. ISSN 1530-8669. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2017/3956282>>.
- 4 PERALTA, L. R.; HERNÁNDEZ, E.; BRITO, L. A formal graph-based model applied to cluster communication in wireless sensor networks. *SENSORCOMM 2014 - 8th International Conference on Sensor Technologies and Applications*, p. 137–146, 01 2014.
- 5 GARCÍA-GONZÁLEZ, E. et al. On the use of graphs for node connectivity in wireless sensor networks for hostile environments. *Journal of Sensors*, Hindawi, v. 2019, p. 7409329, Nov 2019. ISSN 1687-725X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2019/7409329>>.
- 6 TIETE, J. et al. Soundcompass: A distributed mems microphone array-based sensor for sound source localization. *Sensors (Basel, Switzerland)*, v. 14, p. 1918 – 1949, 2014.
- 7 SHOHAG, M. A. S. et al. Damage mitigation techniques in wind turbine blades: A review. *Wind Engineering*, v. 41, n. 3, p. 185–210, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0309524X17706862>>.
- 8 DAMAGE-SENSITIVE Features. In: STRUCTURAL Health Monitoring. John Wiley and Sons, Ltd, 2012. cap. 7, p. 161–243. ISBN 9781118443118. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118443118.ch7>>.
- 9 MOUTINHO, J.; ARAÚJO, R.; FREITAS, D. Indoor localization with audible sound — towards practical implementation. *Pervasive and Mobile Computing*, v. 29, p. 1 – 16, 2016. ISSN 1574-1192. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157411921500200X>>.
- 10 ZAHEDI, A. et al. Audio coding in wireless acoustic sensor networks. *Signal Processing*, v. 107, p. 141 – 152, 2015. ISSN 0165-1684. Special Issue on ad hoc microphone arrays and wireless acoustic sensor networks Special Issue on Fractional Signal Processing and Applications. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165168414003557>>.
- 11 LI, D.; HU, Y. H. Energy-based collaborative source localization using acoustic microsensor array. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, v. 2003, n. 4, p. 985029, Mar 2003. ISSN 1687-6180. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/S1110865703212075>>.

- 12 RABENSTEIN, R.; ANNIBALE, P. Acoustic source localization under variable speed of sound conditions. *Wireless Communications and Mobile Computing*, Hindawi, v. 2017, p. 9524943, Oct 2017. ISSN 1530-8669. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2017/9524943>>.
- 13 SILVA, M.; NASCIMENTO, V.; LOPES, C. Localização de fontes por diferença de tempo de chegada em meios anisotrópicos. In: . [S.l.: s.n.], 2019.
- 14 Vicinanza, G. S.; Bergamo, Y. P.; Lopes, C. G. Position estimation from range measurements using adaptive networks. In: *2016 IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5. ISSN 2151-870X.
- 15 Chan, Y. T.; Ho, K. C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 42, n. 8, p. 1905–1915, 1994.
- 16 FOY, W. H. Position-location solutions by taylor-series estimation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-12, n. 2, p. 187–194, 1976.
- 17 Canclini, A. et al. A robust and low-complexity source localization algorithm for asynchronous distributed microphone networks. *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*, v. 23, n. 10, p. 1563–1575, 2015.
- 18 HUANG, Y. A.; BENESTY, J. *Audio Signal Processing for Next-Generation Multimedia Communication Systems*. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2004. 197-289 p. ISBN 1-4020-7769-6.
- 19 KIM, S.; CHONG, J. An efficient tdoa-based localization algorithm without synchronization between base stations. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v. 2015, p. 1–6, 09 2015.
- 20 CUI, X.-r.; ZHANG, H.; GULLIVER, T. A. Threshold selection for ultra-wideband toa estimation based on neural networks. *Journal of Networks*, v. 7, 09 2012.

APÊNDICE A – CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO

O trabalho no projeto se iniciou em 17 de março de 2020, e se encerrou em 14 de dezembro de 2020. A tabela 10 lista as principais atividades desenvolvidas e os respectivos responsáveis. Além disso, apresenta a estimativa do período de execução e quantas hora-homem foram empregadas por macro-atividade.

Tarefa	Março	Abril	Maiô	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Definição de objetivos e escopo do projeto [50h]	P, H									
Estudo do Estado da Arte referente a métodos de localização [100h]	T	T	T							
Ensaios em Simulador [100h]										
Desenvolvimento										
Implementação do EBL			H	H						
Implementação do TOA			L	L						
Implementação do TDOA			P	P						
Análise dos resultados					T					
Ensaios em plataformas de teste [300h]:										
Desenvolvimento:										
Plataforma para EBL					H	H	H			
Plataforma para TOA					L	L	L			
Plataforma para TDOA					P	P	P			
Análise dos resultados							T	T		
Implementação do produto final e ensaios [100h]								H		
Análise dos ensaios no produto [100h]									T	
Outros estudos complementares [100h]:					T	T	T	T	T	T
Desenvolvimento embarcado, Métodos numéricos, Processamento de sinais										
Preparação de apresentações, relatórios e documentação [240h]	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T
Reuniões [120h]	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T

Tabela 10: Tabela com estimativa de hora-homem empregadas por macro-atividade e os responsáveis por essas atividades. Os responsáveis são identificados por suas iniciais (“H” para Henrique, “L” para Lucas, “P” para Pedro e “T” para Todos). Na primeira coluna a letra “h” denota quantas hora-homem empregadas.