

MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
(Real Academia de Artilharia Fortificação e Desenho - 1792)
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA

GABRIEL SIQUEIRA CAMPOS DE OLIVEIRA
PEDRO COUTO LÓSSIO DE ALMEIDA

SIMULADOR E ANALISADOR DE SINAIS DE TIROS SUPERSÔNICOS

Rio de Janeiro
2016

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

**GABRIEL SIQUEIRA CAMPOS DE OLIVEIRA
PEDRO COUTO LÓSSIO DE ALMEIDA**

**SIMULADOR E ANALISADOR DE SINAIS DE TIROS
SUPERSÔNICOS**

Projeto de Fim de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletrônico.

Orientador: Prof. José Antonio Apolinário Jr. - D.Sc.

Orientador: TC Ângelo Marcio Cardoso Ribeiro Borzino - D.C.

Rio de Janeiro
2016

c2016

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
Praça General Tibúrcio, 80 - Praia Vermelha
Rio de Janeiro - RJ CEP 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmar ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

621.3 Oliveira, Gabriel Siqueira Campos de
O48s Simulador e analisador de sinais de tiros supersônicos
/ Gabriel Siqueira Campos de Oliveira, Pedro Couto
Lóssio de Almeida, orientado por José Antonio Apolinário Jr. e Ângelo Marcio Cardoso Ribeiro Borzino -
Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2016.

38p.: il.

Projeto de Fim de Curso (graduação) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.

1. Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica - projeto de fim de curso. 1. Sintetizador. 2. Sniper. 3. DoA. 4. Muzzle Blast. 5. Shockwave. I. Apolinário Jr., José Antonio. II. Borzino, Ângelo Marcio Cardoso Ribeiro. III. Título. IV. Instituto Militar de Engenharia.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

GABRIEL SIQUEIRA CAMPOS DE OLIVEIRA
PEDRO COUTO LÓSSIO DE ALMEIDA

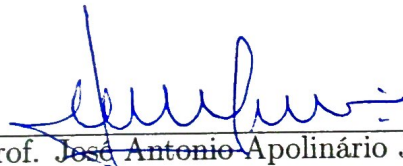
**SIMULADOR E ANALISADOR DE SINAIS DE TIROS
SUPERSÔNICOS**

Projeto de Fim de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletrônico.

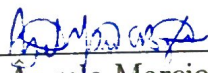
Orientador: Prof. José Antonio Apolinário Jr. - D.Sc.

Orientador: TC Ângelo Marcio Cardoso Ribeiro Borzino - D.C.

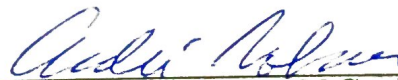
Aprovado em 29 de Setembro de 2016 pela seguinte Banca Examinadora:



Prof. José Antonio Apolinário Jr. - D.Sc., do IME - Presidente



TC Ângelo Marcio Cardoso Ribeiro Borzino - D.C., do CTEEx



Prof. André Rotava - M.C., do IME

Rio de Janeiro
2016

Às nossas mães. Aos nossos pais.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todas as pessoas que nos incentivaram, apoiaram e possibilitaram esta oportunidade de ampliar nossos horizontes.

Nossos familiares, amigos e mestres.

Em especial ao nosso Professor Orientador Dr. José Antonio Apolinário Jr. e ao Co-orientador Dr. TC Ângelo Marcio Cardoso Ribeiro Borzino, por suas disponibilidades e atenções.

“Quem é pró trabalha nos limites...”

RAFAEL SILVEIRA

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	7
LISTA DE TABELAS	8
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivo	11
1.2 Justificativa	11
1.3 Metodologia	11
1.4 Estrutura do Texto	12
2 COMPONENTES DE UM SINAL DE TIRO SUPERSÔNICO ...	13
2.1 Muzzle Blast	13
2.2 Ballistic Shockwave	14
3 SIMULADOR DE SINAL DE TIRO	17
4 ESTIMAÇÃO DE DIREÇÃO DE CHEGADA	21
4.1 Correlação Cruzada Generalizada - GCC	21
4.2 Funções de ponderação do GCC	22
4.3 Direção de Chegada - DoA	23
5 DISTÂNCIA DO ATIRADOR AO ARRANJO DE MICROFONES	25
5.1 Ângulo de Mach constante	25
5.2 Ângulo de Mach variável	26
6 ANÁLISE DE DADOS	29
7 CONCLUSÃO	36
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG.2.1	<i>MB</i> do sinal com alta SNR ($f_s = 96KHz$) usado no simulador.	14
FIG.2.2	Onda <i>SW</i> ($f_s = 96KHz$).	15
FIG.2.3	FOV do <i>muzzle blast</i> e do <i>shockwave</i> . Note que o <i>shockwave</i> não é omnidirecional, apresentado um campo de visão (FOV) limitado pelo ângulo β (ALMEIDA; APOLINÁRIO JR, 2015).	16
FIG.3.1	GUI do simulador de sinal de tiro.	17
FIG.3.2	Relação sinal-ruído em função da distância para disparos de um FAL.	18
FIG.3.3	Ondas observadas em cada microfone do arranjo e seus respectivos sinais reais.	19
FIG.3.4	Representação gráfica de um disparo.	20
FIG.4.1	Modelo do sinal sonoro de um tiro (PRANDEL; APOLINÁRIO JR, 2014).	21
FIG.5.1	Geometria para um disparo com velocidade constante.	26
FIG.5.2	Geometria para um disparo com velocidade variável.	27
FIG.6.1	Arranjo espacial de sete microfones (PRANDEL; APOLINÁRIO JR, 2014).	30
FIG.6.2	Representação de diagrama de blocos do simulador.	31
FIG.6.3	Tratamento dos sinais antes de serem passados pelo analisador.	32
FIG.6.4	Representação em diagrama de blocos do analisador.	32

LISTA DE TABELAS

TAB.3.1	Posições do microfone e atirador	18
TAB.6.1	Posições dos microfones no arranjo	29
TAB.6.2	Posições do atirador e do arranjo	30
TAB.6.3	Resultados do simulador (distâncias em metros)	32
TAB.6.4	Resultados para atirador a $235.937m$ (distância em metros)	33
TAB.6.5	Resultados para atirador a $400.855m$ (distância em metros)	33
TAB.6.6	Resultados para atirador a $497.867m$ (distância em metros)	34
TAB.6.7	Resultados para atirador a $682.46m$ (distância em metros)	34

RESUMO

O presente projeto de fim de curso apresenta um estudo sobre o sinal de tiro supersônico, a estimação da direção de chegada de disparo de uma arma de fogo, assim como, quando possível, uma avaliação da distância a qual o disparo foi efetuado. Considera-se para tal estudo dois modelos: um no qual a velocidade do projétil é considerada constante e outro no qual os efeitos balísticos de desaceleração são levados em conta. É feita uma comparação entre os resultados obtidos nos dois modelos. Além disso, é apresentado um simulador de sinal de tiro, que gera sinais sonoros de tiros dadas configurações como localização do atirador e do arranjo de microfones, direção de disparo, armamento utilizado e SNR.

ABSTRACT

This final project presents a study on a gunshot signal, the estimation of direction of arrival (DoA) of gunshot signals and, whenever possible, the distance between the shooter and the microphone array. We consider two different models on this study: on the first one, the projectile speed is assumed to be the same during all its trajectory; on the latter, the ballistic effects of deceleration are taken into account. Then, the results of each model are compared. Moreover, it is presented a gunshot signal simulator, which generates signals given inputs such as shooter and microphone set locations, target position, weapon, and SNR.

1 INTRODUÇÃO

Este projeto de final de curso em engenharia eletrônica estuda como o processamento digital de sinais de tiro de projéteis supersônicos pode ser usado para criar sistemas e métodos que estimem a posição de um atirador. Os tiros supersônicos geram dois sons impulsivos distintos: a onda de choque (ou *shockwave*), criado pelo projétil supersônico e o estouro no cano (ou *muzzle blast*), criado pela expansão dos gases no cano do armamento. Em pequenas distâncias, a direção de chegada (*DoA*, do inglês *Direction of Arrival*) e os tempos de chegada desses dois sons fornecem informações suficientes para se determinar a posição do atirador (BEDARD; PARE, 2003). Para distâncias longas, informações sobre as características do projétil podem ser calculadas a partir do formato de onda dos sinais de tiro (LO; FERGUSON, 2008) e devem ser usadas para uma estimativa mais precisa.

1.1 OBJETIVO

O objetivo deste projeto de final de curso foi estudar e verificar métodos que melhoram a estimativa da distância de um atirador a um arranjo conhecido de microfones. Em geral, os métodos consideram que a velocidade do projétil é constante. Para distâncias acima de $300m$, os efeitos da desaceleração do projétil causados pela força de arrasto não são mais desprezíveis e devem ser levados em consideração.

1.2 JUSTIFICATIVA

O estudo e o desenvolvimento de serviços de defesa estão dentro do escopo dos projetos estratégicos do Exército Brasileiro. O foco deste projeto está em ações anti-caçadores. Caçadores são atiradores especialmente treinados para abaterem um inimigo com o mínimo de disparos possíveis (PRANDEL; APOLINÁRIO JR, 2014), localizados muitas vezes a grandes distâncias do alvo. Poucos disparos e alto nível de camuflagem dificultam a determinação da localização do caçador. Sendo assim, são necessários métodos e sistemas para estimar sua posição com o mínimo de informações possíveis.

1.3 METODOLOGIA

O projeto foi dividido nas seguintes etapas:

- Análise bibliográfica;
- Desenvolvimento de um simulador de sinais de tiro para pequenas distâncias (velocidade do projétil constante);
- Algoritmo de estimação da posição do atirador (velocidade do projétil constante);
- Desenvolvimento de um simulador de sinais de tiro para grandes distâncias;
- Algoritmo de estimação da posição do atirador;
- Análise de resultados e conclusões.

1.4 ESTRUTURA DO TEXTO

A estrutura deste texto é a seguinte: no Capítulo 2 são apresentadas e discutidas as componentes de um sinal de tiro supersônico, o disparo no cano da arma (conhecido em inglês por *muzzle blast*) e a onda de choque balística (conhecida em inglês por *shockwave*). No Capítulo 3 é explicado o funcionamento do simulador de sinais de tiro atualizado neste projeto. No Capítulo 4 são introduzidos algoritmos de estimação de direção de chegada de um sinal de tiro. No Capítulo 5 é discutido como se estimar a posição de um atirador a partir de estimativas da direção de chegada dos sinais *muzzle blast* e *shockwave*. No Capítulo 6 são analisados dados de tiros reais e tiros simulados para verificar a eficiência do estimador. Por fim, no Capítulo 7, é feita uma conclusão do projeto.

2 COMPONENTES DE UM SINAL DE TIRO SUPERSÔNICO

No presente capítulo, descrevemos os sinais gerados pelo disparo de uma arma e que contêm informações suficientes para que, por meio do processamento de sinais, possamos localizar a posição de onde o disparo foi realizado.

2.1 MUZZLE BLAST

O muzzle blast (chamado de agora em diante de *MB*) é gerado pela explosão da carga propelente do projétil no cano da arma. A onda sonora gerada se propaga na velocidade do som e depende de variáveis como calibre, tamanho do cano da arma e composição química do propelente. O *MB*, que pode ter sua amplitude bastante reduzida pelo uso de silenciador no armamento, se desloca no ar com a velocidade do som, que é função da temperatura, de acordo com (HALLIDAY et al., 2009):

$$v_s = v_0 \sqrt{1 + T/273}, \quad (2.1)$$

onde T é a temperatura em graus Celsius e $v_0 = 331m/s$ é a velocidade do som para o temperatura de $0^\circ C$. O *MB* é um sinal bastante direcional, ou seja, embora a energia sonora se propague em todas as direções, a pressão sonora é maior na direção do cano da arma. A figura a seguir ilustra o *MB* detectado por um arranjo de microfones a $300m$ do atirador na direção do disparo (sinal gravado no CAEx).

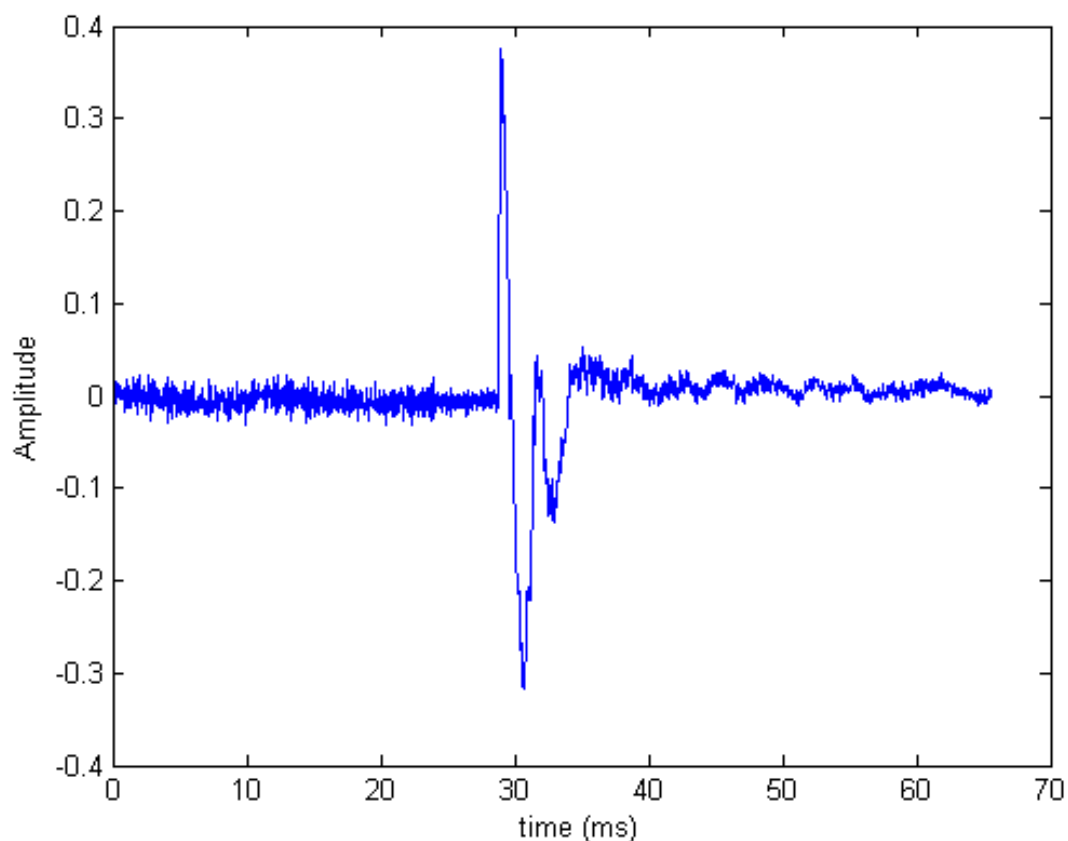


FIG. 2.1: *MB* do sinal com alta SNR ($f_s = 96KHz$) usado no simulador.

O *MB* é um sinal impulsivo, que decai exponencialmente com o tempo. É bastante sensível a ruídos e difícil de ser detectado quando a distância do atirador torna-se elevada.

2.2 BALLISTIC SHOCKWAVE

O ballistic shockwave, ou simplesmente shockwave (a partir desse momento, *SW*) é uma onda gerada quando o projétil se desloca em velocidades supersônicas. A súbita compressão do ar seguido pela rápida expansão confere à essa onda um formato de “N”, sendo por isso muitas vezes chamada de “onda N”. A FIG 2.2 ilustra um shockwave.

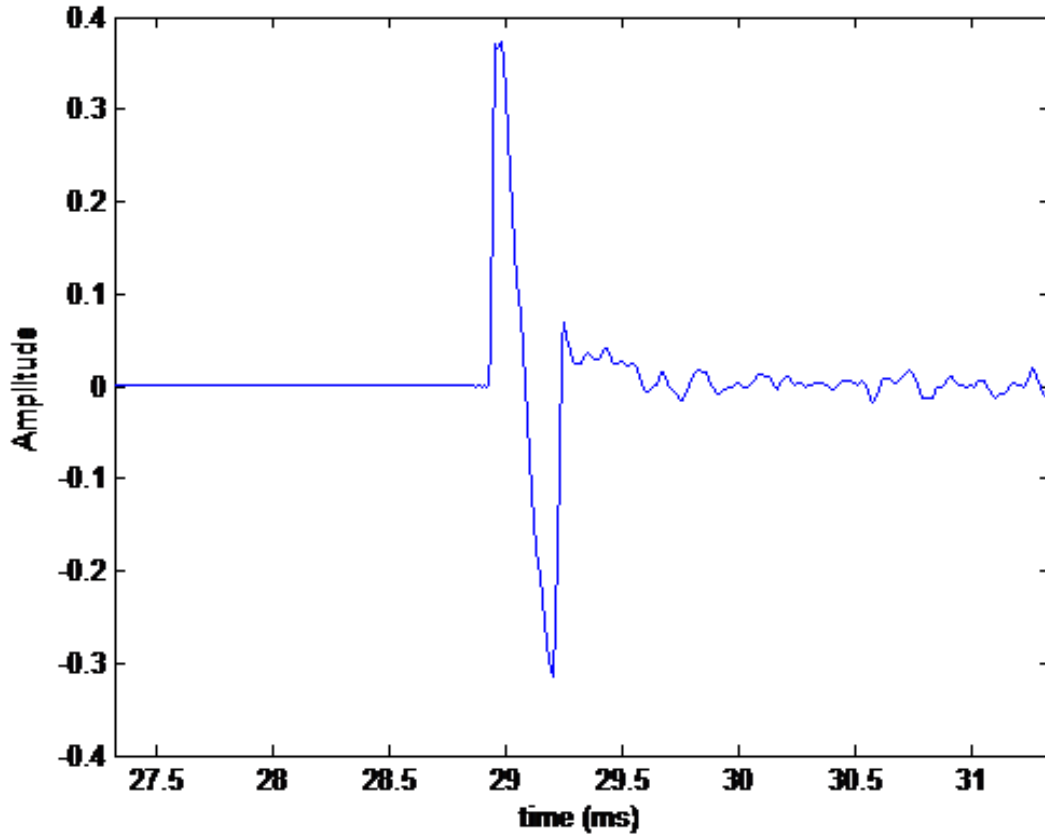


FIG. 2.2: Onda SW ($f_s = 96KHz$).

O shockwave, ao empurrar o ar, cria uma onda impulsiva cuja frente de onda é um cone que forma um ângulo α_M com a trajetória do projétil, dado por:

$$\alpha_m = \arcsin\left(\frac{v_s}{v_p}\right), \quad (2.2)$$

onde v_p se refere à velocidade do projétil e v_s denota a velocidade do som. A esse ângulo se dá o nome de ângulo de Mach. Dois fatos relativos ao shockwave são importantes notar: o primeiro é que ele é direcional, não sendo detectado por microfones fora do seu campo de visão (vide FIG. 2.3, onde FOV denota *field of view*). O ângulo que limita o FOV é dado por (GEORGE; KAPLAN, 2011):

$$\beta = \pi - 2\alpha_M, \quad (2.3)$$

onde α_M é o ângulo de Mach.

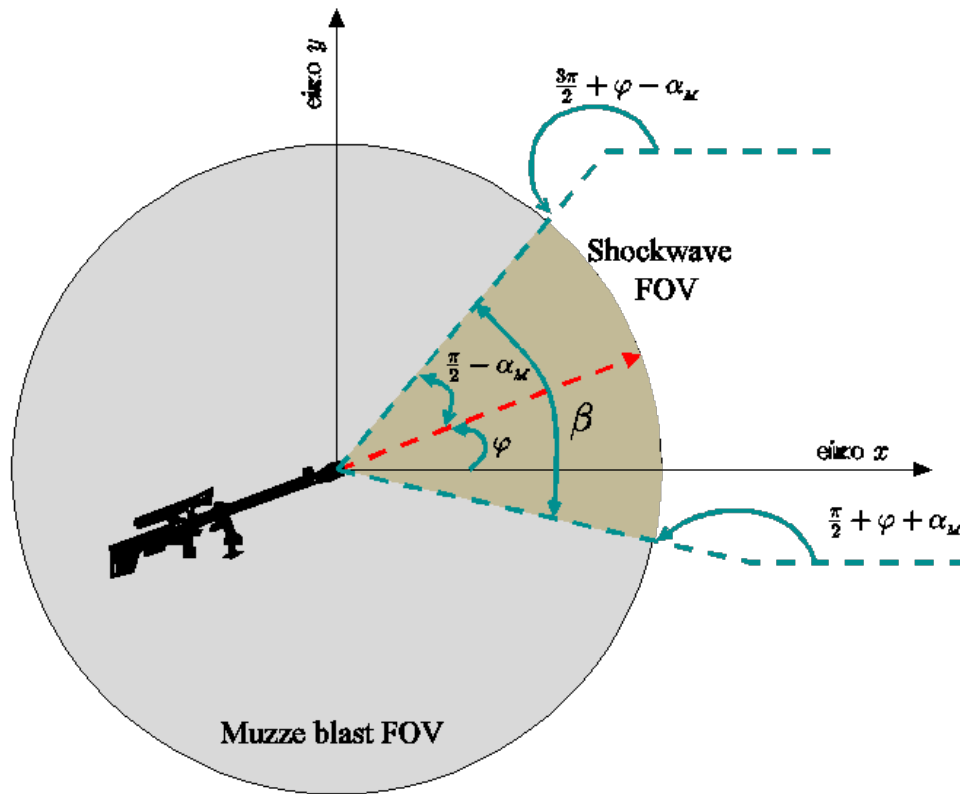


FIG. 2.3: FOV do *muzzle blast* e do *shockwave*. Note que o *shockwave* não é omnidirecional, apresentado um campo de visão (FOV) limitado pelo ângulo β (ALMEIDA; APOLINÁRIO JR, 2015).

O segundo fato é que, na maioria das vezes, esta onda vai chegar aos microfones antes do *muzzle blast*. Sendo assim, espera-se observar dois sinais impulsivos distintos nos sensores acústicos. A detecção do *MB* a partir de um arranjo de microfones de geometria conhecida nos permite estimar o *DoA* (*Direction of Arrival*) do sinal de tiro, i.e., a direção na qual o atirador se encontra. Se além disso, obtivermos informações sobre o *SW*, é possível estimar a distância a qual o disparo foi realizado. Tais fatos serão apresentados nos capítulos seguintes.

3 SIMULADOR DE SINAL DE TIRO

Desenvolvemos um programa em MATLAB® capaz de gerar sinais de tiro dada uma configuração geométrica de posição do atirador, microfones e ângulo de disparo. O programa possui uma base de dados com diferentes sinais de tiro (*MB* e *SW*) para diversos armamentos, além de ruídos reais gravados em campo (CAEx, Centro de Avaliações do Exército e CIOpEsp, Centro de Instrução de Operações Especiais). Com essa base de dados, as informações geométricas e algumas outras entradas (como a relação sinal ruído e a temperatura do ar – que confere a velocidade do som no meio) é realizado um tratamento matemático nas gravações limpas de sinais de tiros (*muzzle blast*, *shockwave* e ruído isolado) obtidas de testes de campo no CAEx. O algoritmo desenvolvido analisa se haverá uma *shockwave*, calcula o atraso ou avanço em cada um dos microfones, faz as somas de sinais necessárias e acrescenta um ruído, como função da SNR. A FIG. 3.1 ilustra a interface com o usuário gerada em MATLAB®:

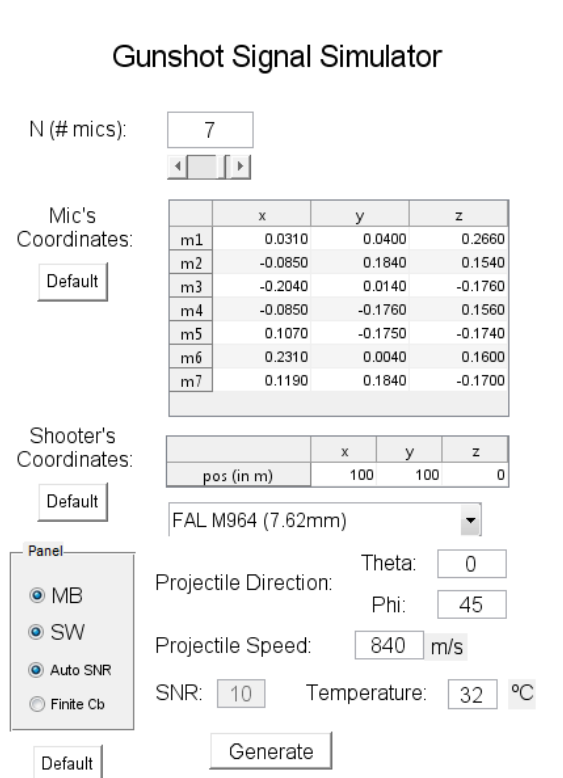


FIG. 3.1: GUI do simulador de sinal de tiro.

A partir de uma série de disparos para os diversos armamentos, obtivemos a relação sinal-ruído esperada como função da distância (vide FIG. 3.2) e com isso geramos a

função Auto-SNR: o programa utiliza a relação sinal ruído adequada para cada distância de acordo com a aproximação linear encontrada.

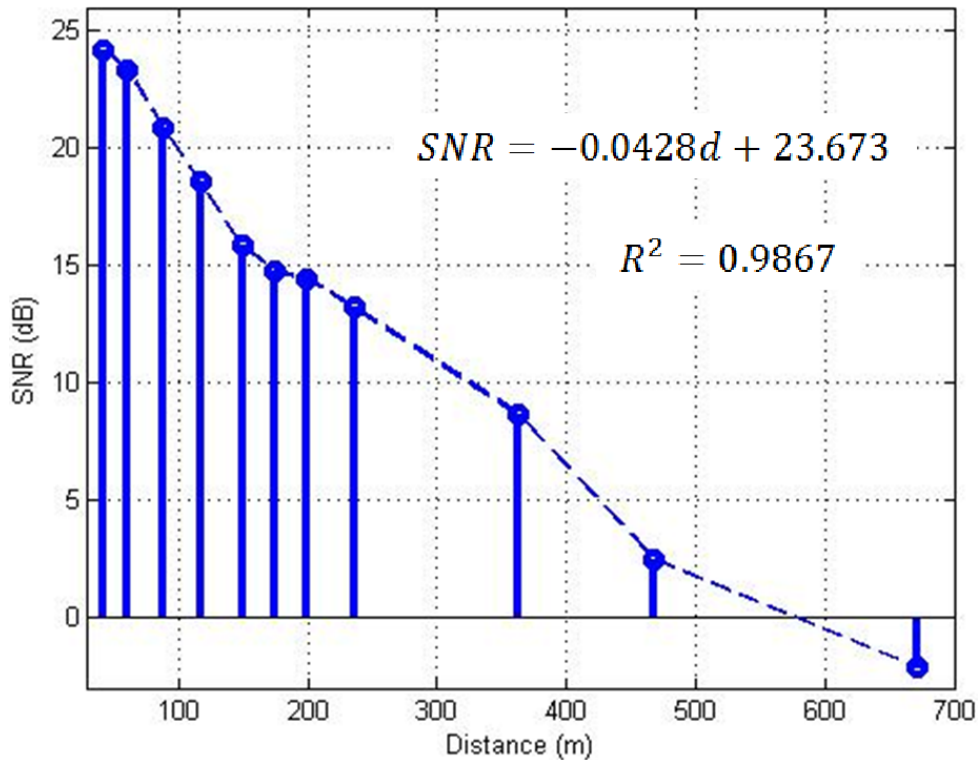


FIG. 3.2: Relação sinal-ruído em função da distância para disparos de um FAL.

Para ilustrar o funcionamento do simulador, comparamos os resultados por ele gerados para um arranjo de 2 microfones com seus sinais equivalentes reais. As entradas para tais sinais estão na TAB. 3.1:

TAB. 3.1: Posições do microfone e atirador

	x	y	z
m_1	97.57	104.052	2.076
m_2	65.67	108.845	2.773
shooter	213.996	96.224	0.38

Os sinais foram amostrados a uma taxa de $96kHz$ e foi utilizada a função auto-SNR. A velocidade do projétil foi inicialmente definida como $840m/s$. O disparo foi realizado no plano horizontal e com um ângulo ϕ entre os eixos x e y de 171.7° . O resultado pode ser visto na FIG. 3.3:

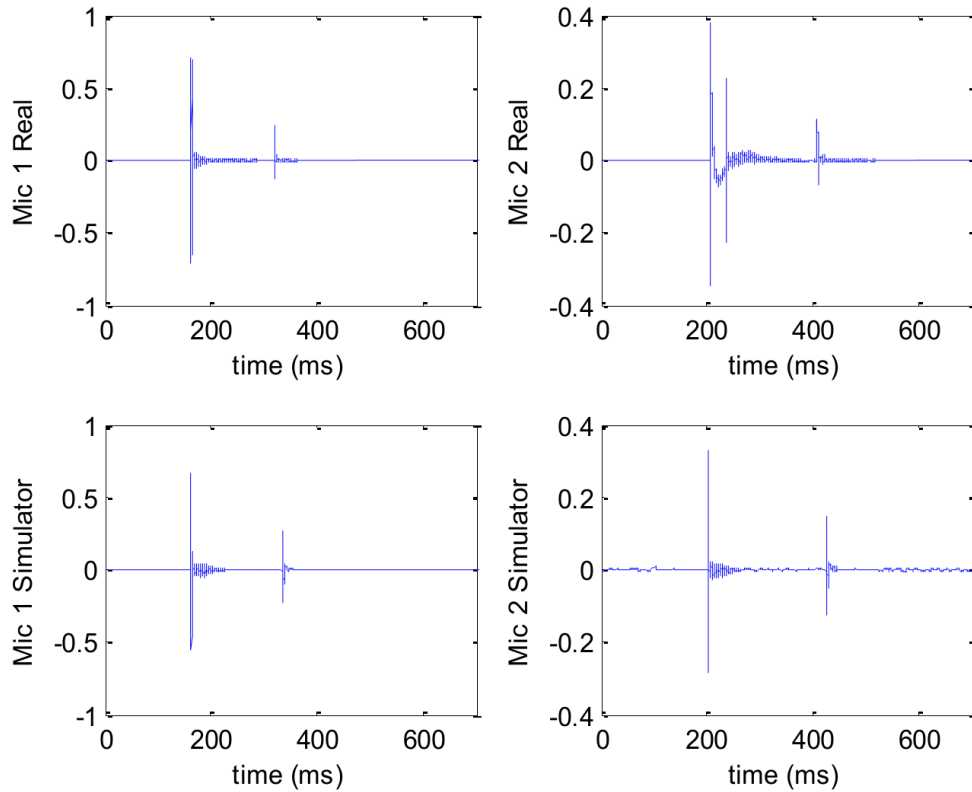


FIG. 3.3: Ondas observadas em cada microfone do arranjo e seus respectivos sinais reais.

Note que, a despeito de uma leve diferença no SW do microfone 2, provavelmente devido a alguma reflexão no solo, que o simulador não leva em consideração, o modelo parece executar bem o seu papel. Por último, o simulador também considera o efeito da desaceleração do projétil quando ativada a função Finite Cb . A constante balística Cb faz parte do modelo de desaceleração de projétil e será apresentada nas seções seguintes. Ela apresenta valor infinito no caso de velocidade constante e assume valores da ordem de $90(m.s)^{1/2}$ nos demais casos (dependendo do armamento e da distância entre atirador e microfones). A lógica do algoritmo por trás do simulador pode ser melhor entendida com o auxílio da FIG. 3.4

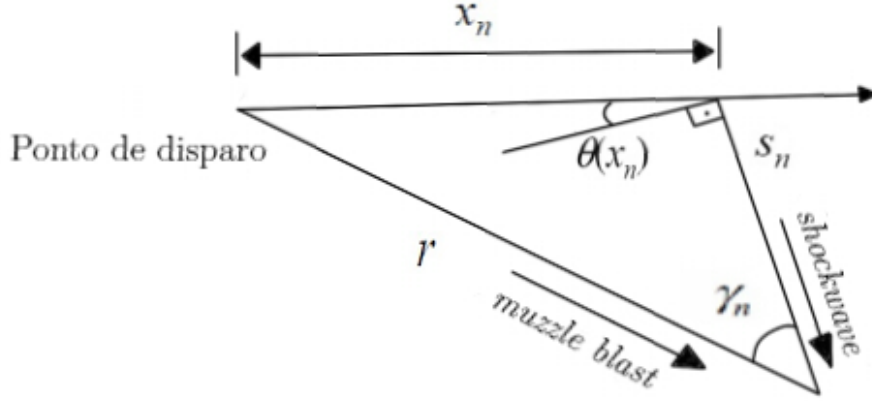


FIG. 3.4: Representação gráfica de um disparo.

Sendo conhecido a geometria da figura (ângulos do triângulo além de r), podemos obter os tempos de chegada do MB e do SW por meio das equações a seguir:

$$t_{SW} = t(x_n) + \frac{s_n}{c} \quad (3.1)$$

$$t_{MB} = \frac{r}{c}, \quad (3.2)$$

onde c é a velocidade do som. Além disso, $t(x_n)$ pode ser calculado resolvendo iterativamente a equação:

$$t(x_n) = Cb(v(x_n)^{-1/2} - V^{-1/2}) \quad (3.3)$$

sendo que

$$v(x_n) = (V^{1/2} - x_n/Cb)^2 \quad (3.4)$$

e

$$x_n = \frac{r \cos \left(\alpha + \arcsin \left(\frac{c}{(V^{1/2} - Cb^{-1}x_n)^2} \right) \right)}{\cos \left(\arcsin \left(\frac{c}{(V^{1/2} - Cb^{-1}x_n)^2} \right) \right)} \quad (3.5)$$

onde α é o ângulo formado entre o disparo e a linha de atirador e microfones. Os atrasos são aplicados nos sinais base de MB e SW (caso as condições de existência de SW sejam satisfeitas), é acrescentado um ruído e em seguida o sinal resultante é normalizado. É gerado um arquivo .wav e os sinais gerados são salvos. As aplicações para o simulador de sinal de tiro vão desde o teste de algoritmos de DoA (como feito nas seções seguintes) até treinamento militar para situações de combate com sniper (treinamento em campo com o uso de headphones, por exemplo) e jogos de videogame com disparos bastante reais.

4 ESTIMAÇÃO DE DIREÇÃO DE CHEGADA

É possível determinar a direção de chegada de uma onda sonora a partir de um arranjo de microfones conhecido. Existem diferentes algoritmos na literatura, como o *Beamforming* (LAM; SINGER, 2006), *Capon* (CAPON, 1969), *Music* (STOICA; MOSES, 2005) e o estimado a partir da correlação cruzada generalizada (GCC - *generalized cross correlation*) (KNAPP; CARTER, 1976). Neste trabalho, optamos por utilizar o método GCC para estimar a direção de chegada dos sinais de tiro *SW* e *MB*.

4.1 CORRELAÇÃO CRUZADA GENERALIZADA - GCC

Seja um arranjo de microfones conhecido e seja um sinal de tiro $s(t)$ modelado por uma fonte única de reverberação que chega aos microfones i e j , $h_i(t)$ a resposta do impulso entre a fonte do sinal sonoro e o microfone i e $n_i(t)$ o ruído. No domínio do tempo, o sinal nos microfones i e j são modelados por $x_i(k) = s(k) * h_i(k) + n_i(k)$ e $x_j(k) = s(k) * h_j(k) + n_j(k)$. O símbolo $*$ é o operador convolução.

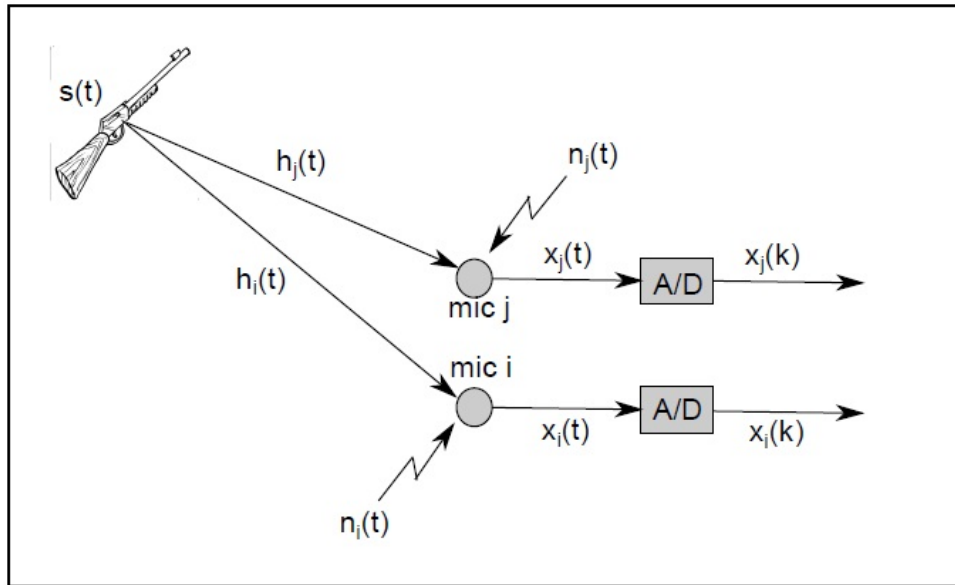


FIG. 4.1: Modelo do sinal sonoro de um tiro (PRANDEL; APOLINÁRIO JR, 2014).

Uma possível estimativa para a correlação cruzada entre $x_i(k)$ e $x_j(k)$, em que $r_{x_i x_j}(\tau) = E[x_i(k)x_j(k - \tau)]$, é dada pela expressão

$$\hat{r}_{x_i x_j}(\tau) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_i(k)x_j(k-\tau) = x_i(\tau) * x_j(-\tau). \quad (4.1)$$

A estimativa da densidade espectral de potência, definida como $R_x(e^{j\omega}) = \mathcal{F}\{r_x(\tau)\}$, entre $x_i(k)$ e $x_j(k)$ é dada por

$$\hat{R}_{x_i x_j}(e^{j\omega}) = \mathcal{F}\{\hat{r}_{x_i x_j}(\tau)\} = \mathcal{F}\{x_i(\tau) * x_j(-\tau)\} = X_i(e^{j\omega})X_j(e^{-j\omega}). \quad (4.2)$$

Se $x_j(k)$ é real, então $\hat{R}_{x_i x_j}(e^{j\omega}) = X_i(e^{j\omega})X_j^*(e^{-j\omega})$

Assumindo que o ruído é decorrelacionado dos outros sinais, a correlação cruzada se reduz a $r_{x_i x_j}(\tau) = E\{[s(k) * h_i(k)][s(k-\tau) * h_j(k-\tau)]\}$, o que implica que

$$\hat{R}_{x_i x_j}(e^{j\omega}) = \underbrace{S(e^{j\omega})S^*(e^{j\omega})}_{\hat{R}_s(e^{j\omega})=|S(e^{j\omega})|^2} H_i(e^{j\omega})H_j^*(e^{j\omega}), \quad (4.3)$$

dados que $s(k)$ e $h_j(k)$ são reais.

Sendo assim, a correlação cruzada entre os sinais $x_i(k)$ e $x_j(k)$ pode ser expressa como

$$\hat{r}_{x_i x_j}(\tau) = \mathcal{F}^{-1}\{\hat{R}_{x_i x_j}(e^{j\omega})\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H_i(e^{j\omega})H_j^*(e^{j\omega})\hat{R}_s(e^{j\omega})e^{j\omega\tau} d\omega \quad (4.4)$$

4.2 FUNÇÕES DE PONDERAÇÃO DO GCC

Das Equações (4.3) e (4.4), a GCC entre os microfones i e j é definida por (BENESTY et al., 2008)

$$r_{x_i x_j}^G(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \psi(\omega)\hat{R}_{x_i x_j}(e^{j\omega})e^{j\omega\tau} d\omega, \quad (4.5)$$

onde a função de ponderação de frequências $\psi(\omega)$ é usada para melhorar a estimativa do atraso temporal. Na prática, utiliza-se a Transformada Rápida de Fourier, FFT, ao invés da Transformada Discreta de Fourier, DFT. A estimativa da diferença de tempo de chegada nos microfones (*TDoA - time difference of arrival*) é dada, então, por

$$\tau_{ij} = \arg \max_{\tau} r_{x_i x_j}^G(\tau). \quad (4.6)$$

A estimativa da correlação cruzada convencional ou sem peso $\hat{r}_{x_i x_j}(\tau)$ é calculada quando $\psi(\omega) = 1$.

4.3 DIREÇÃO DE CHEGADA - DOA

As diferenças de tempo de chegada (*TDoAs*) τ_{ij} para todas as $N(N - 1)/2$ combinações possíveis de pares de microfones são calculadas pelo algoritmo GCC a partir dos picos de correlação cruzada dos sinais de *SW* e *MB* (FREIRE; APOLINÁRIO JR, 2011).

A velocidade do som é uma função da temperatura ambiente T , em graus Celsius, e é dada pela Equação (2.1).

A partir desses dados e do conhecimento do arranjo de microfones, é possível estimar a direção de chegada da onda sonora. Seja $\bar{\tau}_{ij} = \tau_{ij}/f_s$ o atraso entre os microfones i e j . Se $\bar{\tau}_i$ é o tempo que a onda plana leva da posição i até a origem do sistema de coordenadas, então $\bar{\tau}_{ij} = \bar{\tau}_i - \bar{\tau}_j$. Lembrando que o vetor unitário na direção de ϕ e θ , sentido contrário ao de propagação da onda $\mathbf{a}_{\theta,\phi}$ é

$$\mathbf{u}_{\theta,\phi} = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \phi \\ \sin \theta \sin \phi \\ \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (4.7)$$

temos

$$\mathbf{a}_{\theta,\phi} = -\mathbf{u}_{\theta,\phi} = \begin{bmatrix} -\sin \theta \cos \phi & -\sin \theta \sin \phi & -\cos \theta \end{bmatrix}^T. \quad (4.8)$$

Sejam \mathbf{p}_i e \mathbf{p}_j as coordenadas dos microfones e seja $\Delta\mathbf{p}_{ij} = \frac{\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j}{v_s}$. Então podemos escrever que

$$d_{ij} = \frac{\mathbf{a}_{\theta,\phi}^T \mathbf{p}_i - \mathbf{a}_{\theta,\phi}^T \mathbf{p}_j}{v_s} = \mathbf{a}_{\theta,\phi}^T \Delta\mathbf{p}_{ij} \quad (4.9)$$

Uma estimativa de DoA pode ser calculada considerando um arranjo com N microfones com todos os possíveis $N(N - 1)/2$ pares com seus correspondentes atrasos possíveis minimizando em relação a $\mathbf{a}_{\theta,\phi}$ a função custo a seguir (método dos Mínimos Quadrados).

$$\begin{aligned} \xi(\theta, \phi) &= (\bar{\tau}_{12} - \Delta\mathbf{p}_{12}^T \mathbf{a}_{\theta,\phi})^2 + \dots \\ &\quad (\bar{\tau}_{13} - \Delta\mathbf{p}_{13}^T \mathbf{a}_{\theta,\phi})^2 + \dots \\ &\quad + (\bar{\tau}_{(N-1)N} - \Delta\mathbf{p}_{(N-1)N}^T \mathbf{a}_{\theta,\phi})^2 \end{aligned} \quad (4.10)$$

Tirando o gradiente de (4.10) em relação a $\mathbf{a}_{\theta,\phi}$ e igualando o resultado a zero, obtemos

$$\mathbf{a}_{DoA} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b} \quad (4.11)$$

onde

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \Delta\mathbf{p}_{12}\Delta\mathbf{p}_{12}^T + \dots + \Delta\mathbf{p}_{(N-1)N}\Delta\mathbf{p}_{(N-1)N}^T & \text{e} \\ \mathbf{b} = \bar{\tau}_{12}\Delta\mathbf{p}_{12} + \dots + \bar{\tau}_{(N-1)N}\Delta\mathbf{p}_{(N-1)N} \end{cases} \quad (4.12)$$

Assumindo $\mathbf{a}_{DoA} = [a_x \ a_y \ a_z]^T$, o azimute da DoA é dado por

$$\theta = \arccos a_z \quad (4.13)$$

e o ângulo rasante é dado por

$$\phi = \arctan \frac{a_y}{a_x}. \quad (4.14)$$

5 DISTÂNCIA DO ATIRADOR AO ARRANJO DE MICROFONES

Neste capítulo discutiremos métodos para se determinar a distância do atirador ao centro do arranjo de microfones. De acordo com as características do sinal de áudio de um disparo, como explicadas no Capítulo 2, sabemos que a direção do atirador é a mesma direção \mathbf{u}_{MB} de propagação da frente de onda do sinal de tiro MB em relação ao centro do arranjo de microfones e que, se o tiro for supersônico, haverá a propagação da *ballistic shockwave*. A interpretação em conjunto dos dois sinais (SW e MB) permite gerar uma triangulação que, por sua vez, permite estimar a distância do atirador.

O ângulo de Mach é definido como

$$\mu = \arccos \frac{v_{\text{som}}}{v_{\text{projétil}}}. \quad (5.1)$$

O número de Mach é definido como

$$M = \frac{v_{\text{projétil}}}{v_{\text{som}}}. \quad (5.2)$$

Foram estudadas neste trabalho dois modelos de estimação. O primeiro leva em consideração que a velocidade do projétil é constante após o disparo e portanto o ângulo de Mach também (FREIRE; APOLINÁRIO JR, 2011). O segundo leva em consideração os efeitos de desaceleração do projétil e de abertura do ângulo de Mach (DUCKWORTH et al., 2001) (BARGER et al., 2010).

5.1 ÂNGULO DE MACH CONSTANTE

Consideremos a FIG. 5.1 com a geometria do problema

A distância Δd_{sm_i} entre o centro do arranjo \mathbf{m} e o microfone \mathbf{m}_i , na direção da frente de propagação do *ballistic shockwave* é a projeção do segmento \mathbf{m}_i que liga o microfone i e o centro no arranjo na direção de \mathbf{u}_{bSW} , é dada por

$$\Delta d_{sm_i} = (\mathbf{m}_i - \mathbf{m})^T \mathbf{u}_{bSW}, \quad (5.3)$$

e, para o MB ,

$$\Delta d_{gm_i} = (\mathbf{m}_i - \mathbf{m})^T \mathbf{u}_{MB}. \quad (5.4)$$

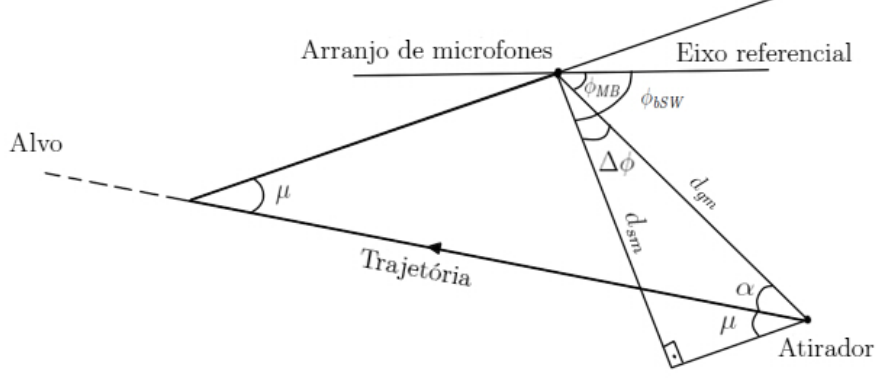


FIG. 5.1: Geometria para um disparo com velocidade constante.

Da geometria, é possível também escrever para cada microfone que

$$d_{gm_i} - d_{gm_i} \cos(\Delta\phi) = \Delta\tau_i v_{\text{som}} + \Delta d_{sm_i} - \Delta d_{gm_i}$$

$$d_{gm_i} = \frac{\Delta\tau_i v_{\text{som}} + \Delta d_{sm_i} - \Delta d_{gm_i}}{1 - \mathbf{u}_{bSW}^T \mathbf{u}_{MB}}. \quad (5.5)$$

Por fim, considerando a média de todos os N microfones, a distância do atirador ao centro do arranjo de microfones é estimada por

$$d_{gm} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta\tau_i v_{\text{som}} + \Delta d_{sm_i} - \Delta d_{gm_i})}{1 - \mathbf{u}_{bSW}^T \mathbf{u}_{MB}}. \quad (5.6)$$

Repare que para determinar a distância é preciso estimar as direções de chegada da bSW e do MB e do TDoA, que podem ser obtidas pelo algoritmo GCC explicado no Capítulo 4. Fazendo $\mathbf{m} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$, o vetor distância se reduz a

$$\hat{\mathbf{g}} = -d_{gm} \mathbf{u}_{MB}. \quad (5.7)$$

5.2 ÂNGULO DE MACH VARIÁVEL

As equações e discussões sobre o método de como se calcular a distância do atirador ao centro do arranjo de microfones são descritas em (DUCKWORTH et al., 2001) e em (BARGER et al., 2010). A medida em que o projétil viaja, sua velocidade diminui devido à força de arrasto. Sendo assim, de acordo com a Equação (5.1), o ângulo de Mach tende a aumentar. Para se determinar a distância do atirador, é preciso modelar a variação da velocidade do projétil no tempo. Considerando a figura a seguir, sejam as seguintes definições:

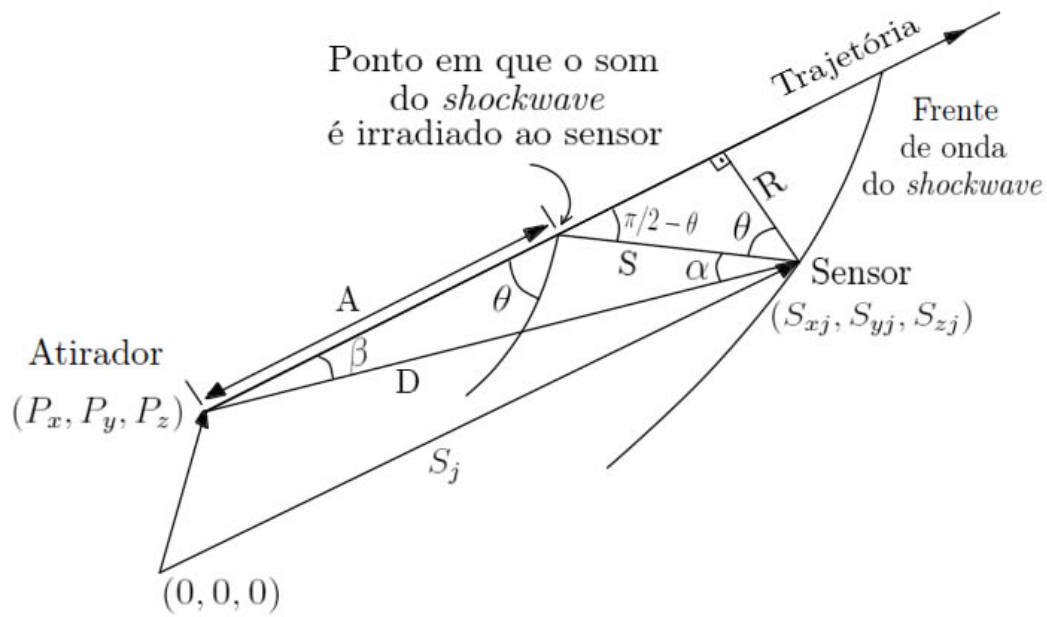


FIG. 5.2: Geometria para um disparo com velocidade variável.

- v_{som} : velocidade do som na temperatura ambiente;
- Cb : constante balística, que depende do calibre e do formato do projétil;
- P : posição do atirador relativa à origem;
- S_j : posição do microfone j ;
- D : vetor distância do atirador ao microfone j ;
- V : velocidade inicial do projétil;
- $M = \frac{v_{\text{projétil}}}{v_{\text{som}}}$: número de Mach;
- θ : ângulo de Mach;
- A : posição em que o sinal SW é irradiado em direção ao microfone j .

O tempo de chegada do sinal SW é a soma do tempo que demora para o projétil percorrer a distância a com o tempo que demora para o SW percorrer a distância S . Ou seja:

$$t_j = \frac{D}{v_{\text{som}}} \sin(\beta + \theta). \quad (5.8)$$

A distância D é calculada então pelo seguinte método. Uma estimativa inicial D_0 é calculada a partir da diferença de tempo de chegada (*TDoA*) τ_{ms} e o ângulo α entre o *shockwave* e o *muzzle blast* medidas nos sensores e supondo a velocidade v_{som} do projétil constante. Portanto:

$$D_0 = \frac{\tau_{\text{ms}} v_{\text{som}}}{1 - \cos \alpha} \quad (5.9)$$

Deste modo, o ângulo de Mach é estimado em:

$$M_a = M_0 \left(1 - \frac{a}{C_b \sqrt{v_{\text{som}}}} \right)^2 \quad (5.10)$$

De (5.10), o tempo que demora para o projétil percorrer a distância a fica:

$$T_a = \frac{a}{v_{\text{som}} - \frac{a \sqrt{v_{\text{som}}}}{C_b}}. \quad (5.11)$$

Lembrando que $\sin \theta = \frac{1}{M_a}$ e notando que $\alpha + \beta + \theta = \pi/2$, o novo valor da distância a é

$$a = D_0 \cos \beta \left(1 - \frac{\tan \beta}{\sqrt{M_a^2 - 1}} \right) \quad (5.12)$$

A Equação (5.12) é então substituída na Equação (5.10), que por sua vez é substituída na Equação (5.11) para encontrar um novo valor de distância a . O processo é repetido até que ocorra o erro entre dois valores consecutivos de a calculados esteja dentro de um limiar aceitável (0.01% neste projeto). Por fim, a distância D é calculada:

$$D = v_{\text{som}}(\tau_{\text{ms}} + T_a) + s, \quad (5.13)$$

onde

$$s = a \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}. \quad (5.14)$$

6 ANÁLISE DE DADOS

O intuito deste projeto foi analisar uma base de dados conhecida e verificar se o modelo proposto para a desaceleração do projétil apresenta resultados melhores na identificação do atirador, se comparada com o modelo de velocidade constante.

A base de dados analisada foi gravada no dia 13 de dezembro de 2011 no Centro de Avaliações do Exército (CAEx), localizado na Restinga de Marambaia (Rio de Janeiro). Ela contém sinais de disparo com o fuzil AGLC a partir de diferentes posições do atirador. Os sinais foram gravados por um arranjo de sete microfones (FIG. 6.1), em que as posições de cada microfone em relação ao centro do arranjo se encontram na tabela a seguir:

TAB. 6.1: Posições dos microfones no arranjo

	x	y	z
m_1	0.0310	0.04	0.266
m_2	-0.085	0.184	0.154
m_3	-0.204	0.014	-0.176
m_4	-0.085	-0.176	0.156
m_5	0.107	-0.175	-0.174
m_6	0.2310	0.004	0.160
m_7	0.1190	0.184	-0.170

Os disparos foram realizados em quatro configurações diferentes, sendo que em cada configuração foram realizados dez disparos (a exceção da última, na qual foram realizados nove). A TAB. 6.2 indica as posições do atirador e do centro do arranjo para o conjunto de disparos. O par atirador/arranjo para cada configuração é:

- Atirador em $S1$ e arranjo em $MA2$ - disparo a "300m";
- Atirador em $S2$ e arranjo em $MA1$ - disparo a "400m";
- Atirador em $S3$ e arranjo em $MA1$ - disparo a "500m";
- Atirador em $S4$ e arranjo em $MA1$ - disparo a "600m".

Às coordenadas verticais (z) dos atiradores, devemos somar a altura a partir do chão, 1.47m. Para essa base de dados, os sinais foram cortados manualmente.

TAB. 6.2: Posições do atirador e do arranjo

	x	y	z
<i>MA1</i>	32.7924	61.0907	5.8600
<i>MA2</i>	36.7724	152.8677	5.1250
<i>S1</i>	252.0584	249.3557	2.2460
<i>S2</i>	387.2154	248.3347	2.8550
<i>S3</i>	494.8654	246.4407	3.3600
<i>S4</i>	708.3734	157.7387	13.0700

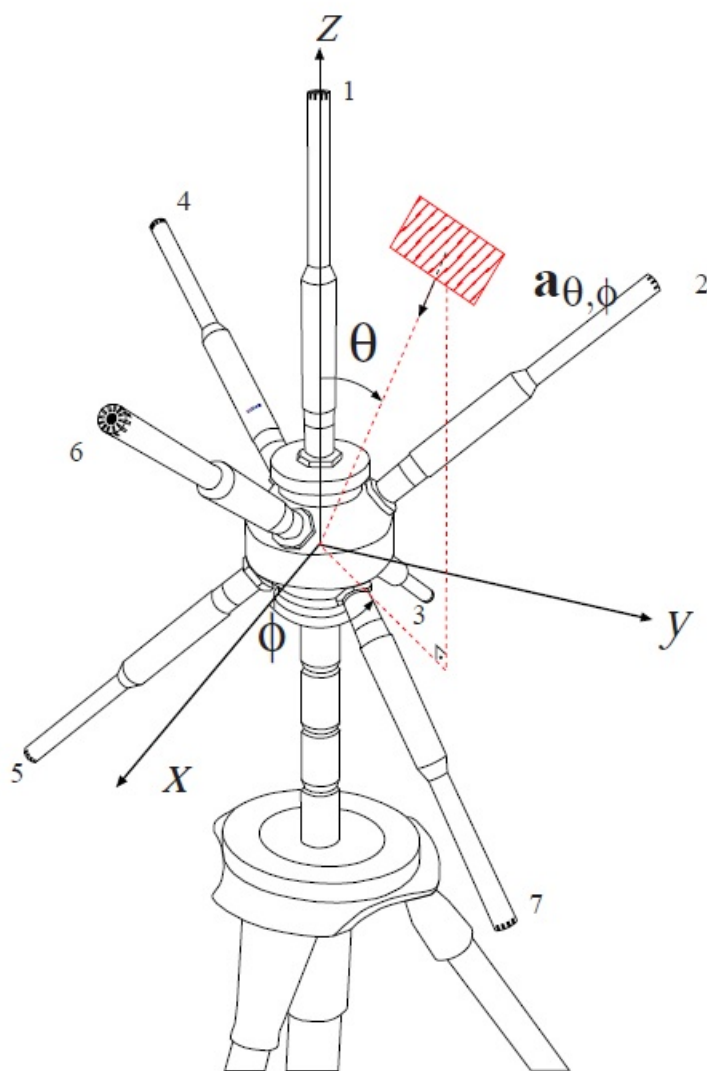


FIG. 6.1: Arranjo espacial de sete microfones (PRANDEL; APOLINÁRIO JR, 2014).

Os dados referentes às condições do ambiente a seguir são relativos ao Aeroporto de Jacarepaguá (SBJR) no dia 13 de dezembro de 2011:

- Temperatura: entre 30 graus Celsius (11am) e 33 graus Celsius (4pm);
- Umidade relativa do ar: entre 70% (11am) e 55% (4pm);
- Pressão: entre 1011hPa (11am) a 1007hPa (4pm);
- Vento: entre SSE 11.1km/h ou 3.1m/s (11am) e SE 13.0km/h ou 3.6m/s (4pm) com máximo SE 18.5km/h ou 5.1m/s (2pm);
- Visibilidade média do dia: 9.3km;
- Precipitação: 0.0mm.

Os diagramas de blocos a seguir ilustram o processo utilizado:

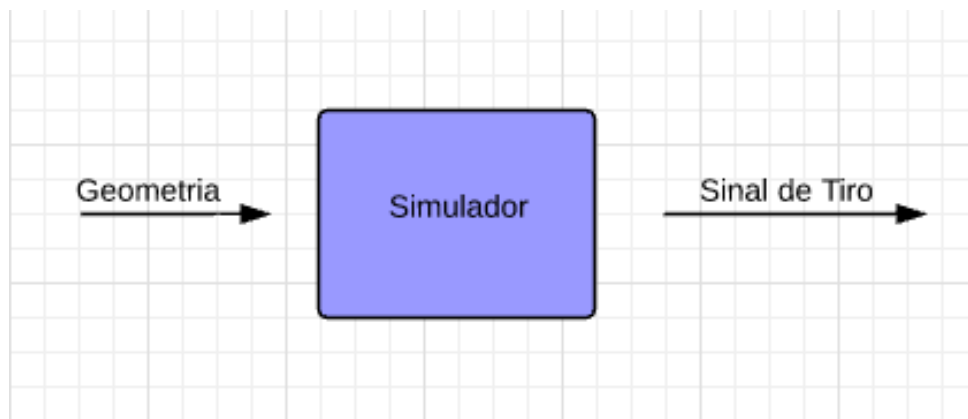


FIG. 6.2: Representação de diagrama de blocos do simulador.

Para cada uma das três configurações geométricas, utilizou-se o simulador para gerar dois sinais de tiro: um considerando que o projétil se desloca em velocidade constante e outro considerando o efeito da desaceleração. Cada um destes sinais foi passado por um filtro que exclui frequências médias (para a redução de ruído, deixando passar os sinais impulsivos gerados pelo disparo) e em seguida cortado manualmente nas suas componentes *MB* e *SW* (FIG. 6.3). Com as componentes separadas, foram usados algoritmos para estimar a direção de chegada de cada frente de onda e em seguida a distância (FIG. 6.4). Foram feitas estimativas de distância usando algoritmos de análise que consideravam velocidade constante e velocidade variável.

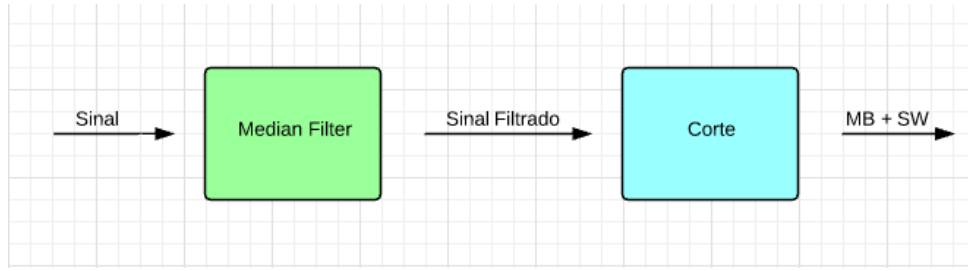


FIG. 6.3: Tratamento dos sinais antes de serem passados pelo analisador.

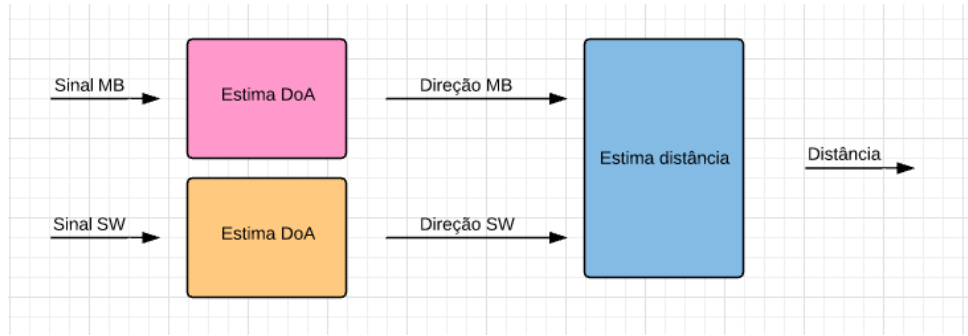


FIG. 6.4: Representação em diagrama de blocos do analisador.

TAB. 6.3: Resultados do simulador (distâncias em metros)

Distância correta	Distância Estimada	Distância Estimada	Distância Estimada	Erro (%)	Erro (%)	Erro (%)
	S: V cte A:V cte	S: V var A:V cte	S: V var A:V var	S: V cte A:V cte	S: V var A:V cte	S: V var A:V var
235.937	237.031	260.442	237.031	0.46	10.39	0.46
400.855	402.629	480.143	402.617	0.44	19.78	0.44
497.868	499.321	634.384	499.187	0.29	27.42	0.26
682.459	683.6692	1026.7073	682.839	0.18	50.44	0.06

A TAB 6.3 mostra que, quando o simulador gera um sinal sem considerar o efeito da desaceleração, a estimativa de distância do analisador ao também considerar velocidade constante no algoritmo de análise parece razoável (erro de 0.46% para a distância de 236m). Isso já não se torna mais verdade quando o sinal simulado é gerado com modelagem balística, mas o de análise não. Neste caso, vemos que é necessário que o analisador também considere a desaceleração do projétil para uma boa estimativa da distância. Em seguida, fazemos a análise de sinais reais, da base do CAEx. Após passarem pelos estágios descritos nas FIG. 6.3 e 6.4, obtemos os seguintes resultados:

TAB. 6.4: Resultados para atirador a 235.937m (distância em metros)

Número do Tiro	Distância Estimada V constante	Distância Estimada V variável
1	249.87	228.33
2	246.18	225.23
3	207.76	192.92
4	264.67	240.45
5	237.47	218.00
6	101.52	98.40
7	237.55	218.06
8	238.87	219.16
9	235.77	216.58
10	276.10	249.76
Média*	239.76	219.84
Desvio Padrão*	16.10	13.46
Erro(%)*	1.62	6.8

TAB. 6.5: Resultados para atirador a 400.855m (distância em metros)

Número do Tiro	Distância Estimada V constante	Distância Estimada V variável
1	412.42	354.36
2	432.24	368.73
3	409.99	352.58
4	441.99	375.84
5	414.28	355.73
6	541.78	445.06
7	546.27	448.06
8	167.54	158.65
9	527.47	434.88
10	455.31	385.21
Média*	454.43	384.05
Desvio Padrão*	52.05	36.42
Erro(%)*	13.37	4.2

TAB. 6.6: Resultados para atirador a 497.867m (distância em metros)

Número do Tiro	Distância Estimada V constante	Distância Estimada V variável
1	585.88	469.66
2	572.42	461.02
3	627.00	495.27
4	635.27	500.38
5	588.39	471.02
6	599.19	478.00
7	171.36	162.92
8	544.47	442.86
9	594.60	474.94
10	687.22	531.82
Média*	593.40	474.15
Desvio Padrão*	28.87	18.25
Erro(%)*	19.19	4.8

TAB. 6.7: Resultados para atirador a 682.46m (distância em metros)

Número do Tiro	Distância Estimada V constante	Distância Estimada V variável
1	1065.451	675.716
2	576.190	454.086
3	867.165	599.604
4	1116.679	697.574
5	119.464	2044.098
6	572.642	452.680
7	1193.677	710.586
8	1216.325	736.611
9	943.059	641.480
Média*	840.24	645.09
Desvio Padrão*	376.96	95.68
Erro(%)*	23.12	5.5

Para cada configuração, 10 disparos foram realizados (para a distância de 682.46m, foram 9 disparos). O maior e o menor valor de estimativa de distância foram descartados nos cálculos de média e desvio padrão (ou seja, temos uma média de oito tiros para as três primeiras distâncias e sete para a última). Percebe-se que, quanto maior a distância entre atirador e arranjo de microfones, mais importante será considerar o efeito da desaceleração.

Considerar o modelo balístico no cálculo da distância tornou nossas estimativas melhores, na média, exceto para o tiro de $236m$. Possíveis erros nestas estimativas podem se dever a hipóteses erradas de constante balística (foi utilizado $Cb = 90.82m^{-1}$ para o AGLC) e de velocidade inicial do projétil (foi escolhida $V_0 = 840m/s$), além de erros de estimativa de DoA, que se tornam mais relevantes a partir de $300m$ (LO; FERGUSON, 2008).

7 CONCLUSÃO

Comprovou-se, por meio do exposto neste trabalho, que as estimativas de distância a partir de sinais de tiros reais supondo velocidade do projétil constante apresentam considerável precisão até certas distâncias. Conforme a fonte do disparo se afasta do arranjo de microfones, a introdução de um modelo balístico que considere a desaceleração do projétil torna-se importante para melhorar esses resultados.

O sintetizador (simulador) de sinal de tiro desempenhou papel fundamental na realização deste projeto, tendo sido útil para verificar se os algoritmos de estimativa de *DoA* e distância estavam consistentes.

As principais dificuldades foram em relação à escolha do modelo balístico conveniente e a sua implementação em *MATLAB*, tanto no simulador quanto no analisador.

Com relação a trabalhos futuros, propõe-se testar outros algoritmos de estimativa de *DoA* e outros modelos balísticos, com o intuito de reduzir ainda mais o erro de estimativa de distância.

Este trabalho teve por objetivo estudar e verificar métodos que estimem a distância de um atirador a um arranjo de microfones conhecido, contribuindo para o desenvolvimento deste tema, que é atual e carece de mais soluções, principalmente no cenário brasileiro.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, P. C. L. D.; APOLINÁRIO JR, J. A. Sintetizador de sinais de tiro. **XXXIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações**, v. 33, 2015.
- BARGER, J. E.; MILLIGAN, S. D.; BRINN, M. S. ; MULLEN, R. J. Systems and methods for determining shooter locations with weak muzzle detection, 2010. Acesso em: US Patent 7,710,828.
- BEDARD, J.; PARE, S. Ferret: a small arms fire detection system: localization concepts. In: AEROSENSE 2003, 2003, p. 497–509.
- BENESTY, J.; CHEN, J. ; HUANG, Y. **Microphone array signal processing**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2008.
- CAPON, J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. **Proceedings of the IEEE**, v. 57, n. 8, p. 1408–1418, 1969.
- DUCKWORTH, G. L.; BARGER, J. E. ; GILBERT, D. C. Acoustic counter-sniper system, 2001. Acesso em: US Patent 6,178,141.
- FREIRE, I. L.; APOLINÁRIO JR, J. A. Localização de atirador por arranjo de microfones. **X Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**, v. 10, p. 1049–1053, 2011.
- GEORGE, J.; KAPLAN, L. M. Shooter localization using soldier-worn gunfire detection systems. In: INFORMATION FUSION (FUSION), 2011 PROCEEDINGS OF THE 14TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 2011, p. 1–8.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. ; WALKER, J. Fundamentos de física, volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica. **Rio de Janeiro: LTC**, v. 8, 2009.
- KNAPP, C.; CARTER, G. The generalized correlation method for estimation of time delay. **IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing**, v. 24, n. 4, p. 320–327, 1976.
- LAM, C. J.; SINGER, A. C. Bayesian beamforming for doa uncertainty: theory and implementation. **IEEE Transactions on Signal Processing**, v. 54, n. 11, p. 4435–4445, 2006.

LO, K. W.; FERGUSON, B. G. A ballistic model-based method for ranging direct fire weapons using the acoustic muzzle blast and shock wave. In: INTELLIGENT SENSORS, SENSOR NETWORKS AND INFORMATION PROCESSING, 2008. ISSNIP 2008. INTERNATIONAL CONFERENCE ON, 2008, p. 453–458.

PRANDEL, P. C.; APOLINÁRIO JR, J. A. Estimação da direção de disparo de arma de fogo: Uma implementação em tempo real. **Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação**, v. 3, n. 2, 2014.

STOICA, P.; MOSES, R. L. **Spectral analysis of signals**. [S.l.]: Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 2005.