

Localizando ponto de impacto de projétil Alto Explosivo (AE), empregando arranjo de microfones

Felipe Gonçalves Serrenho, Juliano Garcia do Carmo Ribeiro e José A. Apolinário Jr.

Resumo— Este trabalho apresenta uma forma de determinar a posição do impacto de um projétil Alto Explosivo (AE) utilizando arranjos de microfones. Três arranjos distintos são colocados em posições fixas e espaçadas entre si. Após a aquisição dos sinais, o algoritmo de Correlação Cruzada Generalizada é usado para obter o pico da correlação cruzada, de maneira a estimar a diferença de tempo de chegada do sinal para cada par de microfones no arranjo. Com as posições relativas dos microfones e os retardos temporais estimados, as direções de chegada são obtidas. A partir destas, é utilizado o método de mínimos quadrados para determinar a mais provável localização do ponto do impacto.

Palavras-Chave— Direção de Chegada, arranjo de microfones, localização de alvo

Abstract— This work presents a way to determine the impact position of a high-explosive projectile using microphone arrays. Three distinct arrays are placed in equally spaced and fixed positions. After signals acquisition, the Generalized Cross-Correlation Algorithm is applied to obtain the cross-correlation peak in order to estimate the time-difference of arrival of the signal to each pair of microphones in the array. According to the microphones relative positions and the estimated delays, the directions of arrival are obtained. Based on these estimates, the least squares method is used to determine the most probable coordinates of the impact position.

Keywords— Direction of arrival, microphone array, target localization

I. INTRODUÇÃO

A localização de alvos utilizando arranjos de sensores acústicos tem sido um tema amplamente estudado por pesquisadores de todo mundo, sendo um dos casos mais comuns a identificação da posição de um *sniper* [1], [2], [3]. Nesse trabalho, procura-se localizar o ponto do impacto de projéteis Alto Explosivos (AE).

Em testes de desempenho de munição para canhões, periodicamente realizados pelo fabricante, são realizados diversos tiros, os quais devem ter registrados os seus respectivos pontos de impacto. Até hoje, em muitos casos, esse processo é feito de forma manual, através da inspeção visual por elementos estrategicamente posicionados, estando sujeito a erros de avaliação dos envolvidos nos testes. Nesse trabalho, propõe-se um sistema para realizar a identificação do ponto de impacto por meio de arranjos de sensores acústicos. Nesse artigo, focou-se na estimação da Direção de Chegada (*DoA*, do inglês *Direction of Arrival*) e do ponto de impacto. A partir de gravações de sinais reais, foi elaborado um simulador que gera, para diferentes arranjos, os sinais de acordo com a

relação sinal-ruído (SNR) e os ângulos de chegada desejados. O simulador foi utilizado para comparar o desempenho dos arranjos na estimação da *DoA* e na localização do ponto de impacto.

Na Seção II é realizada uma rápida apresentação das técnicas utilizadas. Na Seção III-A são realizadas comparações entre o desempenho dos arranjos na estimação da *DoA* e do ponto de impacto. Na Seção III-B são apresentadas as condições em que foram feitos os experimentos e são avaliadas as gravações realizadas *in loco*. As conclusões são apresentadas na Seção IV.

II. TÉCNICAS

Descreve-se brevemente as técnicas empregadas na localização acústica do ponto de impacto assumindo que as explosões sejam fortes o suficiente para que se possa posicionar os sensores em distâncias seguras.

A. Detecção do Sinal de Impacto

Para realizar a captação do sinal do impacto da munição são utilizados no mínimo dois sistemas de sensores acústicos. Os arranjos de microfones considerados para a parte prática deste trabalho foram: linear de oito microfones com espaçamento de 10 cm; e espacial de 7 e 4 microfones de acordo com a Figura 1.

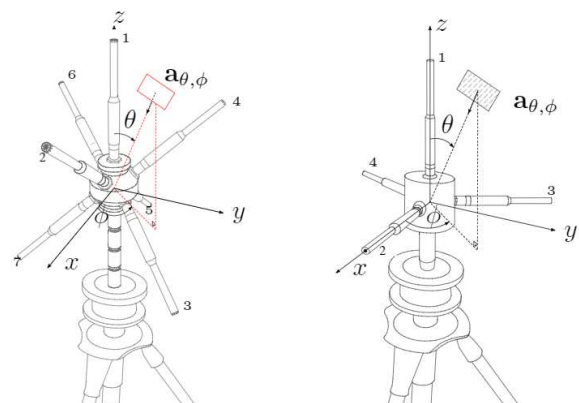


Fig. 1: Arranjo Espacial com 7 Microfones igual ao utilizado em [4] e de 4 Microfones igual ao utilizado em [1].

Nas gravações de campo foram utilizados microfones Behringer ECM8000 nos arranjos linear de 8 microfones e espaciais de 4 e 7 microfones. No arranjo espacial de 4 microfones também foram usados microfones dbx RTA-M. A Figura 2 mostra um sinal de interesse (impacto/explosão do projétil

Alto Explosivo) gravado utilizando um microfone ECM8000. Diferentes equipamentos (microfones, arranjos e conversores A/D) foram utilizados para definir uma melhor configuração do sistema e sua versão final.

A detecção do sinal de impacto pode ser feita, de uma maneira mais simples, usando-se correlação cruzada com um sinal modelo [5] ou usando técnicas mais sofisticadas [2], [3]. Estas fogem do escopo deste trabalho, onde buscou-se focar nos problemas de estimação da DOA e da localização da fonte sonora. Assim, o sinal de interesse foi adquirido e recortado manualmente com 0,5s de duração de cada sensor, preservando o atraso relativo entre os sinais de um mesmo arranjo.

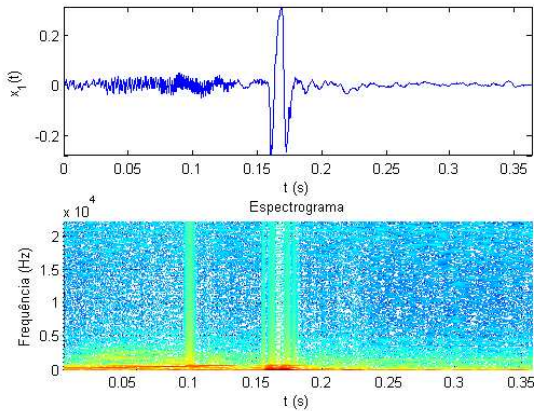


Fig. 2: Exemplo de um sinal de interesse nos domínios do tempo (acima) e da frequência (abaixo).

B. Estimação do DoA

A escolha do algoritmo baseado na TDoA (*Time Difference of Arrival*), o *Generalized Cross Correlation (GCC)*, motivou-se pela sua utilização direta em sinais de banda larga (como é o presente caso) bem como sua menor complexidade computacional [6], o que viabiliza uma implementação em tempo real. Para cada par de microfones (i, j) disponível, é encontrado o valor $\tau_{i,j}$ (usando a GCC com função de peso PHAT) que corresponde a uma estimativa da diferença de tempo de chegada do sinal (de natureza impulsiva) entre os microfones i e j .

Para os sinais de som x_i e x_j de N amostras, frequência de amostragem f_s e Transformadas de Fourier correspondentes X_i e X_j , a Transformada de Fourier da GCC-PHAT, $R_{i,j}$ é dada por $R_{i,j} = \frac{X_i X_j^*}{|X_i X_j^*|}$.

A GCC-PHAT $r_{i,j}$ é a inversa da Transformada de Fourier de $R_{i,j}$ e o retardo $T_{i,j}$ é dada por:

$$T_{i,j} = \arg_{-\tau_{MAX} \leq \tau \leq \tau_{MAX}} \max r_{i,j}(\tau),$$

onde τ_{MAX} corresponde ao retardo máximo que ocorre quando a frente de onda vem na direção da reta que une os microfones “i” e “j”. Assim, o $\tau_{i,j}$ em unidade de tempo (s) é dado por $\tau_{i,j} = \frac{T_{i,j}}{f_s}$. É possível melhorar a estimativa de $T_{i,j}$ fazendo uma interpolação ao redor do seu máximo original para encontrar um valor mais preciso [7].

Para estimar a direção de chegada, o vetor unitário em tal direção, \mathbf{a}_{DoA} , é dado por:

$$\mathbf{a}_{DoA} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta) \cos(\phi) \\ -\sin(\theta) \sin(\phi) \\ -\cos(\theta) \end{bmatrix},$$

onde θ é o zênite ou elevação e ϕ o azimute.

Para o cálculo do \mathbf{a}_{DoA} , foi utilizado o fato de que o retardo $\tau_{i,j}$ vale:

$$\tau_{i,j} = \frac{(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)^T \mathbf{a}_{DoA}}{v_s} = \frac{\Delta \mathbf{p}_{i,j}^T \mathbf{a}_{DoA}}{v_s} = \Delta \bar{\mathbf{p}}_{i,j}^T \mathbf{a}_{DoA},$$

\mathbf{p}_i e \mathbf{p}_j sendo as coordenadas dos pontos i e j , $\Delta \mathbf{p}_{i,j}$ o vetor diferença das posições, v_s a velocidade do som e $\Delta \bar{\mathbf{p}}_{i,j}$ o vetor $\Delta \mathbf{p}_{i,j}$ dividido pelo valor da velocidade do som.

Cria-se a função de custo (mínimos quadrados) dada por $\xi = \sum (\tau_{i,j} - \Delta \bar{\mathbf{p}}_{i,j}^T \mathbf{a}_{DoA})^2$, que minimizada resulta em:

$$\mathbf{a}_{DoA} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{p},$$

onde $\mathbf{R} = \Delta \mathbf{p}^T \Delta \mathbf{p}$, $\Delta \mathbf{p}$ sendo a matriz das diferenças de posição 2 a 2 (cada linha é um $\Delta \bar{\mathbf{p}}_{i,j}$), $\boldsymbol{\tau}$ o vetor coluna com os valores de cada $\tau_{i,j}$ correspondente e $\mathbf{p} = \Delta \mathbf{p}^T \boldsymbol{\tau}$.

Existe a possibilidade de alguns pares de microfones apresentarem erros em suas DoAs devido ao ruído, posicionamento ou reflexões sonoras, causando interferências que comprometem a estimativa da direção de chegada. Para minimizar o problema dessas DoAs com erro espúrio, foi implementado o algoritmo *Exhaustive Search (ES)* proposto em [8].

O algoritmo de *ES(n)* minimiza a função de custo ξ para n pares de microfones dentre o total de pares possível. A seleção automática de n em função do SNR pode ser implementada através de uma árvore de decisão conforme feito em [9].

C. Estimação da localização de Impacto

A fim de reduzir a possibilidade de erro e a complexidade do problema, não foi priorizada a sincronização dos diferentes arranjos, mas apenas dos microfones num mesmo arranjo. Assim, a localização é estimada apenas com as DoAs.

O algoritmo dos Mínimos Quadrados (LS, de *Least Squares*) utiliza as DoAs de cada conjunto de sensores, cuja localização é dada por r_k , para achar a localização mais provável da fonte sonora através da minimização da função custo $\sum_k d_k^2$, onde d_k é a distância do ponto estimado de impacto para a reta calculada pela estimação do DoA do arranjo k , conforme indicado na Figura 3.

O algoritmo Mínimos Quadrados Total (TLS, de *Total Least Squares*) foi proposto em [10] com a finalidade de identificar a posição de emissores eletromagnéticos. Em [11] é feita uma comparação entre os algoritmos: TLS, LS, Transformada de Hough Generalizada (*GHS - Generalized Hough Transform*), Filtro de Kalman Sem Rasto (*UKF - Unscented Kalman Filter*) e o Minimax, com o algoritmo TLS apresentando os resultados mais precisos na maioria dos cenários.

De acordo com [12] a solução do algoritmo TLS é:

$$\hat{\mathbf{p}}_{\text{TLS}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} - \sigma_s^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}$$

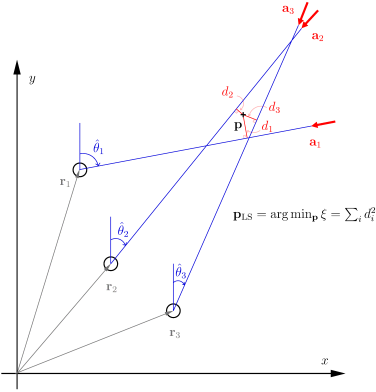


Fig. 3: Técnica LS com 3 arranjos: a posição provável da fonte sonora fornecida pelos mínimos quadrados das distâncias é dada pelo vetor \mathbf{p}_{LS} .

onde σ_S^2 é o menor valor singular da matriz $[\mathbf{A} \ \mathbf{b}]$, sendo que $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sin(90^\circ - \theta_1) & -\cos(90^\circ - \theta_1) \\ \vdots & \vdots \\ \sin(90^\circ - \theta_L) & -\cos(90^\circ - \theta_L) \end{bmatrix}$ e $\mathbf{b} = \begin{bmatrix} r_{x_1} \sin(90^\circ - \theta_1) - r_{y_1} \cos(90^\circ - \theta_1) \\ \vdots \\ r_{x_L} \sin(90^\circ - \theta_L) - r_{y_L} \cos(90^\circ - \theta_L) \end{bmatrix}$, com r_{x_k} e r_{y_k} sendo as coordenadas da posição do arranjo k , e θ_k a DoA do arranjo k , conforme indicado na Figura 3.

III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A. Simulação

Com base no sinal real, mostrado na Figura 2, foi implementado um simulador de sinais capaz de sintetizar sinais para os arranjos discutidos na seção II-A. A SNR foi definida neste trabalho dentro de uma janela de 0,5s e computada por

$$SNR_{db} = 10 \log \left(\frac{\hat{\sigma}_x^2 - \hat{\sigma}_r^2}{\hat{\sigma}_r^2} \right),$$

onde $\hat{\sigma}_x^2$ é a variância estimada do sinal gravado (porção de 0,5s do sinal contendo o sinal de interesse), $x(t) = s(t) + r(t)$, $s(t)$ sendo o sinal de interesse e $r(t)$ o ruído (porção sem o sinal de interesse).

Para o sinal de tiro simulado, utilizou-se um recorte do sinal de tiro real. Para o ruído, isolou-se uma porção do sinal apenas com ruído e foi realizada uma modelagem auto-regressiva de ordem 10, de maneira que a cada nova realização era gerado o ruído branco gaussiano e em seguida filtrado pelo modelo auto-regressivo. Dessa forma, consegue-se obter ruídos diferentes, mas com conteúdo espectral similar ao original.

Para avaliar o desempenho de cada arranjo, foram realizados 7 grupos de 500 iterações, em cada grupo era considerado um diferente nível de SNR. Os resultados encontram-se sumarizados na Tabela I para o arranjo linear, na Tabela II para o espacial de sete microfones e na Tabela III para o espacial de quatro microfones. Em todos os casos, a frequência de amostragem utilizada foi 48kHz, os ângulos de chegada horizontais foram gerados aleatoriamente a cada iteração de forma a serem uniformemente distribuídos entre 45° e 135°

e a elevação foi fixada em 90°, que corresponde a explosão ocorrendo na mesma altura dos arranjos de sensores. Para o arranjo linear, foi estimada a DoA do arranjo para $n = 2, 3, 4, 5$ e 28 pares de microfones. No caso do arranjo espacial de 7 microfones, foi estimada a DoA para $n = 4, 5, 6$ e 21 pares. Para o arranjo espacial de 4 microfones, a DoA foi estimada utilizando $n = 4, 5$ e 6 pares de microfones. Nas tabelas são apresentados os valores de “n” mais precisos em cada caso.

TABELA I: Resultados da simulação com arranjo linear

SNR	Sem Interpolação		Com Interpolação		Qtd de Pares
	Erro Médio (graus)	Desvio Padrão (graus)	Erro Médio (graus)	Desvio Padrão (graus)	
-10	2,1328	46,9272	2,1319	46,8738	3
-5	2,2701	44,4722	2,0468	44,7521	3
0	-0,0178	10,8796	-0,0232	10,9238	2
5	0,0888	1,275	0,0521	1,1091	5
10	0,0068	0,1009	0,0048	0,0568	28
15	-0,0107	0,1097	-0,0040	0,0348	28
20	-0,0005	0,1	-0,0005	0,0248	28

TABELA II: Resultados da simulação com arranjo espacial de 7 microfones

SNR	Sem Interpolação		Com Interpolação		Qtd de Pares
	Erro Médio (graus)	Desvio Padrão (graus)	Erro Médio (graus)	Desvio Padrão (graus)	
-10	90,2987	105,8288	90,2983	105,8297	4
-5	89,1348	108,0989	89,1357	108,1000	5
0	26,3922	71,5977	26,4294	71,5758	5
5	0,0239	0,5288	0,0208	0,4417	6
10	0,0063	0,1490	-0,0008	0,0909	21
15	0,0081	0,1314	0,0007	0,0547	21
20	-0,0050	0,1207	0,0013	0,0342	21

TABELA III: Resultados da simulação com arranjo espacial de 4 microfones

SNR	Sem Interpolação		Com Interpolação		Qtd de Pares
	Erro Médio (graus)	Desvio Padrão (graus)	Erro Médio (graus)	Desvio Padrão (graus)	
-10	86,8948	103,9735	86,8954	103,9727	4
-5	96,8193	106,7054	96,8193	106,7053	5
0	77,2793	105,5131	77,2901	105,5133	4
5	-0,0002	0,3202	0,0001	0,2522	6
10	0,0089	0,2126	0,0050	0,1128	6
15	0,0050	0,1863	-0,0013	0,0632	6
20	0,0065	0,1869	0,0022	0,0371	6

Os desempenhos dos 3 arranjos, quando simulados, são semelhantes. O arranjo linear apresenta melhor precisão para SNR de 0 dB, demonstrando maior robustez ao ruído. Quando a SNR tem valor alto, utilizar maior número de pares gera uma estimacão mais precisa, enquanto que para SNR baixa a relação se inverte. Isto se deve ao fato de que um sinal menos ruidoso tem menor probabilidade de apresentar pares comprometidos. A interpolação, conforme esperado, melhorou significativamente as previsões. É esperado que o efeito da interpolação se torne mais efetivo em situações em que a frequência de amostragem seja mais baixa.

Para a avaliação do desempenho dos algoritmos LS e TLS, foram realizadas 3 simulações. Em todos os casos, foram considerados 3 arranjos iguais e uma mesma área de impacto, conforme a Tabela IV. Os três Postos de Observação (PO1 a PO3) correspondem aos indicados na Figura 4. As simulações consideraram SNRs de 0 a 20dB, tendo sido realizadas 100 iterações para cada configuração, onde a cada iteração era selecionado aleatoriamente, de forma linear tanto no eixo x como no eixo y, um ponto dentro da área impacto. Os resultados estão dispostos nas Tabelas de V a VIII.

TABELA IV: Posições utilizadas nas simulações de localização

Posição	X[m]	Y[m]	Z[m]
PO1	1760,1	229,4	6
PO2	1236,8	178,9	7
PO3	0	0	4
ÁREA DE IMPACTO	1129,2 ± 500	-1482,3 ± 500	0

TABELA V: Arranjos Lineares alinhados com o eixo x

SNR	ALGORITMO LS		ALGORITMO TLS	
	Erro Médio [m]	Desvio Padrão [m]	Erro Médio [m]	Desvio Padrão [m]
0	725,5297	1177,7411	141189,3600	1400975,7721
5	79,9398	48,3093	80,5447	48,5035
10	20,4685	4,6244	20,4739	4,6266
15	19,6871	4,1106	19,6906	4,1121
20	19,8019	3,5495	19,8046	3,5518

De acordo com as Tabelas V e VI, nota-se que a orientação do arranjo linear influencia significativamente na precisão da localização, ou seja, o ângulo de chegada horizontal afeta a precisão da *DoA* do arranjo linear. Isto faz com que os arranjos espaciais possuam desempenho melhor na estimação da posição do impacto, apesar de possuírem desempenho ligeiramente inferior no cálculo da *DoA* quando limitou-se o ângulo de chegada horizontal no intervalo de 45° a 135° . Dentre os arranjos espaciais, o com 7 microfones apresentou desempenho levemente superior, o que era esperado, uma vez que ele utiliza mais sensores. Analisando as tabelas, ainda se pode destacar que os algoritmos *LS* e *TLS* apresentaram resultados equivalentes, com ambos algoritmos gerando resultados aceitáveis para sinais com SNR acima de 5 dB.

B. Dados reais

Num primeiro experimento real, gravações de um único ponto de observação de impactos de Projéteis 4.5"AE disparados de um Canhão 4.5" Mk8 foram realizadas no Centro de Avaliações do Exército (CAEx), na Restinga da Marambaia, Rio de Janeiro-RJ. A distância do tiro foi de aproximadamente 19.2km. Postos de Observação (PO-1, PO-2 e PO-3 na Fig. 4) foram dispostos, respectivamente, a 1.600m, 1.200m e 1.600m do ponto de impacto teórico, o qual foi estimado de maneira convencional, utilizando-se a Tabela de Tiro da referida munição.



Fig. 4: Local onde foram realizados os testes.

Os sinais foram gravados no PO-2 utilizando-se dois aparelhos distintos: a Interface de Audio Presonus Audiobox 1818VSL USB e o Gravador Digital Zoom F8, ambos de 8 canais. A frequência de amostragem do Audiobox foi de 44.1kHz, enquanto que o Zoom F8 usou 48kHz, 24 bits por amostra em ambos casos.

TABELA VI: Arranjos Lineares voltados para o centro da área do impacto

SNR	ALGORITMO LS		ALGORITMO TLS	
	Erro Médio [m]	Desvio Padrão [m]	Erro Médio [m]	Desvio Padrão [m]
0	200,4331	163,5822	204,1808	168,2327
5	42,5166	20,9603	42,5372	20,9343
10	4,0405	2,3743	4,0402	2,3742
15	3,6489	1,9468	3,6486	1,9463
20	3,3789	1,4624	3,3788	1,4623

TABELA VII: Arranjos Espaciais de 7 microfones

SNR	ALGORITMO LS		ALGORITMO TLS	
	Erro Médio [m]	Desvio Padrão [m]	Erro Médio [m]	Desvio Padrão [m]
0	1007,7450	901,6103	1541,3704	4209,2292
5	9,3640	9,6226	9,3687	9,6722
10	4,6596	3,5662	4,6594	3,5675
15	2,5546	1,8191	2,5546	1,8187
20	1,5344	1,1181	1,5342	1,1182

A SNR dos tiros gravados com o microfone ECM8000 variaram de 50 dB até aproximadamente 70 dB, já os sinais gravados com o dbx RTA-M possuem SNR de 30 dB a 40 dB. Com esses valores, de acordo com os resultados simulados da Seção III-A, é possível estimar a *DoA* e, conseqüentemente, o ponto de impacto com grande precisão.

Para cada tiro foram determinadas uma série de *DoAs* e seus ângulos relativos ao Norte geográfico utilizando a função $ES(n)$ variando o número de pares n . Para o arranjo de 7 microfones, foram testados de 4 a 21 pares, enquanto que para o arranjo de 4, apenas de 4 a 6 pares. Para o arranjo linear de 8 microfones, de 3 a 6 e de 25 a 28 pares. Após análise, concluiu-se que 5 pares para as geometrias espaciais e 4 para a geometria linear produziram os melhores resultados.

Observa-se na Tabela IX que enquanto os valores do ângulo encontrados pelo AudioBox (tiro 4) divergem entre si com a consideração de mais pares, o Zoom F8 (tiro 5) possui variações menores. Tal fato sugere o uso do gravador digital Zoom F8 como melhor opção. A falta de coerência nos resultados dos sinais gravados pelo AudioBox necessitam de uma investigação mais cuidadosa. De imediato, pode-se suspeitar de uma falta de *throughput* na comunicação USB do conversor A/D com o laptop, da utilização de um gerador nas gravações de campo (com suas típicas variações de tensão, amplitude e frequência maiores que as tipicamente encontradas na rede elétrica) e do software de gravação multicanal utilizado. Diminutos atrasos introduzidos entre as pistas de gravação, embora não perceptíveis para aplicações de áudio, podem comprometer seriamente o cálculo da *DoA*.

Na Figura 5, pode-se observar as marcações (*DoAs*) dos três diferentes arranjos. Nos três Postos de Observação, observadores munidos de teodolitos plotaram a direção dos pontos de impacto de maneira manual e, após proceder a interseção destas direções, para cada ponto de impacto, estimaram suas coordenadas, que aparecem indicadas na referida figura. Pode-se ressaltar que esse método, além de depender de condições climáticas (vento, neblina, etc) e de possíveis erros humanos, possui erros intrínsecos ao método que se acredita serem minimizados com o processamento automático dos sinais acústicos, sempre que se tiver uma SNR elevada (baixo nível de ruído) na captação dos sinais de impacto.

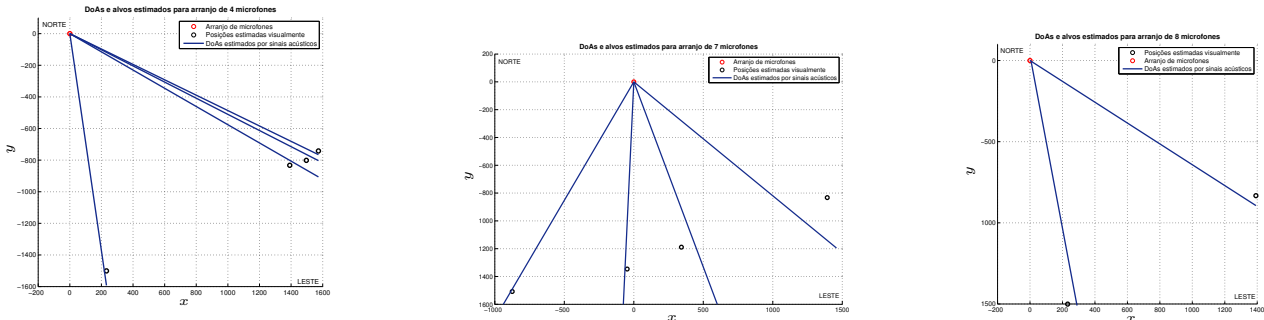


Fig. 5: Resultados do experimento com sinais reais: arranjo com 4 microfones (esquerda), com 7 microfones (centro) e com 8 microfones (direita).

TABELA VIII: Arranjos Espaciais de 4 microfones

SNR	ALGORITMO LS		ALGORITMO TLS	
	Erro Médio [m]	Desvio Padrão [m]	Erro Médio [m]	Desvio Padrão [m]
0	1848,9915	1310,4833	2818,1274	3703,8672
5	10,6762	7,5722	10,6862	7,5669
10	4,8581	3,6696	4,8592	3,6734
15	2,6824	1,9784	2,6813	1,9793
20	1,9378	1,1592	1,9377	1,1591

TABELA IX: DoAs de sinais reais estimados por $ES(n)$: $\phi_{esperado} = 177.9812^\circ$ (Tiro 5) e $\phi_{esperado} = 163.9274^\circ$ (Tiro 4) obtidos pelo método convencional

n	ϕ Tiro 5	ϕ Tiro 4	n	ϕ Tiro 5	ϕ Tiro 4
4	183,3070	142,5437	13	173,4668	50,7717
5	172,1428	158,7988	14	166,2075	45,9452
6	171,6099	158,0949	15	171,7648	50,4182
7	165,4180	158,4478	16	166,3506	68,9013
8	172,1420	159,5774	17	170,6484	74,6106
9	170,3028	159,9209	18	170,1896	74,7747
10	172,4991	144,9461	19	174,3774	89,5968
11	169,8779	52,4263	20	167,8228	89,4930
12	170,3707	46,9537	21	168,1122	91,1705

IV. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos sugerem que as técnicas utilizadas possuem grande potencial para melhorar a estimação de ponto de impacto de projétil Alto Explosivo em relação ao método convencional, automatizando e melhorando a precisão do processo.

Os desempenhos dos arranjos foram similares, com a geometria espacial tendo resultados levemente melhores, devido ao fato do arranjo linear apresentar maiores erros quando um sinal se aproxima por uma de suas extremidades. Os microfones utilizados tiveram bom desempenho, com o ECM 8000 se sobressaindo sobre o dbx. Ambos capturaram sinais com valores de SNR superiores a 10 dB, valor mínimo para obter resultados precisos na estimação do ponto de impacto, conforme as simulações realizadas.

Quando comparados, os gravadores digitais tiveram desempenhos diferentes. O Audiobox apresentou mais sinais comprometidos que o Zoom F8. Apesar de ainda ser necessário um maior estudo para determinar com certeza a fonte dos erros das gravações realizadas com o Audiobox, pode-se afirmar que o Zoom F8 é mais adequado para a aplicação em questão.

Os próximos passos irão envolver a realização das gravações *in loco* com três arranjos simultaneamente e em locais distintos, viabilizando a determinação do ponto de impacto no caso real. Também deve-se avaliar o desempenho de cada tipo de

arranjo em campo, pois fatores como o lóbulo de recepção, a robustez a ruídos oriundos de vento, entre outros, não foram considerados no modelo teórico utilizado.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à EMGEPRON e ao CAEx que, de diferentes maneiras, se envolveram neste projeto e permitiram alcançar um primeiro resultado na solução de um problema de grande interesse às Forças Armadas. Agradecemos ainda ao Eng. Jorge Bonfim pelo indispensável apoio na coleta de dados e às agências de fomento CAPES (Edital PRODEFESA, Processo: 2992/2013) e CNPq (Edital Universal, Processo: 456901/2014-0) pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] Izabela L. Freire, J. Antonio Apolinário Jr., "GCC-based DoA Estimation of Overlapping Muzzleblast and Shockwave Components of Gunshot Signals," *IEEE Second Latin American Symposium on Circuits and Systems (LASCAS)*, 2011.
- [2] T.Ahmed, M.Uppal, A.Muhammad, "Improving Efficiency and Reliability of Gunshot Detection Systems," *IEEE International Conference on Audio Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, 2013.
- [3] J.R. Aguilar, "Gunshot Detection Systems in Civilian Law Enforcement," *Journal of the Audio Engineering Society*, 2015.
- [4] P. César Prandel, J. Antonio Apolinário Jr., "Estimação da Direção de Disparo de Arma de Fogo: Uma Implementação em Tempo Real," *REVISTA DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO*, vol. 3, no. 2, 2014.
- [5] Izabela L. Freire, J. Antonio Apolinário Jr., "Gunshot detection in noisy environment," *SBrt/IEEE International Telecommunications Symposium (ITS)*, 2010.
- [6] B. V. D. Broeck, A. Bertrand, P. Karsmakers, B. Vanrumste, H. Van hamme, and M. Moonen, "Time-domain generalized cross correlation phase transform sound source localization for small microphone arrays," *5th European DSP Education and Research Conference (EDERC)*, pp. 76–80, 2012.
- [7] Izabela L. Freire, J. A. Apolinário Jr., "Doa of gunshot signals in a spatial microphone array: performance of the interpolated generalized cross-correlation method," 2011.
- [8] Ângelo M.C.R. Borzino, J. A. Apolinário Jr., Marcello L.R. de Campos, "Robust doa estimation of heavily noisy gunshot signals," 2015.
- [9] —, "Consistent DoA estimation of heavily noisy gunshot signals using microphone array," *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2016.
- [10] K. D. Rao, D. C. Reddy, "A new method for finding electromagnetic emitter location," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 30, pp. 1081–1085, 1994.
- [11] Edilson Celestino dos Santos, "Avaliação de desempenho de algoritmos de localização de emissores de RF baseados em medidas de marcação em um cenário naval," *Dissertação de Mestrado, Instituto Militar De Engenharia*, 2017.
- [12] I. Markovsky, S. Huffel, "Overview of Total Least Squares methods," *Signal Processing*, vol. 87, pp. 2283–2302, 2007.