

Aplicações da Acústica para Observação do Oceano

Paulo Jorge Maia dos Santos

Instituto Superior de Engenharia, Universidade do Algarve



VII Jornadas de Engenharia Acústica Desafios da Engenharia Acústica em Portugal



19 de abril, 2024

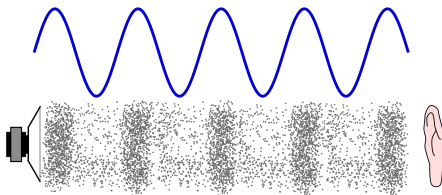
- 1 Sumário
- 2 Introdução
- 3 Generalidades do Campo Acústico
- 4 Tecnologia: pressão versus velocidade das partículas
- 5 Tipos de Sensores Vetoriais
- 6 Aplicações - Dados Experimentais
- 7 Conclusão

- Introdução;
- Generalidades do Campo Acústico;
- Tecnologia: pressão versus velocidade das partículas;
- Tipos de Sensores Vetoriais;
- Aplicações - Dados Experimentais:
 - Makai 2005 - Estimação da Direção de Chegada (*DOA estimation*) e Inversão Geoacústica;
 - REX 2017 - estimação do ângulo azimute, determinação da distância da fonte, caracterização do fundo e localização passiva de fontes;
 - MARREAL 2022 - comparação da resposta dada por uma estrutura de 4 hidrofones planares e um único sensor vetorial, para estimação do ângulo azimute usando ruído de embarcações;
- Conclusões.

- 1 Sumário
- 2 Introdução**
- 3 Generalidades do Campo Acústico
- 4 Tecnologia: pressão versus velocidade das partículas
- 5 Tipos de Sensores Vetoriais
- 6 Aplicações - Dados Experimentais
- 7 Conclusão

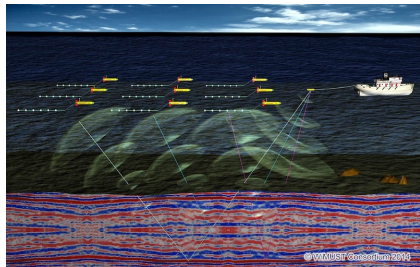
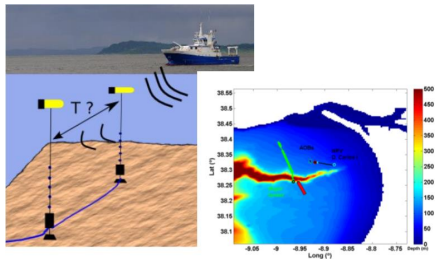
Introdução - Alguns Factos

- Propagação do som num fluido é feita por ondas mecânicas (necessidade de um meio) com deslocamentos longitudinais;
- A propagação do som não transporta matéria só energia;
- Ao nível macroscópico: **a pressão é uma grandeza escalar**, a sua representação é dada por compressões e rarefações;
- Ao nível microscópico: **campo vetorial**, movimento das partículas em torno de um ponto médio, dá-nos a direção e a magnitude;



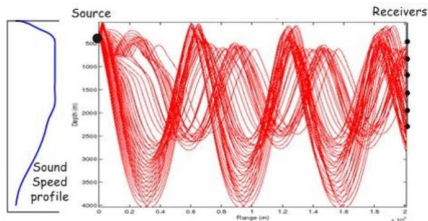
Introdução - Objetivos

- compreender os princípios e as definições da pressão acústica *versus* o movimento das partículas;
- revisão da tecnologia existente para aplicações oceânicas;
- vantagem do uso da velocidade das partículas em aplicações oceânicas;
- dados experimentais;



- 1 Sumário
- 2 Introdução
- 3 Generalidades do Campo Acústico**
- 4 Tecnologia: pressão versus velocidade das partículas
- 5 Tipos de Sensores Vetoriais
- 6 Aplicações - Dados Experimentais
- 7 Conclusão

Generalidades do Campo Acústico - Factos



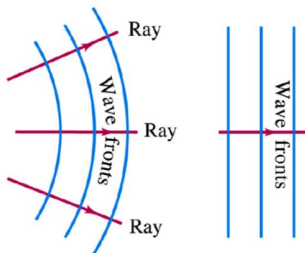
- ondas acústicas propagam-se melhor no oceano do que no ar;
 - existe um canal sonoro (**SOFAR** - *sound fixing and ranging channel*);
 - o sinal e o ruído usam o mesmo canal sonoro.
-
- os factores mais importantes na propagação acústica no oceano são: variação da velocidade do som na coluna de água, características do fundo e da superfície (que inclui a batimetria ao longo da distância), as posições relativas da fonte e recetor;
 - na presença de muitas fontes existem muitos canais sonoros;

Generalidades do Campo Acústico - Factos

Considera-se uma **onda plana**, aquela em que pontos com a mesma fase são planos e as frentes de onda são paralelas. Um sinal sonoro pode ser representado por:

$$s(x, t) = s_0 \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x - ct)\right]; \quad (1)$$

onde t é o tempo e c a velocidade do som.



Sendo:

$$c = \frac{\lambda}{T} = f\lambda; \quad (2)$$

$$c = \frac{\lambda}{T} \frac{2\pi}{2\pi} = \frac{\omega}{k} \quad (3)$$

sendo k o número de onda.

Assim, (1) pode ser escrita:

$$s(x, t) = s_0 \sin(kx - \omega t); \quad (4)$$

Generalidades do Campo Acústico - Factos

A pressão do som (**p**) é uma grandeza escalar enquanto que o movimento das partículas (dado pela sua velocidade, **v** ou aceleração, **a**) é uma grandeza vetorial; ambas as grandezas são importantes para os animais aquáticos, embora uns captam só **p**, alguns captam **v** e muitos captam ambos **p** e **v**.

- **Pressão do som (p)** - é a diferença (aumento ou diminuição) da pressão à frente e atrás da onda gerada pelo movimento quando esta viaja ao longo do meio;
- **Velocidade das partículas (v)** - é o movimento mecânico para trás e para a frente de pequeníssimas partículas da água. A longas distâncias, a pressão sonora sobrepõe-se ao movimento da partículas.

- 1 Sumário
- 2 Introdução
- 3 Generalidades do Campo Acústico
- 4 Tecnologia: pressão versus velocidade das partículas
- 5 Tipos de Sensores Vetoriais
- 6 Aplicações - Dados Experimentais
- 7 Conclusão

Tecnologia: pressão versus velocidade das partículas;

Hidrofones: medem só a pressão acústica ($p(t)$), grandeza escalar e são omnidirecionais.



Através do momento acústico linearizado - Equação de Euler, a velocidade das partículas, vetor (\vec{v}), e a pressão acústica estão relacionadas através de:

$$-\nabla p = \rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}; \quad (5)$$

onde t é o tempo e ρ a densidade.

Portanto, para um sinal sinusoidal a uma determinada frequência ω e numa aproximação de onda plana, as componentes da velocidade das partículas podem ser escritas pelo gradiente da pressão (derivação):

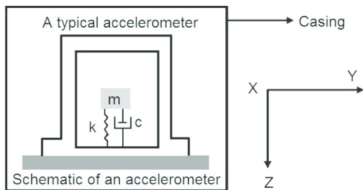
$$V_i(\omega) = -\frac{1}{j\rho\omega} \frac{\partial P(\omega)}{\partial i}, \quad \text{onde } i = x, y \text{ or } z, \quad (6)$$

Tecnologia: pressão versus velocidade das partículas

Por outro lado, a velocidade das partículas também pode ser obtida através da aceleração usando (integração):

$$V_i(\omega) = \frac{\rho c}{j\omega} A_i(\omega) = \frac{\rho}{jk} A_i(\omega), \quad i = x, y \text{ or } z, \quad (7)$$

atualmente a forma mais comum.



Um acelerómetro é um dispositivo que mede a vibração ou a aceleração do movimento de uma estrutura (ou massa).

A força (F) provocada pela vibração ou variação do movimento (a , aceleração) faz com que a massa "comprima" o material piezoelétrico, produzindo uma carga elétrica que é proporcional à força exercida sobre ela

$a = \frac{F}{m}$, $F = Kx$ é proporcional ao deslocamento x , através da constante da mola K .

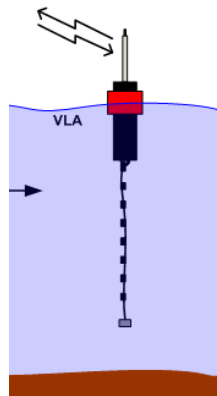
Problemas e dificuldades:

- Durante muitos anos, a medição da velocidade das partículas na água não era possível, usando as cerâmicas piezoelétricas convencionais;
- A flutuação neutra na água era um problema devido às dimensões de tais materiais;
- Desenvolver um sensor de velocidade de partículas de alta sensibilidade e baixo ruído num pequeno envólucro flutuante era um desejo durante décadas;
- Hoje em dia, com o desenvolvimento de novos materiais piezoelétricos, denominados cristais PMN-PT (Niobato de Chumbo e Magnésio/Titanato de Chumbo) tornou possível o desenvolvimento de tal **sensor**;
- As propriedades piezoelétricas destas materias são 7 a 10 vezes maiores que as convencionais cerâmicas piezoelétricas, reduzindo o peso e o tamanho dos sensores.

Technologia: Como é que o oceano pode ser *escutado*?

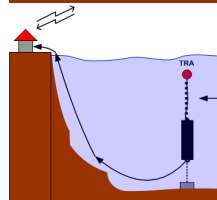
Pesquisas Acústicas Passadas/Atuais

- Uso de longas antenas de hidrofones;
- Atracadas ou à deriva;
- Rebocadas por um navio;



Atual investigação - simplificação

- Melhorar a eficácia das atuais pesquisas;
- Uso de AUV's para rebocar os equipamentos;
- Uso de Sensores Vetoriais (acelerómetros);



Recordando que a velocidade das partículas pode ser obtida a partir do gradiente de pressão ou usando acelerómetros → Atualmente o dispositivo mais comum.

Acelerómetro Tri-axial:

Modelo: PCB356A17

Banda de frequências: 0.5 - 4000 Hz

Sensibilidade: 51mV/m s⁻²

Resolução: 0.0006 m/s² rms

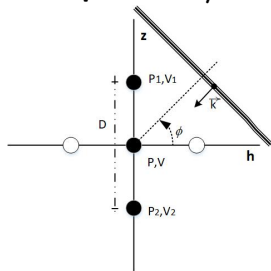
Dimensões (A × C × L):

→ 14.0 mm × 20.3 mm × 14.0 mm

Peso: 9.3 g



Usando pressão e/ou combinação da velocidade das partículas ¹



Considerando que $P(\omega)$, $V_x(\omega)$, $V_y(\omega)$ e $V_z(\omega)$ são as transformadas de Fourier da pressão e das componentes x , y , e z da velocidade das partículas, respetivamente.

A velocidade pode assim ser obtida do gradiente da pressão como:

$$\frac{P_1(\omega) - P_2(\omega)}{D} = \frac{P(\omega)e^{j\omega \frac{D}{2c} \sin(\phi)} - P(\omega)e^{-j\omega \frac{D}{2c} \sin(\phi)}}{D} \simeq jk \sin(\phi) P(\omega), \quad (1)$$

ou através da aceleração:

$$V_i(\omega) = \frac{\rho c}{j\omega} A_i(\omega) = \frac{\rho}{jk} A_i(\omega), \quad i = x, y \text{ or } z, \quad (8)$$

[1] P. Felisberto, P. Santos and S. M. Jesus, Acoustic pressure and particle velocity for spatial filtering of bottom arrivals, IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 44, Issue 1, pp 179-192, January 2019.

Usando pressão e/ou combinação da velocidade das partículas ¹

$$V_z(\omega) = \frac{\rho c}{j\omega} A_z(\omega) = \frac{\rho}{jk} A_z(\omega), \quad \text{na direção } z, \quad (9)$$

$$\tilde{P}(\omega) = P(\omega) + V_z(\omega), \quad (10)$$

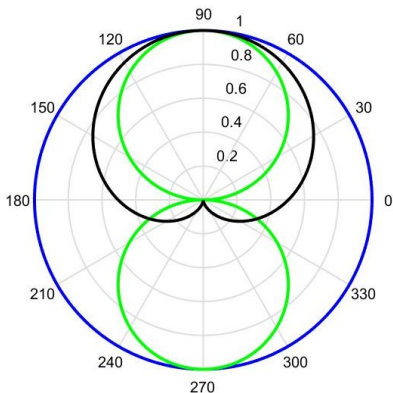


Diagrama de Radiação

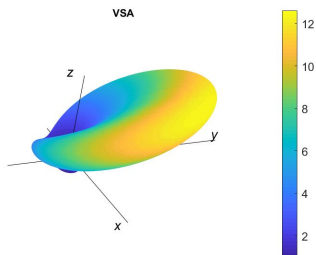
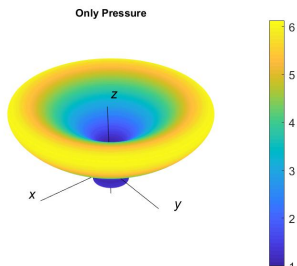
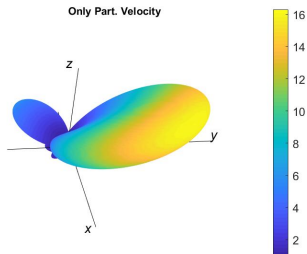
- Só Pressão (blue)
- Só Velocidade (green) \rightarrow (9);
- Press+Vel (black) \rightarrow (10);

[1] P. Felisberto, P. Santos and S. M. Jesus, Acoustic pressure and particle velocity for spatial filtering of bottom arrivals, IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 44, Issue 1, pp 179-192, January 2019.

Tecnologia: pressão versus velocidade das partículas

Ex. Diagrama de Radiação em 3D:

- Antena linear vertical;
- 4 sensores;
- frequência = 750 Hz;
- Ângulo de Azimute = 45° ;
- Ângulo de Elevação = 30° ;



- 1 Sumário
- 2 Introdução
- 3 Generalidades do Campo Acústico
- 4 Tecnologia: pressão versus velocidade das partículas
- 5 Tipos de Sensores Vetoriais**
- 6 Aplicações - Dados Experimentais
- 7 Conclusão

Wilcoxin TV-001

- Um hidrofone;
- Três acelerómetros uni-axiais;



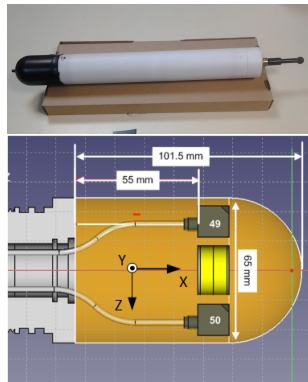
2D Geo Spectrum M35

- Um hidrofone;
- Dois sensores (dipolos) (2D);
- Depth = 1000 m;



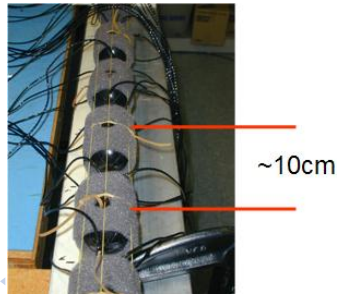
DAVS

- Um hidrofone;
- Dois acelerómetros tri-axiais;



Vector Sensor Array (VSA) - sensores vetoriais

- Os sensores vetoriais surgiram nos anos 80 como uma potencial alternativa aos hidrofones omnidirecionais:
 - Vantagens das antenas de sensores vetoriais (VSA) → capacidade de filtragem espacial verificada na estimação da Direção de Chegada (DOA estimation);
 - Sistemas de elevada diretividade em contraste com os tradicionais hidrofones;
 - A informação direcional obtida por um sensor vetorial permite VSA de pequena abertura e alto desempenho;
- Cada elemento: 1 hidrofone omnidirecional & 3 acelerómetros numa configuração tri-axial;
- Sensores do tipo TV-001, Wilcoxin Research Inc.



DAVS - Dual Accelerometer Vector Sensor

Desenvolvimento ²

Parte Acústica

Hyd.: SM412(PZT-5A)

Acc.: 2 × PCB356A17

Banda: 0.5 - 4000 Hz

Sens.: 51mV/m s⁻²

Resol.: 0.0005 m/s²

Dims.: 101.5 × Ø 65 mm

Parte da Aquisição

Resolução: 24 bits

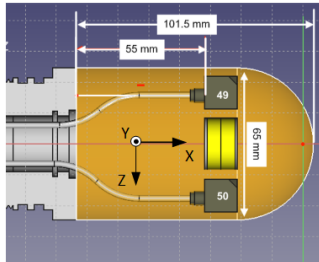
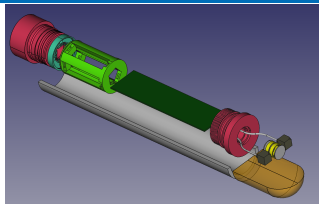
Memória: SD128GB

Autonomia: 12 hours

Outros: tilt, gyro, T, D

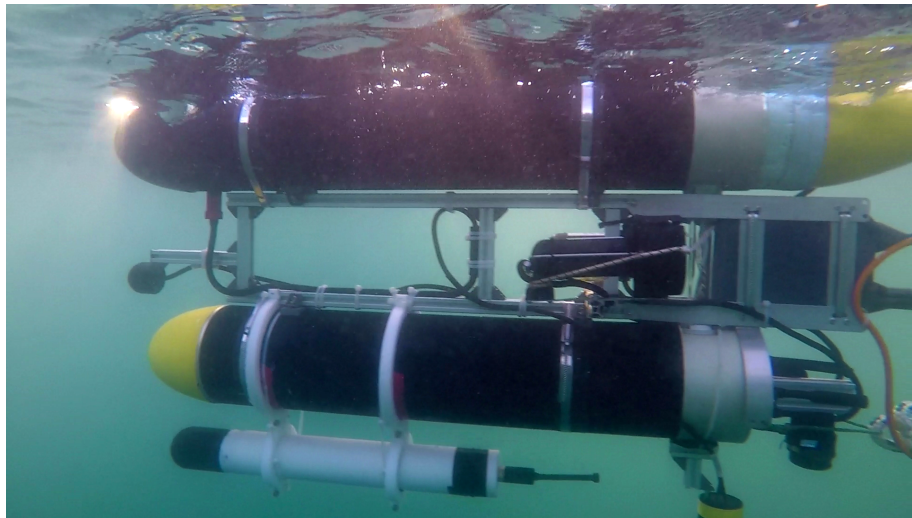
Dims.: 585 × Ø 65 mm (**total**)

[2] A. Mantouka, P. Felisberto, P. Santos, F. Zabel, M. Saleiro, S. M. Jesus and L. Sebastião, Development and testing of a Dual Accelerometer Vector Sensor for AUV acoustic surveys, Sensors, volume 17 (number 1328), pp. 1-12, 2017.



DAVS - Dual Accelerometer Vector Sensor

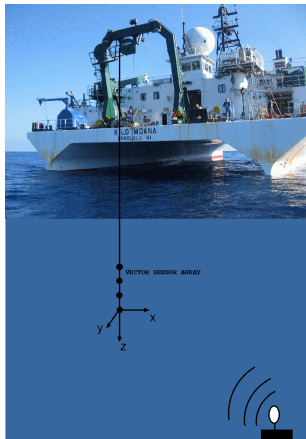
Montado num AUV



- 1 Sumário
- 2 Introdução
- 3 Generalidades do Campo Acústico
- 4 Tecnologia: pressão versus velocidade das partículas
- 5 Tipos de Sensores Vetoriais
- 6 Aplicações - Dados Experimentais**
- 7 Conclusão

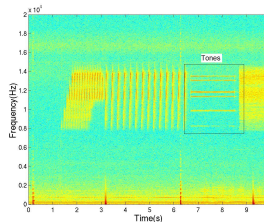
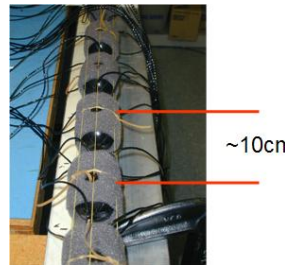
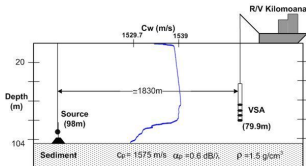
Antena de sensores vetoriais (VSA)

Experiência Makai 2005



VSA com 4 elementos usado para:

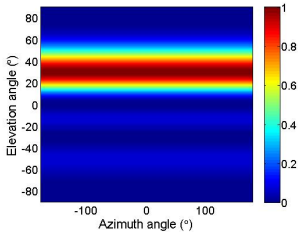
- Estimação da DOA;
- Inversão Geoacústica (parâmetros do fundo)



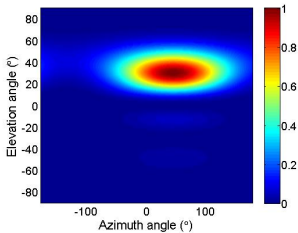
Resultados da experiência Makai 2005³

• Estimação DOA

p -only



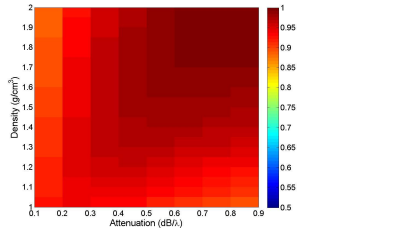
VSA



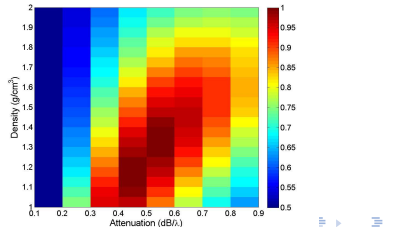
• Inversão Geoacústica

Densidade vs. Atenuação Compressional

p -only



V_z -only



[3] P. Santos, Ocean Parameter Estimation with High-Frequency signals using a Vector Sensor Array, PhD Thesis, University of Algarve 2012

Experiência REX'17 juntou CINTAL(Faro) e INESC-TEC (Porto)

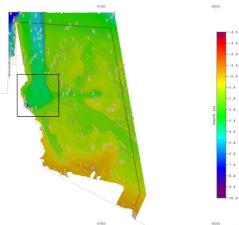
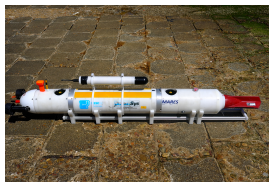
Objetivos - Testar o DAVS montado num AUV (MARES) e ancorado de modo a obter-se:

- Autolocalização (EV1): determinação do ângulo azimute em movimento e localização da fonte 3D com sinais ativos;
- Caracterização do fundo (EV2): MARES navega a uma velocidade constante, cobrindo uma área em torno da fonte, para exploração do fundo;
- Segurança de portos (EV3): DAVS ancorado e adquirindo o ruído produzido por barcos para deteção da DOA de intrusos.

Resultados da Experiência REX 2017

REX'17 configuração da experiência

REX'17 realizou-se na Base Naval do Alfeite, Lisboa, entre os dias 11 e 13 de julho, 2017.



Evento 1 and 2:

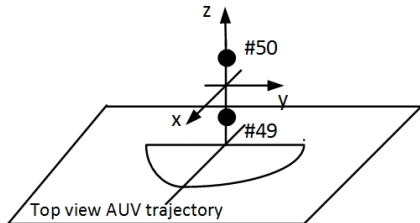
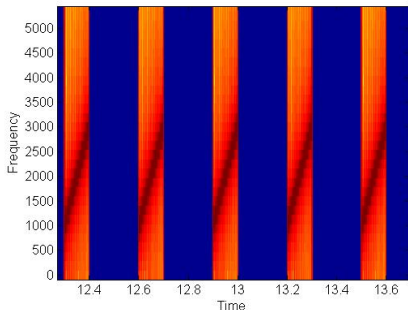
- **Prof. DAVS:** $\approx 0.5 m$ abaixo MARES
- **Prof. de navegação AUV:** $\approx 1.2 m$
- **Fonte Lubell:** colocada a $3 m$ do fundo, numa coluna de água desde $\approx 4.5 m$ a $\approx 6.5 m$

Evento 3:

- **DAVS ancorado a:** $\approx 2.5 m$
- **Prof. navegação AUV:** $\approx 2 m$

DAVS - Resultados Experimentais

Configuração - EV1 e EV2



Sinais emitidos pela Lubell

- **LFM:** 100 ms, $f = 1$ kHz a 3 kHz, seguido de 200 ms silêncio.
- Frequência de amostragem 10547 Hz.

Estimação do azimute baseado em ⁴

$$\hat{\Theta}_S = \arctan 2 \frac{\langle v_y(t)p(t) \rangle}{\langle v_x(t)p(t) \rangle},$$

[4] P. Felisberto, P. Santos, O. C. Rodríguez, E. Ey and S. M. Jesus, Experimental results of underwater cooperative source localization using a single acoustic vector sensor, *Sensors*, vol. 13, no. 7, July 2013, pp 8856-8878.

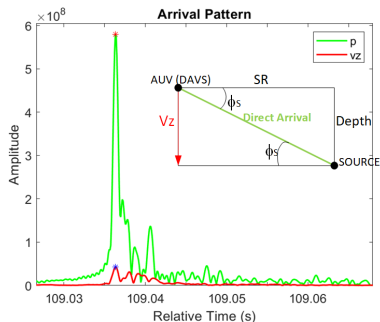
Distância à fonte baseada em ⁵

Elevação estimada por:

- 1) $\hat{\phi}_S = \arcsin \frac{A_{vz}}{A_p}$;
- 2) $\hat{\phi}_S = \arcsin \frac{A_{vdv}}{A_{pv}}$;

e distância à fonte estimada por:

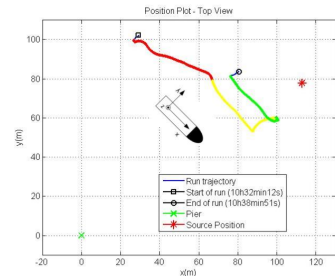
- 3) $SR = \frac{\text{depth}}{\tan(\hat{\phi}_S)}$.



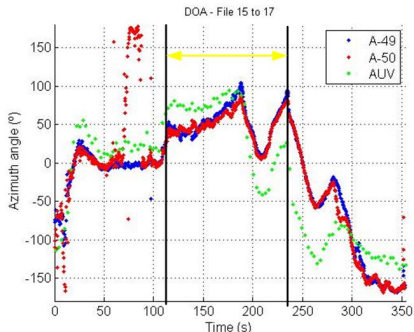
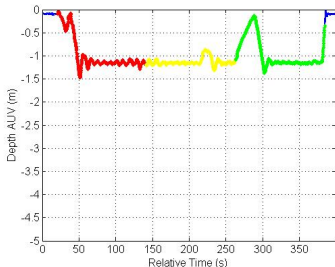
[5] P. Felisberto, P. Santos and S. M. Jesus, Acoustic pressure and particle velocity for spatial filtering of bottom arrivals, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 44, Issue 1, pp 179-192, January 2019.

DAVS - Resultados Experimentais (EV1)

Estimação do ângulo Azimute



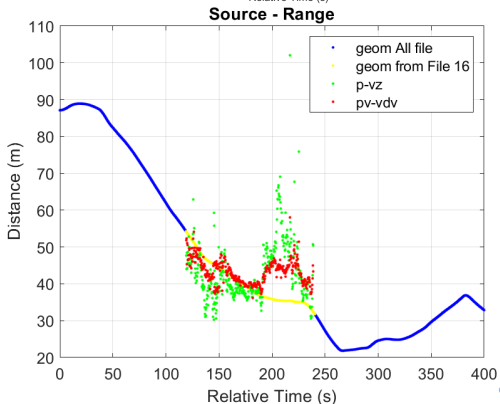
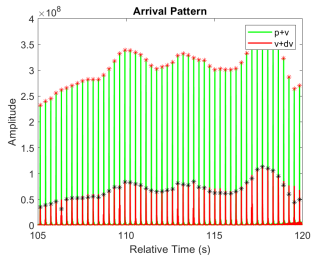
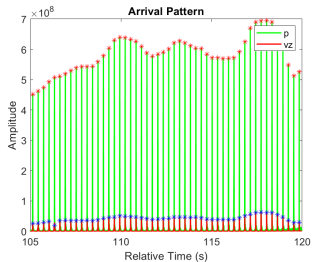
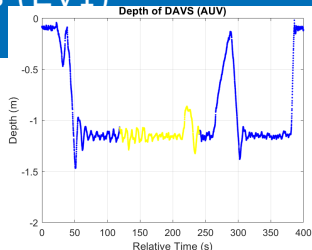
MARES AUV trajectory



- Diretividade validada para longos períodos de tempo;
- Não existe influência do ruído dos propulsores.

DAVS - Resultados Experimentais (EV1)

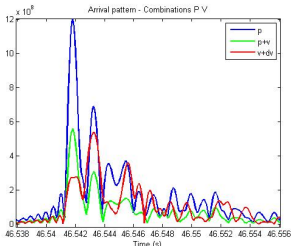
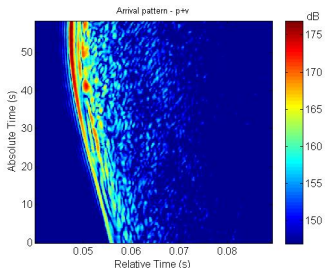
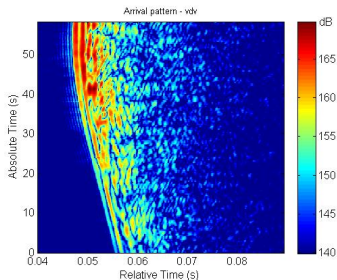
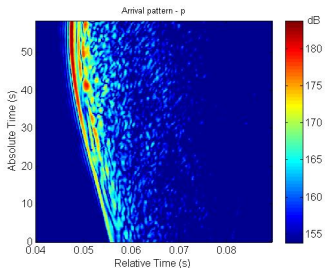
Estimação da Distância à fonte



DAVS - Resultados Experimentais (EV2)

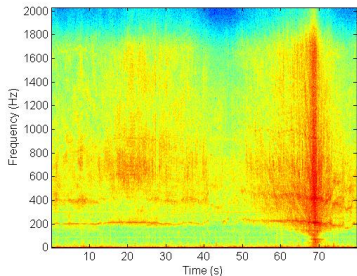
Caracterização do Fundo

Parte do trecho Amarelo da trajetória do AUV

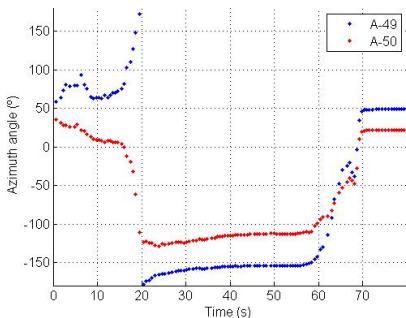


DAVS - Resultados Experimentais (EV3)

Estimação do ângulo Azimute usando sinais passivos



Trajetória do Barco

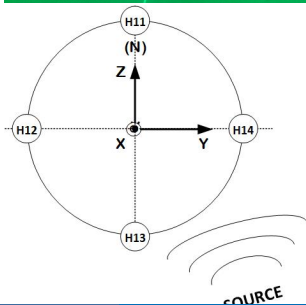
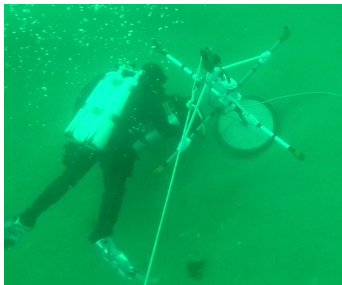
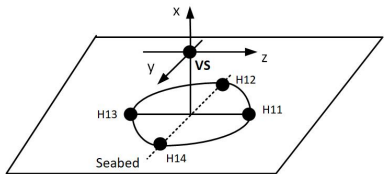


- Diretividade elevada mesmo para sinais de baixa SNR;
- Útil para deteção de intrusos a tempo real.

Resultados da Experiência MARREAL'2022

Configuração experiência

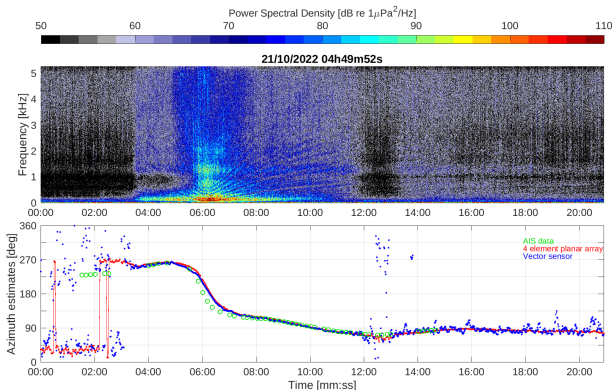
Área de observação:
Porto da Baleeira, Sagres.



Resultados da Experiência MARREAL'2022

Comparação da estimação do Azimute por conjunto de 4 hidrofones e 1 sensor vetorial

Resultados Experimentais do seguimento do Azimute de um barco de pesca com sistema AIS⁶:

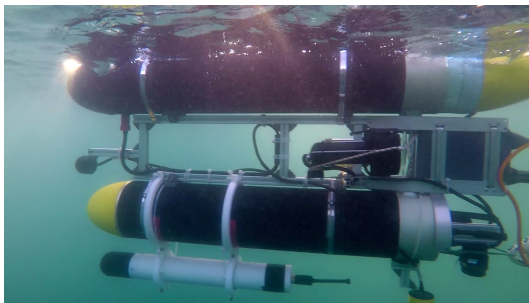


[6] Soares, Cristiano; Zabel, Friedrich; Santos, Paulo; Silva, António. Comparing Noise Vessel Azimuth Tracking with a Planar Hydrophone Array and a Single Vector Sensor. In Advances in Sustainability Science and Technology, 192-203. Portugal: Springer Nature Switzerland, 2023.

- 1 Sumário
- 2 Introdução
- 3 Generalidades do Campo Acústico
- 4 Tecnologia: pressão versus velocidade das partículas
- 5 Tipos de Sensores Vetoriais
- 6 Aplicações - Dados Experimentais
- 7 Conclusão**

- Utilização da acústica para observação do oceano;
- Como o oceano pode ser ouvido? - uso de hidrofones e sensores vetoriais;
- Comparação da resposta dos sensores de pressão com os sensores vetoriais;
- Vantagem do uso de sensores vetoriais em aplicações submarinas - simplificação de sistemas;
- Resultados experimentais, para obtenção:
 - localização de fontes em 3D: estimação de ângulos e distância;
 - caracterização do fundo;
 - vantagem do uso de sensores vetoriais para detecção em tempo real de fontes passivas - possível detecção de intrusos.

Conclusão



Perguntas????....

Muito obrigado pela
vossa presença ...

