



# ANÁLISE DO ESPALHAMENTO DE RETARDO EM ÁGUAS RASAS VOLTADO ÀS COMUNICAÇÕES ACÚSTICAS SUBMARINAS

Alexandre Geddes Lemos Guarino  
Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM)  
Rua Kioto, 253-Praia dos Anjos, Arraial do Cabo-RJ, 28930-000, Brasil  
[guarino@ieapm.mar.mil.br](mailto:guarino@ieapm.mar.mil.br)

Fabio Contrera Xavier  
Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM)  
Rua Kioto, 253-Praia dos Anjos, Arraial do Cabo-RJ, 28930-000, Brasil  
[contrera@ieapm.mar.mil.br](mailto:contrera@ieapm.mar.mil.br)

***Resumo:** A propagação horizontal da energia acústica no mar é caracterizada pelo mecanismo do multipercurso que provoca o espalhamento do sinal no tempo, também chamado de espalhamento de retardo ou “delay spread”. Esse espalhamento, por sua vez, causa interferência intersimbólica (ISI) em sistemas de comunicações digitais, degradando a qualidade e a velocidade das comunicações. Portanto, conhecer o seu comportamento é uma necessidade e este trabalho tem o propósito de apresentar resultados de simulações realizadas com o modelo de propagação “Bellhop”, relacionando o comportamento do espalhamento de retardo com variações de profundidade dos transdutores hidroacústicos, das propriedades do fundo, do perfil de velocidade do som e da profundidade local.*

***Palavras-chave:** Espalhamento de Retardo; Interferência Intersimbólica; Bellhop.*

***Abstract:** The horizontal propagation of acoustic energy in the sea is characterized by the multipath mechanism that causes the signal spreading in time, also called “delay spread”. This spread, in turn, causes intersymbol interference (ISI) in digital communications systems, degrading the quality and throughput of communications. Therefore, know its behavior is a necessity and this work aims to present the results of simulations with the propagation model “Bellhop”, relating the behavior of the delay spread with variations of hydroacoustic transducers depth, sea bottom properties, sound speed profiles and local depth .*

***Keywords:** Delay spread; Intersymbol Interference; Bellhop.*

## 1. Introdução

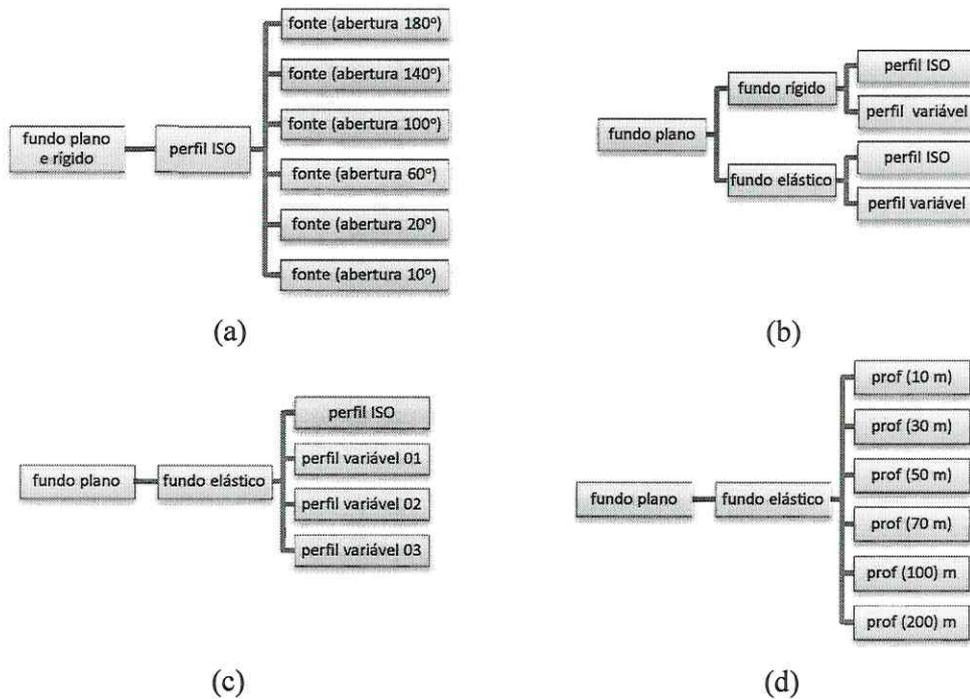
Em águas rasas, a propagação horizontal do sinal acústico ocorre principalmente devido ao confinamento da energia entre a superfície e o fundo do mar, que se comportam como um guia de ondas natural. Ao utilizarmos esse guia para o transporte de informação num sistema de comunicações, observamos que o canal produz um eco no sinal transmitido, devido ao seu mecanismo de propagação característico: o multipercurso. A consequência é o espalhamento do sinal no tempo que chamamos de

espalhamento de retardo ou “delay spread ( $\sigma_\tau$ )”, ou seja, ao transmitirmos um sinal com duração de “ $\tau$ ” segundos, na recepção o sinal possuirá “ $\tau + \Delta t$ ” segundos.

Num sistema de comunicações digitais, que se baseia na transmissão de símbolos em intervalos regulares de tempo, os ecos dos símbolos podem interferir nos símbolos vizinhos, o que resulta em interferência intersimbólica (ISI) e degradação das comunicações. Se aumentarmos demais o intervalo entre os símbolos, diminuimos a ISI, mas também diminuimos a taxa de transferência de símbolos ( $R_b$ ), que impacta diretamente na velocidade das comunicações. Conhecer, portanto, o comportamento do espalhamento do sinal no tempo é uma necessidade na otimização de  $R_b$ . Nesse contexto, esse trabalho tem o propósito de apresentar resultados de simulações realizadas com o modelo de propagação “Bellhop” (PORTER, 2011), relacionando o comportamento do espalhamento de retardo com variações de profundidade dos transdutores hidroacústicos, das propriedades do fundo, do perfil de velocidade do som e da profundidade local.

## 2. Metodologia das Simulações

Visando a identificar os fatores que influenciam no comportamento do espalhamento de retardo, as condições de contorno do guia de ondas foram subdivididas nos seguintes cenários ilustrados na Figura 01:



**FIGURA 01.** Cenários de realização das simulações.

Em todos os casos a superfície do mar foi considerada perfeitamente lisa. Os cenários têm o objetivo de mostrar as influências no espalhamento de retardo devido: (a) à variação da abertura angular da fonte, (b) à inserção de um fundo com características constitutivas reais em comparação com um fundo rígido, (c) à influência do perfil de velocidade do som e (d) à influência da profundidade.

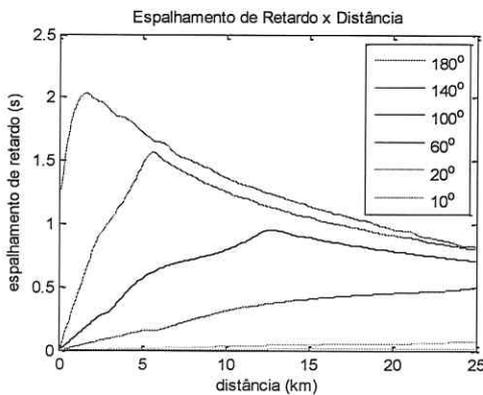
Os espalhamentos de retardo foram obtidos utilizando as amplitudes elevadas ao quadrado e respectivos atrasos dos “eigen rays” calculados com o modelo “Bellhop”, fornecendo, assim, o perfil de retardos  $P_h(\tau)$ , que aplicado nas equações 1 e 2, resulta no atraso médio ( $\tau_m$ ) e no espalhamento de retardo ( $\sigma_\tau$ ) do canal (SCHOBER e JONDRAL).

$$\tau_m = \frac{\int_0^\infty \tau P_h(\tau) d\tau}{\int_0^\infty P_h(\tau) d\tau} \quad (1) \quad \sigma_\tau = \left( \frac{\int_0^\infty (\tau - \tau_m)^2 P_h(\tau) d\tau}{\int_0^\infty P_h(\tau) d\tau} \right)^{1/2} \quad (2)$$

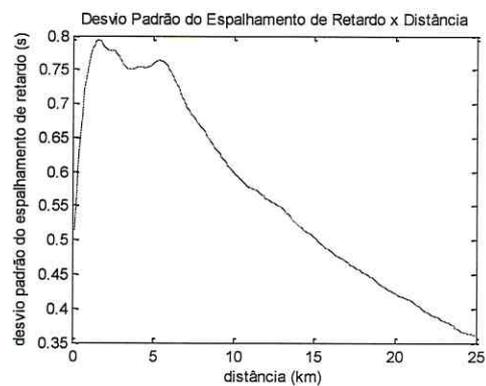
### 3. Resultados

#### 3.1. Cenário “a”

O cenário “a” tem o propósito de identificar os efeitos no espalhamento de retardo ao utilizarmos fontes ou projetores direcionais com diferentes aberturas angulares. Nas simulações foram consideradas respostas direcionais constantes nas faixas analisadas, sendo iguais a zero nas demais direções (resposta direcional ideal). Os resultados são mostrados nas Figuras 02 e 03, considerando uma profundidade de 30 m e distância até 25 km.



**Figura02.** Espalhamento de Retardo x Distância.

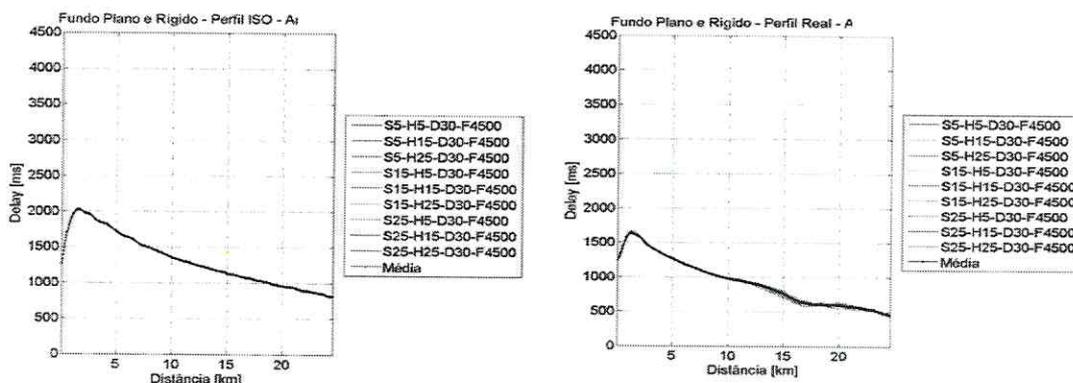


**Figura03.** Desvio Padrão do Espalhamento de Retardo x Distância.

Alguns aspectos importantes podem ser observados. Inicialmente, o espalhamento de retardo ( $\sigma_\tau$ ) aumenta, pois na medida em que o hidrofone se afasta do projetor, mais raios chegam ao destino, até um valor máximo de  $\sigma_\tau$ . Ao aumentar mais ainda a distância, os raios com ângulos elevados em relação à horizontal acabam por percorrer distâncias muito maiores, sofrendo, por conseguinte, mais atenuação, que resulta numa diminuição do espalhamento de retardo no destino. Segundo, pode-se observar que menores aberturas da fonte proporcionam menores níveis de espalhamento de retardo pelos motivos já expostos. Terceiro, na medida em que abertura da fonte diminui, o pico do espalhamento de retardo se afasta da transmissão. Quarto, a Figura 02 indica que, quanto maior for a distância entre fonte e hidrofone, menores serão as diferenças de  $\sigma_\tau$  para fontes com aberturas angulares diferentes. Esse fato pode ser observado na Figura 03 que apresenta o desvio padrão entre as curvas da Figura 02.

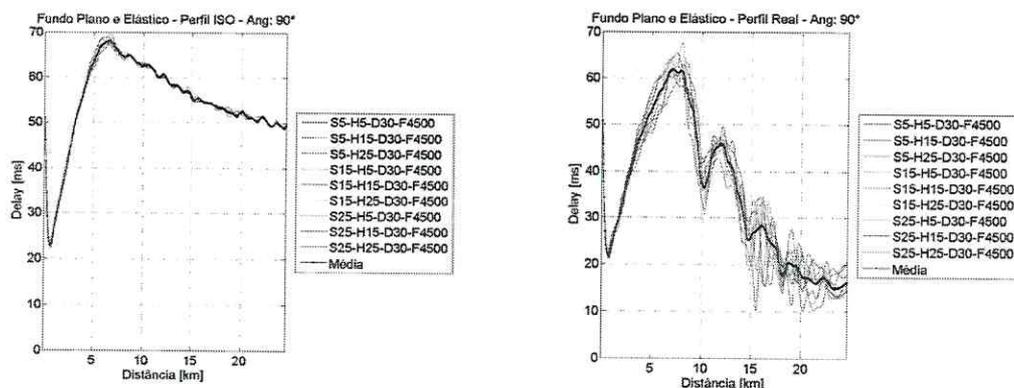
### 3.2. Cenário “b”

O cenário “b” tem o propósito de identificar os efeitos no espalhamento de retardo ao considerarmos fundos rígido e elástico, com perfis de velocidade do som ISO e variável. Os fundos são mantidos planos nessa análise visando a identificar apenas as influências na mudança de um fundo rígido para um fundo com características constitutivas reais, típicas de Arraial do Cabo, bem como na mudança de um perfil de velocidade do som ISO para um perfil variável. As Figuras 04 e 05 ilustram os resultados, considerando uma profundidade de 30 m e distância até 25 km.



**FIGURA 04.** Comparação entre perfil ISO e variável considerando fundo plano e rígido sendo a profundidade do projetor (S), a profundidade do hidrofone (H), a profundidade local (D) e a frequência (F).

Com o fundo rígido, coeficiente de reflexão igual a 1, a atenuação dos raios ocorre somente devido às distâncias percorridas. Alguns aspectos podem ser observados: primeiro, as posições do projetor e hidrofone na coluna d’água influenciaram muito pouco os resultados como pode ser visto na Figura 04. Segundo, a alteração do perfil ISO para um perfil variável típico de Arraial do Cabo reduziu em aproximadamente 37,5 % o espalhamento de retardo, pois os raios passam a percorrer trajetos preferencias em relação ao perfil ISO.



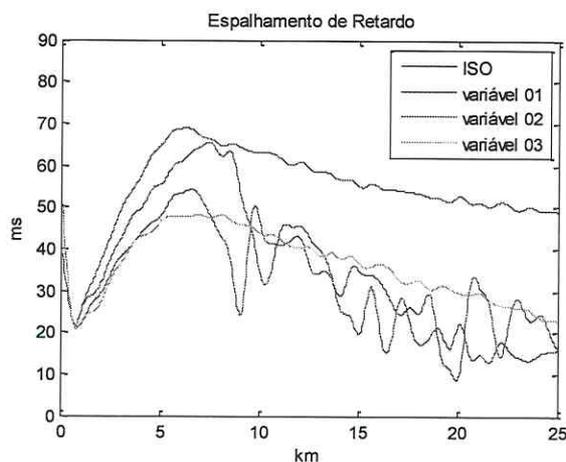
**FIGURA 05.** Comparação entre perfil ISO e variável considerando fundo plano e elástico.

A Figura 05 ilustra os resultados para fundo elástico, ou seja, o fundo com módulo do coeficiente de reflexão ( $\mathcal{R}$ ) menor que 1. O espalhamento de retardo inicialmente diminui com a distância. Esse comportamento pode ser explicado da seguinte forma: na medida em que a distância aumenta, os raios com ângulos mais elevados em relação à horizontal vão refletindo mais vezes no fundo, perdendo rapidamente boa parte de sua energia (CLAY e MEDWIN, 1977). Na medida em que a distância continua a aumentar, mais raios chegam ao destino aumentando o espalhamento de retardo. Aumentando ainda mais a distância, somente os raios cada vez mais próximos ao ângulo crítico ( $|\mathcal{R}| \approx 1$ ) contribuem no destino, diminuindo o espalhamento de retardo em grandes distâncias.

Diante do exposto, as Figuras 04 e 05 nos mostram que: primeiro, com o perfil ISO, a posição dos transdutores na coluna d'água não influencia de forma significativa os resultados. No entanto, ao considerar um perfil típico de Arraial do Cabo, a posição dos transdutores passa a afetar mais  $\sigma_r$ . Segundo, com o fundo elástico, o espalhamento de retardo, ou eco do canal, é significativamente menor, o que é de se esperar.

### 3.3. Cenário “c”

O cenário “c” tem o propósito de focar a análise na variação do perfil de velocidade do som. Sendo assim, os transdutores serão posicionados a 15 m de profundidade, sendo mantida a profundidade local de 30 m e distância máxima de 25 km. A Figura 06 ilustra os resultados para quatro perfis de velocidade do som.



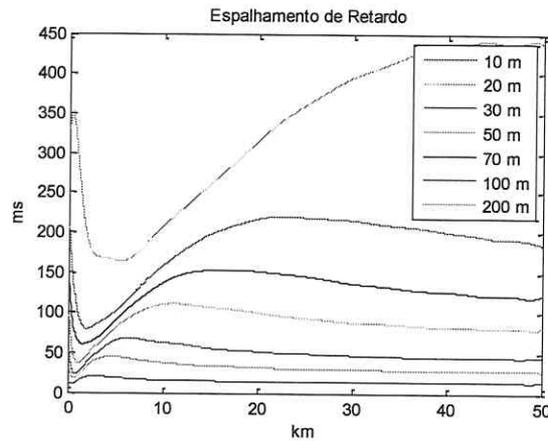
**FIGURA 06.** Influência do perfil de velocidade do som no espalhamento de retardo.

Como podemos observar na Figura 06, a alteração de perfil de velocidade do som afetou razoavelmente o espalhamento de retardo. Isso ocorre, pois dependendo do perfil, os raios passam a se concentrar em regiões preferenciais, diminuindo  $\sigma_r$  em certas situações.

### 3.4. Cenário “d”

O cenário “d” tem o propósito de analisar a influência da profundidade local no espalhamento de retardo, considerando as seguintes condições de contorno: em cada

caso, transdutores a meia profundidade, perfil ISO e distância máxima de 50 km. A Figura 07 ilustra os resultados.



**FIGURA 07.** Influência da profundidade no espalhamento de retardo.

Como pode ser observado na Figura 07, a profundidade local influencia fortemente o valor do espalhamento de retardo. Como exemplo, numa distância de 10 km, teríamos  $\sigma_r$  igual a 15,71 ms, 109,8 ms e 209,0 ms a 10 m, 50 m e 200 m de profundidade respectivamente.

#### 4. Conclusões

Podemos concluir que o espalhamento de retardo depende de muitos fatores como: a abertura da fonte, o tipo de fundo, o perfil de velocidade do som, a distância entre a transmissão e recepção do sinal, sendo que as maiores variações ocorreram com a profundidade.

No entanto, mesmo variações pequenas impactam um sistema de comunicações digital. Como exemplo, considerando um símbolo de comunicação de 10 ms num canal sem espalhamento de retardo (ideal), teríamos uma taxa de transmissão de 100 bps num alfabeto com dois símbolos. Espalhamentos de 10 ms, 30 ms, 50 ms, 100 ms, 200 ms e 400 ms reduziram essa taxa para 50 bps, 25 bps, 16,7 bps, 9,1 bps, 4,8 bps e 2,4 bps respectivamente. O tempo de transmissão de 10 palavras (66 caracteres ou 528 bits) nas taxas citadas seria de 5,28 s, 10,56 s, 21,12 s, 31,68 s, 58,08 s, 110,88 s e 216,48 s.

Portanto, conhecer o comportamento do espalhamento de retardo do canal, com o objetivo de desenvolver técnicas necessárias à otimização dos protocolos de transferência de dados, é fundamental ao desempenho de qualquer sistema de comunicação digital.



## 5. Referências Bibliográficas

- [1] CLAY, C.; MEDWIN, H. Acoustical Oceanography. [S.l.]: [s.n.], 1977.
- [2] PORTER, M. B. The BELLHOP Manual and User's Guide: PRELIMINARY DRAFT, La Jolla, CA, USA, 31 jan. 2011. 57.
- [3] SCHOBBER, ; JONDREAL,. Delay Spread Estimation For OFDM Based Mobile Communication Systems, Karlsruhe, Germany.