

AVALIAÇÃO DOS ARRANJOS DE AIRGUNS COMO FONTE SÍSMICA MARÍTIMA

EVALUATION OF AIRGUN ARRAYS AS MARINE SEISMIC SOURCE

Marcos Antônio Gallotti Guimarães⁽¹⁾

RESUMO — A fonte de energia sísmica mais utilizada nos levantamentos marítimos atualmente é o *airgun*. Devido à sua baixa potência e ao efeito da bolha, é usado formando arranjos com volumes variados para cancelar os pulsos secundários por interferência destrutiva e manter interferência construtiva dos pulsos primários nas frequências de interesse. Apesar das vantagens, geralmente possuem dimensões os arranjos maiores do que os comprimentos de onda sísmicos gerados por eles e por isso sua assinatura depende da posição em que é observada. Os arranjos variam na sua geometria, pressão, volume e tipo dos *airguns*. Para se certificar da capacidade de cada arranjo é necessário conhecer a forma e a amplitude do sinal acústico emitido por ele para então realizar análises no domínio do tempo e da frequência. No domínio do tempo, pode-se quantificar a atenuação do efeito bolha pela razão das amplitudes entre o pulso primário e o secundário (PBR). Assinaturas com PBR grande possuem a propriedade de fase mínima, necessária para a deconvolução da assinatura durante o processamento. No domínio da frequência, pode-se determinar quantitativamente a energia por faixa de frequência. Esta última análise revela se o sinal acústico emitido pelo arranjo possui energia suficiente nas baixas frequências para lhe conferir um poder maior de penetração ou nas frequências altas indicando capacidade de alta resolução. Essas características — penetração e resolução — são muito importantes para o caso das bacias brasileiras porque, muitas vezes, o objetivo da prospecção requer que ambas estejam presentes.

(Originais recebidos em 06.06.89.)

ABSTRACT — At present, the *airgun* is the most widely used seismic energy source in marine surveys. Because reliance on one single *airgun* fails to provide adequate power and also produces the so-called bubble effect, it is necessary to employ arrays of variably sized guns, which cancel secondary pulses by destructive interference while maintaining the constructive interference of primary pulses within appropriate seismic frequencies. Despite the advantages offered by such arrays, their dimensions are generally greater than the seismic wavelengths generated by the *airguns*, and therefore the signature will depend on the position from which it is observed. Arrays may vary in geometry, pressure, volume, and *airgun* type; knowing the shape and amplitude of the acoustic signal which it emits, a particular configuration can be evaluated through time and frequency domain analyses. In the time domain, attenuation of the bubble effect can be quantified using the ratio of primary and secondary pulse amplitudes (PBR). Signatures with a large PBR display a minimum phase property, needed to deconvolve the signature during processing. In the frequency domain, energy at each frequency band can be quantitatively ascertained. The latter analysis will reveal whether the acoustic signal emitted by the array displays either adequate low frequency band energy (lending the array a greater penetration capacity) or adequate high frequency band energy (lending it a high resolution capacity). These two characteristics — penetration and resolution — are important in Brazilian basins since both must often be present for exploration purposes.

(Expanded abstract available at the end of the paper.)

1 - Setor de Controle de Qualidade de Campos (SEQUAC), Divisão de Operações Geofísicas (DIGEF), Departamento de Exploração (DEPEX), Av. República do Chile, 65, Centro, CEP 20035, Rio de Janeiro, R.J., Brasil.

1 — INTRODUÇÃO

Na prospecção sísmica marítima para a exploração do petróleo, a fonte de energia e o cabo sísmico (*streamer*) são rebocados, em profundidades diferentes, com velocidade constante pelo navio.

A fonte é acionada ao longo da linha, e as reflexões da subsuperfície são detectadas pelos hidrofones dispostos no interior do *streamer* e registradas pelo sísmógrafo no navio.

A fonte de energia sísmica marítima

mais utilizada nos levantamentos convencionais, desde o abandono da dinamite, é o *airgun*. Nas bacias marítimas brasileiras, vem sendo usado nos arranjos das equipes contratadas desde 1969, correspondendo aos requisitos geofísicos necessários à formação de seções sísmicas, nos padrões que satisfaçam os objetivos geológicos.

O pulso de um *airgun* possui duas deficiências para a exploração sísmica: baixa potência e o efeito causado pela oscilação da bolha de ar na água que gera pulsos secundários após a emissão do pulso primário (SCHULZE-GATTERMANN, 1972; GILES & JOHNSTON, 1973; SAFAR, 1976a; 1976b e outros). Essas duas deficiências são contornadas com a utilização de *airguns*, de volumes diferentes, em arranjos previamente elaborados, aumentando a potência e reduzindo o efeito da bolha (GILES & JOHNSTON, 1973). Atualmente, os arranjos de *airguns* são construídos também para direcionar a energia emitida para o plano vertical da linha sísmica (LYNN & LARNER, 1983 e PARKES *et alii*, 1981) para evitar reflexões laterais que interfeririam nos dados sísmicos. Os arranjos com esse padrão definido de diretividade são conhecidos como *wide arrays*.

Algumas equipes utilizam *airguns* de

2 000 psi (13,8 MPa), em arranjos que somam volumes em torno de 65,5 litros. Outras utilizam menos *airguns* com pressão de 4 500 psi (31 MPa) em arranjos de 19,7 litros. Os arranjos também variam muito em suas geometrias, tipos de *airguns* e disposição dos volumes e são elaborados de forma a emitir o máximo da energia para a subsuperfície em um sinal acústico de curta duração. Diante dessas possíveis diferenças entre os arranjos utilizados, a avaliação de cada um é importante para certificar se o sinal emitido possui energia e resolução suficientes para os interesses geológicos.

2 - CARACTERÍSTICAS DOS ARRANJOS DE AIRGUNS

O ar comprimido, sob alta pressão, liberado na água pelo *airgun*, forma uma bolha que se expande rapidamente, aumentando seu volume e diminuindo sua pressão interna até valores menores que a pressão hidrostática. Esta, por sua vez, começa a exercer pressão contrária, fazendo diminuir seu volume e aumentando sua pressão interna novamente. Este ciclo de contração e expansão da bolha de ar na água, até a perda total da energia inicial, é gerador de pulsos sísmicos (ZIOLKOWSKI *et alii*, 1982).

Com o disparo de um *airgun* colocado a

determinada profundidade da superfície do mar e o registro da assinatura do sinal acústico emitido por ele com o receptor a uma profundidade maior (fig. 1), observa-se primeiro a chegada da energia direta e em seguida a energia refletida da superfície — denominada fantasma — com polaridade invertida. Esse registro, constituído de um pico positivo seguido de outro negativo, denomina-se pulso primário (fig. 2). O efeito de oscilação da bolha fará com que cheguem ao hidrofone outros pulsos denominados secundários, também constituídos de picos positivo e negativo. Na figura 2 mostra-se esta assinatura com os pulsos primário e secundários e o espectro de amplitude. O aspecto serrilhado do espectro é decorrente dos pulsos secundários, e o *notch* em 125 Hz é devido ao fantasma. O período dos pulsos secundários depende do tempo de oscilação da bolha na água, que, por sua vez, depende do volume de ar que o *airgun* libera na água e do campo de pressão em suas vizinhanças. A forma e a amplitude dos pulsos primário e secundários de cada *airgun* dependem da profundidade, do volume e da pressão do ar em seu compartimento, da área das portas por onde sai o ar e de seu desenho. GILES & JOHNSTON (1973) mostraram, por meio de testes diretos, que a amplitude do pulso primário está diretamente relacionada ao volume do *airgun*, ou seja, quanto maior o volume, maior é a amplitude do pulso primário.

Para observar o sinal acústico emitido por um arranjo de *airguns* disparados simultaneamente, a profundidade do receptor deverá ser determinada em função das dimensões do arranjo. A figura 3 mostra um arranjo \overline{AB} sendo observado no ponto P. A diferença entre os tempos de chegada dos pulsos primários vindos de A e O é expressa por:

$$\phi = (r - \overline{AP})/c - ((D/2) \sin i - dx)/c \quad (1)$$

onde c é a velocidade de propagação do som na água e

$$dx = \overline{AP} - \overline{AP} \cos \beta; \quad (2)$$

quando se aumenta r , β torna-se bem pe-

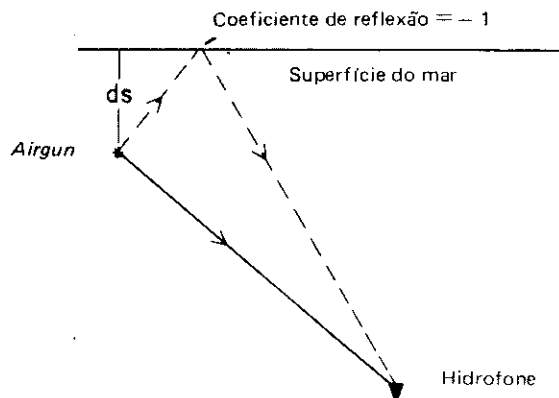


Fig. 1 - Disparo de um *airgun* posicionado na profundidade ds . O hidrofone registra a onda direta e a onda refletida na superfície do mar (fantasma).

Fig. 1 - Discharge from an *airgun* placed at depth ds ; direct arrival and ghost (broken line) are recorded by hydrophone.

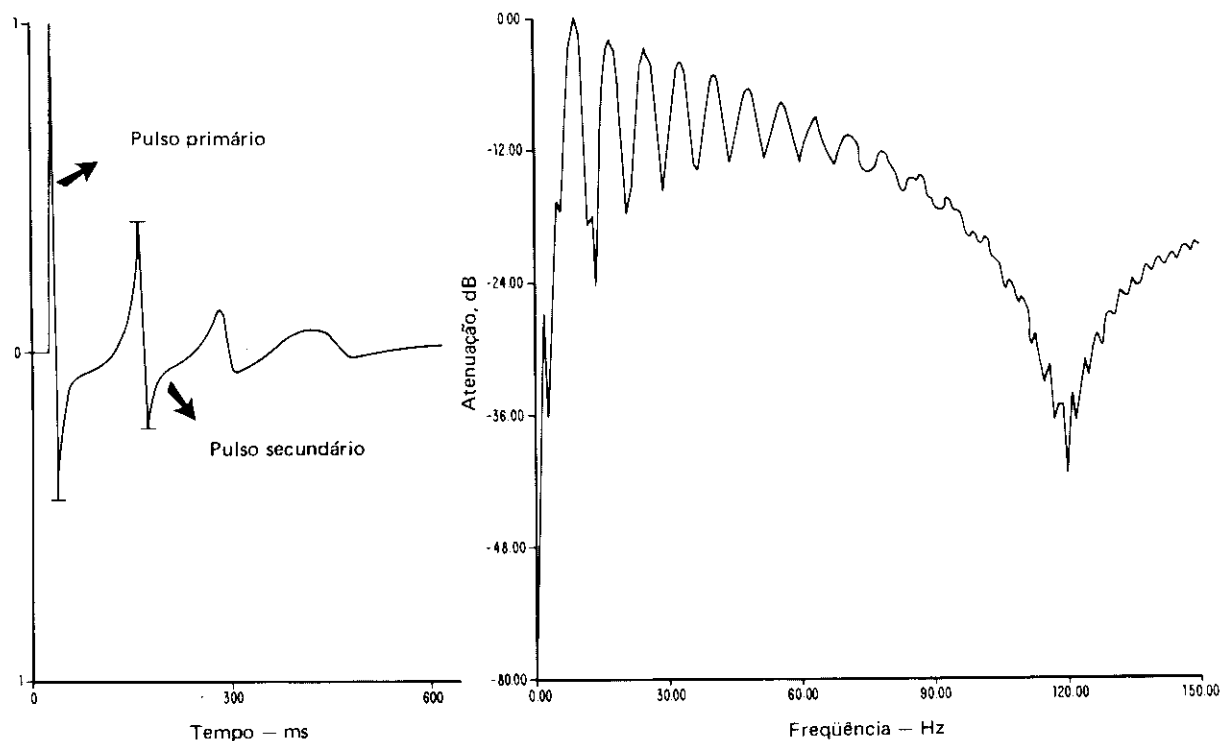


Fig. 2 - Assinatura, no domínio do tempo (à esquerda), do registro da figura 1, mostrando o pulso primário e os pulsos secundários gerados pelo efeito de oscilação da bolha. À direita mostra-se o espectro de amplitude desta assinatura. O aspecto não plano deste espectro também decorre do efeito de oscilação da bolha. O notch na frequência de 125 Hz é decorrente do efeito fantasma causado pela profundidade do airgun de 6 m.

Fig. 2 - Signature of the airgun array shown in figure 1, in the time domain (left), showing the primary and secondary pulses generated by the bubble effect. The amplitude spectrum of this signature is shown to the right. The multi-peaked spectrum is also due to the bubble effect, while the sharp notch at 125 Hz is due to the ghost effect, caused in turn by the depth of the airgun (6 m).

queno e dx tende a zero. Nessa profundidade onde dx é suficientemente pequeno — ou uma fração não significativa do menor comprimento de onda de interesse — ϕ dependerá somente do ângulo i (fig. 3). A região onde o pulso primário, emitido por um arranjo, muda de forma somente pela variação desse ângulo é denominada campo remoto do arranjo.

Os arranjos de fonte empregados atualmente são bidimensionais (fig. 4) com diretividade definida, ou seja, arranjos que se comportam como filtros para atenuar as amplitudes nas frequências e direções desejadas (LYNN & LARNER, 1983; PARKES *et alii*, 1981). Os *wide arrays*, por exemplo, possuem *airguns* dispostos de tal forma que a energia emitida com direções diferentes das do plano vertical ao longo da linha sísmica seja atenuada. A figura 5 mostra o espectro de amplitude, para cada ângulo de incidência ao longo do plano vertical perpendicular à linha sísmica ($\psi = 90^\circ$), do *wide array* utilizado pela GSI (Geophysical Service Inc.) na costa brasileira. Observa-se, nessa figura, que a

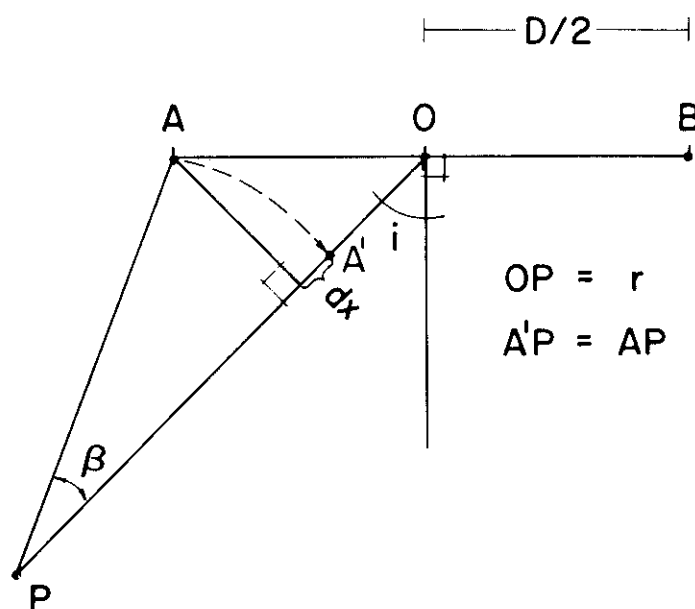


Fig. 3 - Arranjo \overline{AB} de comprimento D , observado no ponto P .
Fig. 3 - Array \overline{AB} , of length D , observed at point P .

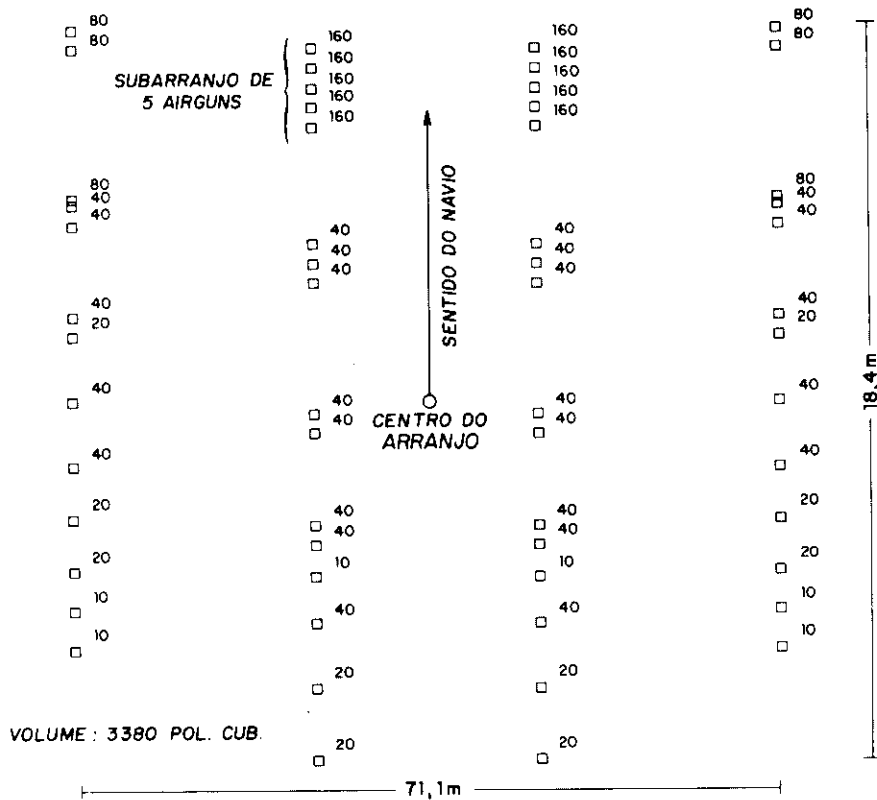


Fig. 4 - Disposição do arranjo de airguns, representados por quadrados, utilizado pela Geophysical Service Inc. na costa brasileira. O número à direita de cada airgun representa o volume em polegadas cúbicas de seu compartimento de ar.

Fig. 4 - Airgun array used by Geophysical Service Inc. along the Brazilian coast. Squares represent airguns; numbers at right represent the volume of their air compartments in cubic inches.

energia emitida perpendicular ao eixo de simetria do arranjo é atenuada para evitar as reflexões e difrações laterais. Outro exemplo são os arranjos longos utilizados por LOFTHOUSE & BENNET (1978) e URSIN (1978) para evitar as múltiplas do fundo do mar, atenuando a energia nos comprimentos de onda comuns desses eventos.

Detonando-se um arranjo de airguns no mesmo instante, observa-se verticalmente abaixo do centro da fonte — no campo remoto — a chegada em fase dos pulsos primários de cada airgun, nas frequências de interesse, e em seguida a chegada fora de fase dos pulsos secundários, porque os airguns de volumes diferentes originam pulsos secundários com períodos distintos. A assinatura do arranjo $S(i, \psi, t)$ será a superposição desses pulsos primários e secundários gerados por cada airgun. Um arranjo é chamado *tuned* quando os volumes entre seus elementos são distribuídos de modo a cancelar significativamente os pulsos secundários (LARNER et alii, 1978).

Se os airguns no arranjo estivessem suficientemente separados para que, quando detonados, não interferissem um no outro, a assinatura do arranjo — no campo remoto — seria a superposição da assinatura de cada airgun do arranjo (fig. 6). GILES & JOHNSTON (1973) mostraram que a assinatura de cada airgun nos arranjos varia em função da separação entre um e outro. Mostraram também que, se essa separação for bem pequena ($\cong 0,5$ m), haverá a união das bolhas de cada um, formando uma só na geração dos pulsos sísmicos (*coalesced airguns*). A utilização de um grupo de airguns de volumes pequenos, bem próximos um do outro, para que haja essa união resulta em uma assinatura com pulsos secundários de menor amplitude — em relação ao pulso primário — do que os gerados por um único airgun de volume igual à soma dos volumes desse grupo. COTTON (1985) explorou esse fato na construção dos arranjos da GSI utilizados na costa brasileira. Esses arranjos (fig. 4) eram compostos de subarranjos de airguns de volumes pequenos que substituíam um de volume grande e

que, além de atenuarem os pulsos secundários, traziam vantagens operacionais nas eventuais falhas dos airguns. Entretanto observou-se, na costa brasileira, que esse arranjo trazia desvantagens quando operado em mar agitado, pois a pequena distância permitia a colisão entre airguns, disparando-os em momento inoportuno e prejudicando os dados sísmicos (*autofires*).

A maioria dos arranjos possuem airguns separados a uma distância suficiente para a oscilação independente das bolhas. NOTEBOOM (1978) apresentou uma fórmula experimental para essas separações:

$$E = \frac{5,1 (P_c V_1)^3}{P_h^{1/3}} \quad (3)$$

onde E é o espaçamento entre airguns; P_c , a pressão do ar; P_h , a pressão hidrostática; e V_1 , o volume do maior airgun no arranjo. Mesmo com essa separação, há a influência do campo de pressão emitido pelos outros airguns, alterando os valores da pressão hidrostática e modificando o suposto comportamento da oscilação de cada um. Por isso, esse assunto (*bubble interaction*) vem sendo tratado constantemente por diversos pesquisadores (ZIOLKOWSKI, 1970; 1980; GILES & JOHNSTON, 1973; ZIOLKOWSKI et alii, 1980; 1982; SINCLAIR & BHATTACHARYA, 1980; DRAGOSET, 1984 e outros) na tentativa de modelar assinaturas de arranjos de airguns ou extrapolar assinaturas no campo remoto através de assinaturas medidas, durante os levantamentos, no campo próximo. Considerando o campo de pressão dos airguns adjacentes, a assinatura do arranjo não será somente a superposição das assinaturas de cada airgun. Os algoritmos de modelamento de assinaturas dos arranjos que levam em consideração as influências nas vizinhanças de cada airgun geram assinaturas mais confiáveis (JOHNSTON, 1982; ZIOLKOWSKI et alii, 1982; JENG, 1986).

Nas bacias brasileiras vêm sendo empregados arranjos com airguns de pressões de 13,8 e 31 MPa. Os de 31 MPa são utilizados pela Western Geophysical Com-

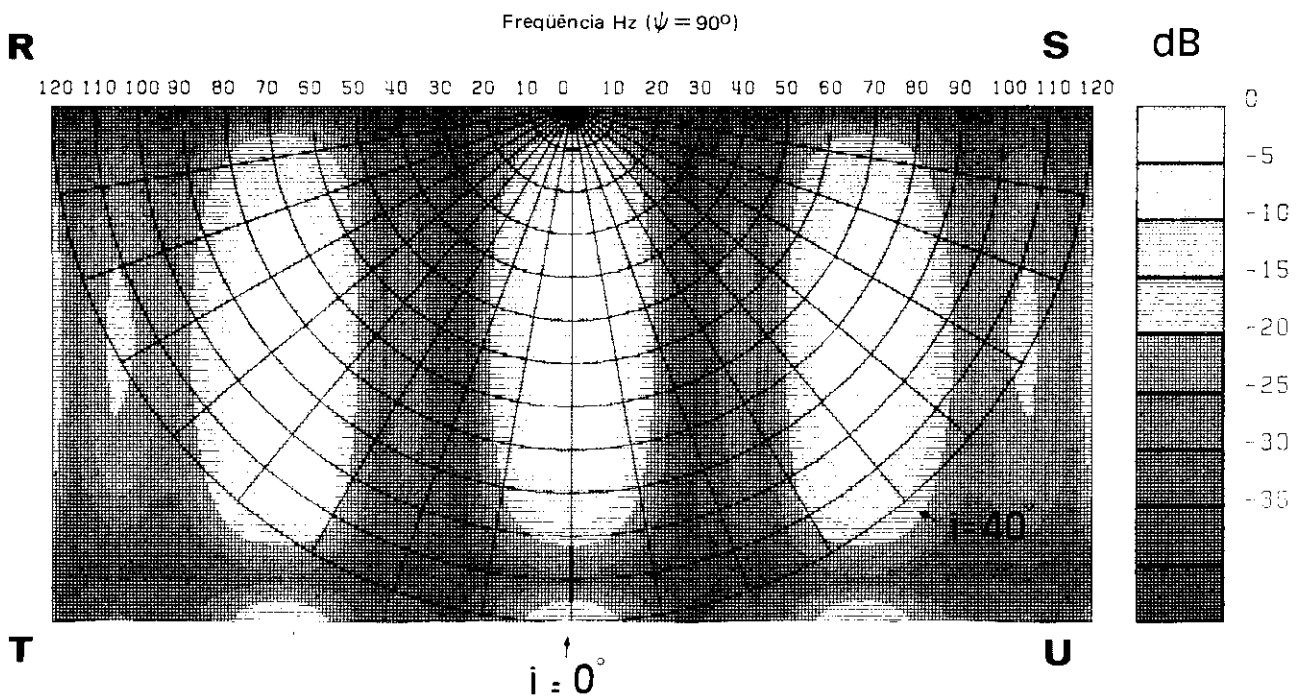
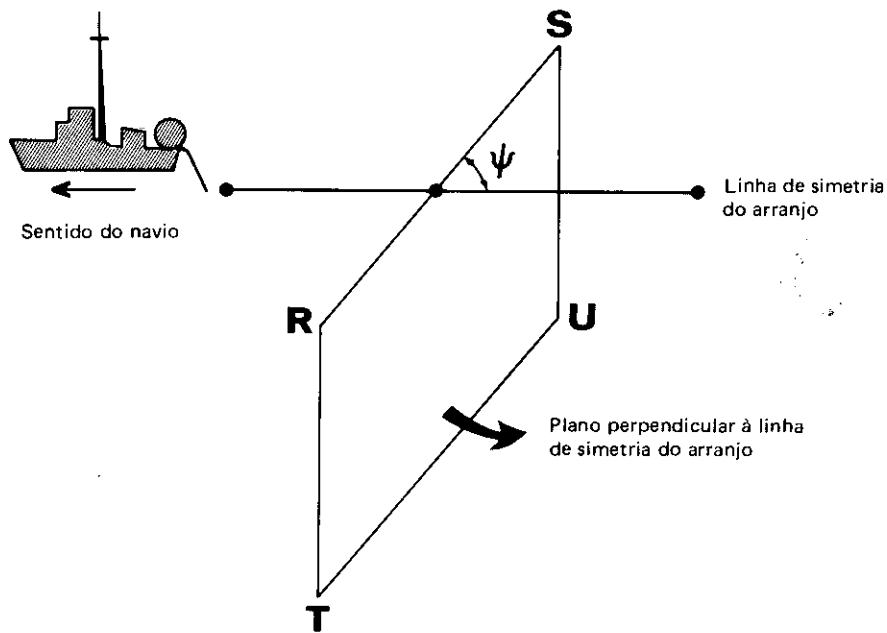


Fig. 5 - Espectro de amplitude do arranjo da figura 4, como função do ângulo de incidência, projetado perpendicularmente à linha de simetria do arranjo, isto é, $\psi = 90^\circ$. A profundidade do arranjo (7 m) foi considerada no cálculo do espectro.

Fig. 5 - Amplitude spectrum of the array shown in figure 4 as a function of incident angle projected perpendicular to the array symmetry line, i. e. $\psi = 90$ degrees. Depth of array (7 m) was taken into account when computing the spectrum.

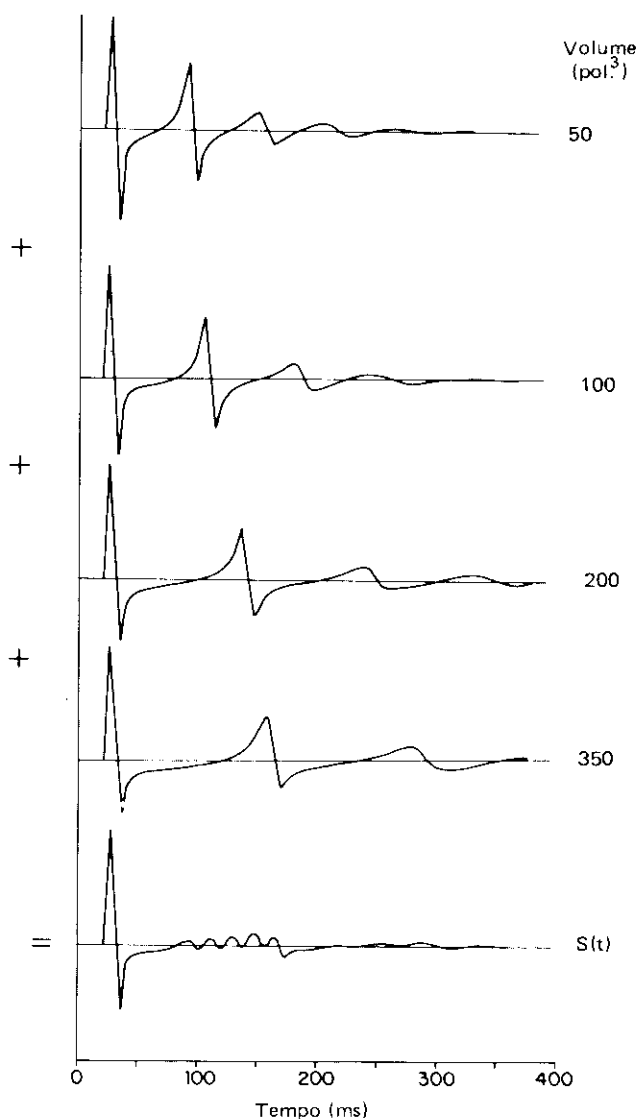


Fig. 6 - Superposição das assinaturas de *airguns* de volumes diferentes para gerar S(t). Nota-se em S(t) o cancelamento dos pulsos secundários em relação ao pulso primário.

Fig. 6 - Superposition of airgun signatures with different volumes, yielding S(t). In S(t), notice the cancellation of secondary pulses in relation to the primary pulse.

pany (WGC) e requerem um volume em *airguns* inferior aos dos arranjos de 13,8 MPa para gerar a mesma quantidade de energia pneumática. A energia liberada por um arranjo de *airguns* é expressa por:

$$Q = P_c V_t \quad (4)$$

onde Q é a energia total do arranjo; V_t , o somatório de todos os volumes no arranjo; e P_c , a pressão dos compressores. JOHNSTON (1980) mostrou, por meio de medições diretas, que arranjos com pressões diferentes e com volumes

que gerem a mesma quantidade de energia possuem amplitudes do pulso primário diferentes. Por isso, esses dois parâmetros — pressão e volume — não são suficientes para definir a capacidade do arranjo, principalmente porque nem toda essa energia gerada é emitida nas frequências de interesse para a subsuperfície.

Com o conhecimento exato da assinatura do arranjo pode-se avaliar se o sinal emitido pelo arranjo possui energia suficiente dentro das frequências de interesse para a subsuperfície e também auxi-

liar a recuperação da resposta impulsiva da terra $g(t)$. O sinal, $S(i, \psi, t)$, emitido pelo arranjo de *airguns*, convolvido com $g(t)$ e somado com o ruído $n(t)$, gera $X(t)$, que é registrado pelos hidrofones dispostos ao longo do cabo sísmico, ou seja:

$$X(t) = S(i, \psi, t) * g(t) + n(t) \quad (5)$$

onde o símbolo * representa convolução. Conhecendo-se $S(i, \psi, t)$, resolve-se a equação acima desde que a razão sinal-ruído, $|S(i, \psi, t) * g(t)|/|n(t)|$, seja grande. Existem duas formas de se conhecer $S(i, \psi, t)$: por modelamentos confiáveis ou por medições diretas no mar. Esta última requer métodos apropriados para perfeita recuperação da assinatura.

3 - REGISTRO DA ASSINATURA DE UM ARRANJO

Trabalhos como de SMITH (1975), FRICKE *et alii* (1985) e mais recentemente o de JOHNSTON *et alii* (1988) relatam os procedimentos e a metodologia para o registro da assinatura de um arranjo. Apesar de amplamente conhecido, esse levantamento é, muitas vezes, executado de forma incompleta pelas companhias de aquisição.

Para registrar a assinatura do pulso emitido por um arranjo de *airguns*, posiciona-se um hidrofone, devidamente calibrado, fixo em uma bóia a uma distância da superfície que atinja o campo remoto do arranjo. Para evitar a interferência na assinatura dos pulsos refletidos do fundo oceânico, o local do levantamento deve possuir lâmina d'água suficiente abaixo do hidrofone. O navio, com o arranjo completo, detonará ao longo de linhas que cruzem a bóia que sustenta o hidrofone (fig. 7). O sinal acústico registrado pelo hidrofone é transmitido pela antena da bóia, via rádio, para um receptor conectado ao sísmógrafo no navio.

As assinaturas obtidas em levantamentos são usadas para o controle de qualidade do arranjo e também para a solução da equação (5) no processamento. Para ambos é necessário eliminar as in-

fluências causadas pelos instrumentos utilizados em sua aquisição. A assinatura gravada $\omega(i, \psi, t)$ no sismógrafo é o resultado de:

$$\omega(i, \psi, t) = S(i, \psi, t) * I(t) * H(t) \quad (6)$$

onde $I(t)$ é a assinatura dos instrumentos e $H(t)$ a resposta de hidrofone. Para isso, deve-se conhecer a resposta do hidrofone utilizado e medir a assinatura dos instrumentos (por exemplo, o receptor e o sismógrafo) antes de iniciar o levantamento.

O sinal acústico que chega ao hidrofone é transformado por este em um sinal elétrico e emitido para o sismógrafo. Para recuperar os valores de pressão detectados pelo hidrofone, é necessário dispor de sua sensibilidade, que é expressa pelo fator $[\mu\text{bar}]/[\mu\text{V}]$, obtido em laboratórios especiais. A influência dos instrumentos pode ser conhecida conectando-se um gerador de pulsos de frequência e amplitude conhecidas no lugar do hidrofone e medindo-se a saída desses pulsos após passarem por esses instrumentos. Com a relação de entrada e saída das amplitudes desses pulsos nas frequências de interesse, determina-se um fator de conversão.

4 - ANÁLISE DA ASSINATURA DE UM ARRANJO NO DOMÍNIO DO TEMPO

Para a análise da assinatura é necessário converter os valores de amplitude para unidade de pressão. Para isso, utiliza-se a sensibilidade do hidrofone e o fator de conversão calculado na aquisição. Em seguida, corrige-se a atenuação sofrida pelo sinal por divergência esférica. Após essa correção, as amplitudes estarão na escala, amplamente conhecida, $[\text{bar.m}]$ ou $[\text{Pa.m}]$ que corresponde aos valores de amplitude em unidade de pressão a um metro do centro da fonte. Assim, assinaturas registradas de arranjos diferentes podem ser comparadas.

Na análise no domínio do tempo, primeiramente observa-se o valor da amplitude em bar.m do pulso primário. Geralmente, assinaturas registradas na banda de frequência 0-125 Hz possuem am-

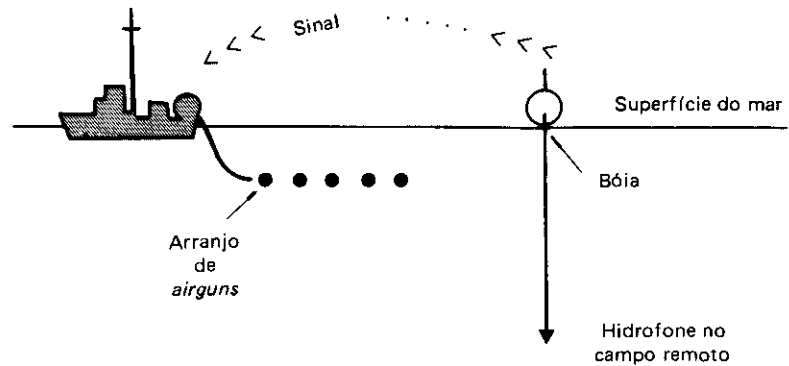


Fig. 7 - Hidrofone, no campo remoto, sustentado por uma bóia para o registro da assinatura do arranjão de *airguns*. O sinal recebido pelo hidrofone é emitido, via rádio, para um receptor no navio.

Fig. 7 - Hydrophone fixed to a buoy in order to record the far-field signature of the airgun array. The signal received by the hydrophone is sent by radio to an onboard receiver.

plitudes que variam de 80 a 100 bar.m . Em seguida, determina-se a razão entre as amplitudes do pulso primário e secundário conhecida como PBR (*primary bubble ratio*). Esta razão revelará se o arranjão foi capaz ou não de eliminar o pulso secundário em relação ao pulso primário (fig. 8). O processo de atenuação da energia dos pulsos secundários

com arranjos de *airguns* de volumes variados é conhecido como *tunning*. A PBR é um parâmetro que quantifica essa atenuação, ou seja, arranjos que possuam assinatura com PBR alta (por exemplo, acima de 10) atenuaram significativamente a energia secundária.

O fantasma também faz parte do pulso

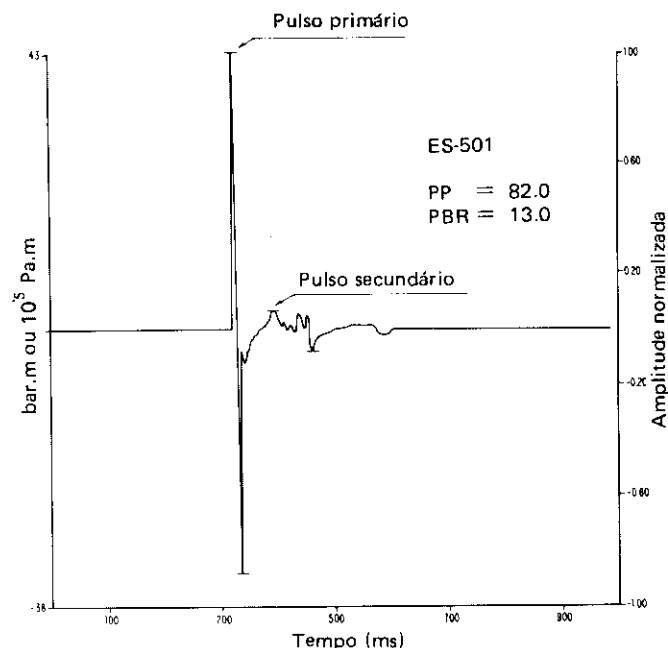


Fig. 8 - Assinatura do arranjão de uma equipe da PETROBRÁS (ES-501). Os valores de amplitude estão na escala bar.m e Pa.m , e a amplitude do pulso primário é representada por PP.

Fig. 8 - Signature of an array of a PETROBRÁS crew (ES-501). Amplitude was scaled in bar.m and Pa.m ; primary pulse amplitude is shown as PP.

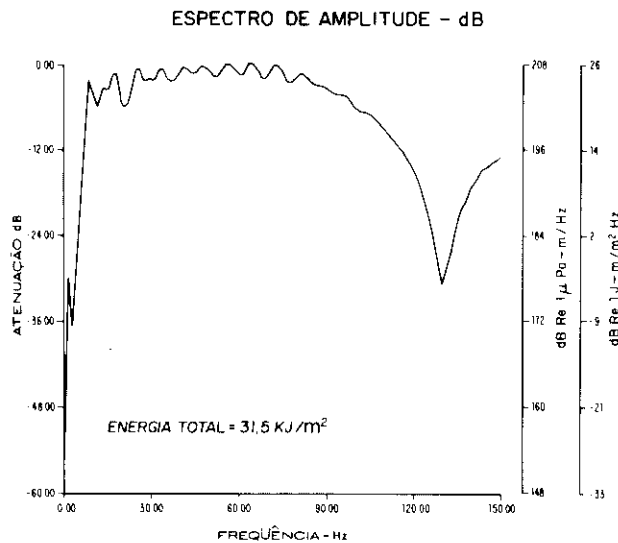


Fig. 9 - Espectros de amplitude e de fluxo de energia da assinatura da figura 8. A energia total foi calculada na banda de frequência 0-150 Hz.

Fig. 9 - Amplitude spectrum and energy flux spectral density for the signature shown in figure 8. Energy was computed in the 0-150 Hz frequency band.

primário. Conhecendo-se a profundidade do arranjo e a velocidade da água, podem-se calcular filtros que corrijam a diferença de fase entre o fantasma e a energia direta (ZIOLKOWSKI, 1971). A diferença de fase entre os pulsos secundários e o primário depende de fatores que regem a oscilação da bolha. Por isso torna-se muito difícil prever o período dos pulsos secundários de modo a construir filtros que aproveitem sua energia (ZIOLKOWSKI, 1980). Assim, atenuar os pulsos secundários é muito importante para obter uma assinatura da fonte de curta duração e de fase mínima, essencial aos processos de deconvolução.

5 - ANÁLISE ESPECTRAL QUANTITATIVA DA ASSINATURA DO ARRANJO

As análises espectrais empregadas para avaliação das assinaturas resultavam em gráficos denominados espectros de potência, onde os valores eram quase sempre normalizados e colocados na escala dB de modo que os valores mínimos de atenuação fossem representados por 0 dB. Esses gráficos não forneciam nenhuma informação sobre o quanto a amplitude de cada frequência era atenuada, para que espectros de assinaturas diferentes pudessem ser comparados.

FRICKE *et alii* (1985) e JOHNSTON *et*

alii (1988) apresentaram uma forma quantitativa de analisar os espectros de amplitude das assinaturas das fontes sísmicas marítimas. Depois de calibradas, as amostras são convertidas para $\mu\text{Pa}\cdot\text{m}$, e a assinatura transformada para o domínio da frequência por:

$$P(f) = \int_0^{\infty} P(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (7)$$

Os valores de $P(f)$ colocados na escala dB em relação a $1 \mu\text{Pa}\cdot\text{m}$ compõem o espectro de amplitude calibrado:

$$20 \log P(f) = \text{dB Re a } 1 \mu\text{Pa}/\text{Hz a } 1 \text{ metro} \quad (8)$$

O fluxo de energia da fonte $E(f)$ é calculado elevando-se os valores $P(f)$ ao quadrado e dividindo-os pela impedância acústica do meio (veja apêndice, eq. A5).

Os valores $E(f)$ em joules, colocados na escala dB em relação a $1 \text{ J}/\text{m}^2$, compõem o espectro do fluxo de energia:

$$10 \log E(f) = \text{dB Re a } 1 \text{ J}/\text{m}^2 \cdot \text{Hz} \quad (9)$$

O fluxo de energia acumulado é dado por:

$$Q = \int_{f_1}^{f_2} E(f) df \quad (10)$$

onde f_1 e f_2 são os limites da banda de frequência de interesse. A figura 9 mostra os gráficos do fluxo de energia e o de

amplitude calibrada. Nota-se que não existe diferença na forma das duas curvas, apenas os valores de escala são diferentes. O valor máximo do espectro de amplitude calibrado é 182 dB maior do que o equivalente no outro espectro, assumindo-se que a impedância acústica do meio seja igual a $1,54 \cdot 10^6 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$.

Com os espectros de amplitude calibrada e o de fluxo de energia podem-se avaliar quantitativamente as atenuações sofridas em cada frequência. Para que um arranjo tenha uma assinatura com alto poder de penetração, é necessário que possua bastante energia nas frequências baixas. Por outro lado, para que a assinatura do arranjo tenha resolução, é necessário que a energia das frequências máximas de interesse não seja atenuada. Assim, um arranjo ideal seria aquele que possuísse um espectro plano, dentro das frequências de interesse, com o máximo de energia possível. A figura 10 mostra os espectros de amplitude calibrada e de fluxo de energia de duas assinaturas de arranjos da Geophysical Service Inc. Uma representa o arranjo da figura 4, e a outra, o mesmo arranjo com volume reduzido pela retirada de alguns *airguns*. Nota-se nesta figura que o espectro da assinatura do arranjo de maior volume é mais plano e com mais energia, principalmente nas frequências baixas.

6 - ANÁLISE DE ASSINATURAS LEVANTADAS EM CAMPO REMOTO

Utilizaram-se para avaliação assinaturas medidas em campo remoto de quatro arranjos de *airguns* usados nos últimos dois anos nas bacias marítimas brasileiras. As figuras 11 e 12 mostram a análise da assinatura do arranjo da Geosource e Geco A. S. respectivamente, ambas com pressão de 13,8 MPa. A figura 13 mostra a análise da assinatura do arranjo de alta pressão de 31 MPa da Western Geophysical Company (WGC), com volume total inferior ao dos demais arranjos. A figura 14 mostra a análise da assinatura do arranjo da figura 4 (GSI) que possui maior número de *airguns*.

A assinatura da WGC possui um espectro plano dentro da banda de frequência

0-125 Hz, entretanto a energia é inferior à dos espectros das assinaturas dos demais arranjos, apesar de o arranjo da WGC operar com pressão maior. Os espectros das assinaturas da Geosource e da GSI são razoavelmente planos na banda de frequência 0-125 Hz e com boa quantidade de energia. O espectro da assinatura da GSI apresenta um notável conteúdo de energia nas frequências altas, o que lhe confere maior poder de resolução. A assinatura da Geco possui um valor muito baixo de PBR e por isso seu espectro apresenta um aspecto não plano, apesar de possuir alta energia em

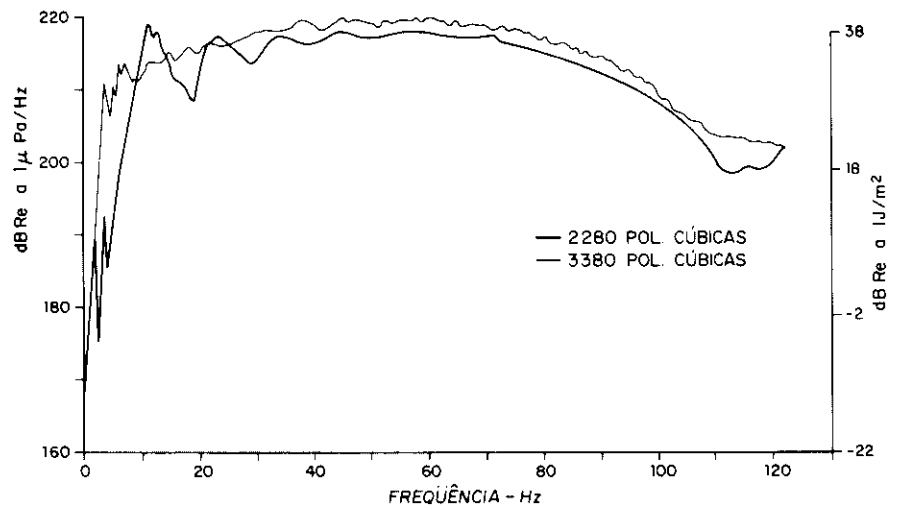
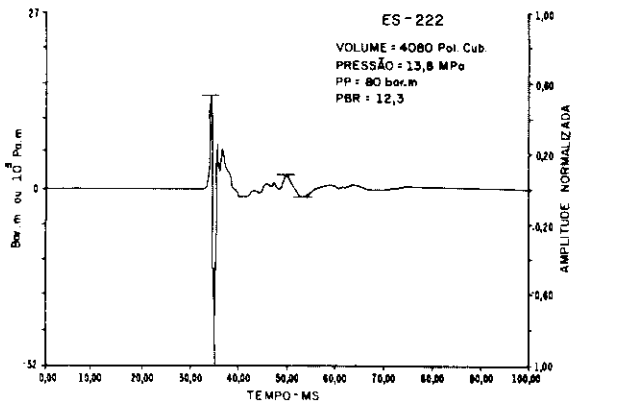
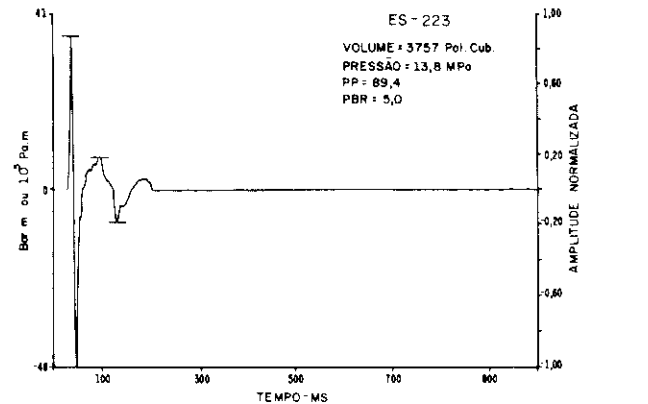


Fig. 10 - Comparação, por meio dos espectros de amplitude calibrada e de fluxo de energia, da assinatura do arranjo da figura 4 com a de outro de menor volume e mesma pressão.
 Fig. 10 - Comparison of the array shown in figure 4 with another array of a different volume but with the same pressure, based on the calibrated amplitude and energy flux density spectrum.

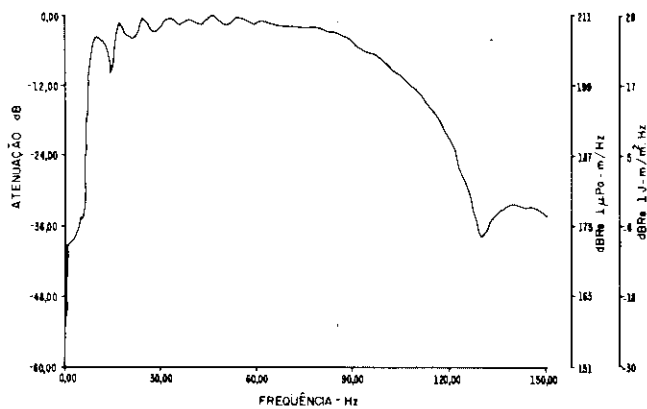
ANÁLISE DE ASSINATURA



ANÁLISE DE ASSINATURA



ESPECTRO DE AMPLITUDE



ESPECTRO DE AMPLITUDE

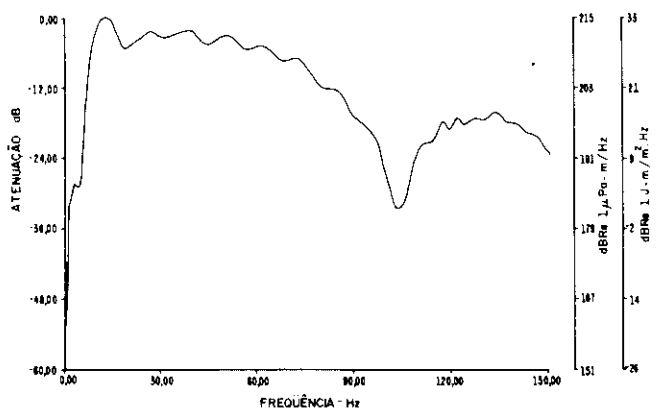
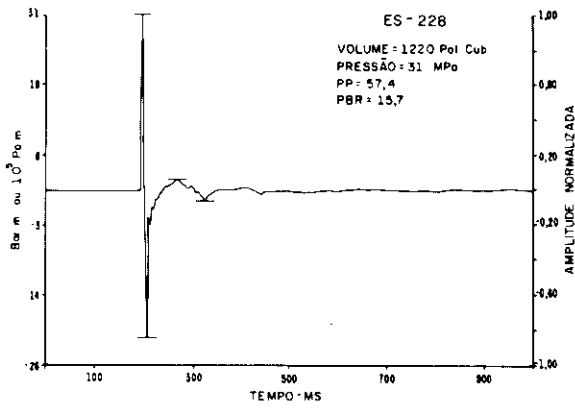


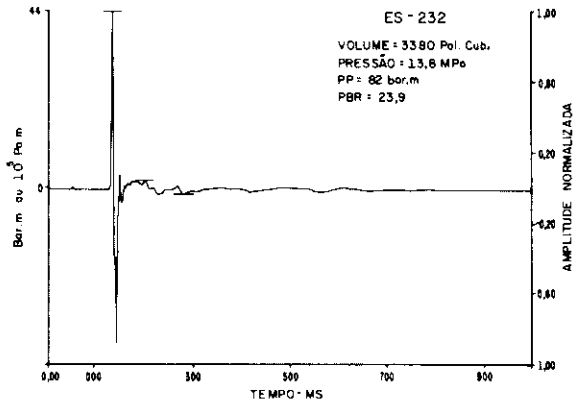
Fig. 11 - Assinatura registrada no campo remoto, nos domínios do tempo e da frequência, do arranjo da Geosource utilizado na costa brasileira.
 Fig. 11 - Far-field signature for the array used by Geosource along the Brazilian coast, in the time and frequency domains.

Fig. 12 - Assinatura registrada no campo remoto, nos domínios do tempo e da frequência, do arranjo da Geco utilizado na costa brasileira.
 Fig. 12 - Far-field signature for the array used by Geco along the Brazilian coast, in the time and frequency domains.

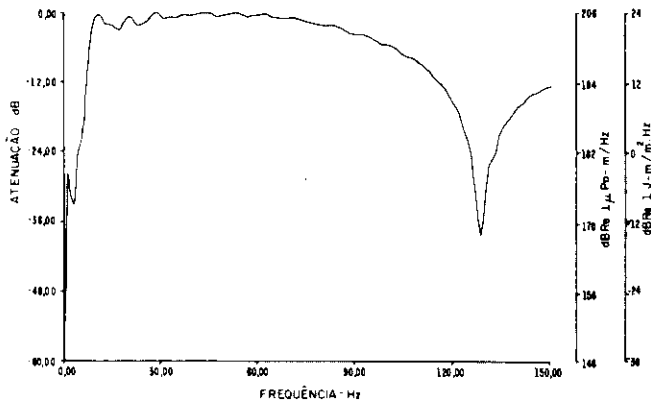
ANÁLISE DE ASSINATURA



ANÁLISE DE ASSINATURA



ESPECTRO DE AMPLITUDE



ESPECTRO DE AMPLITUDE

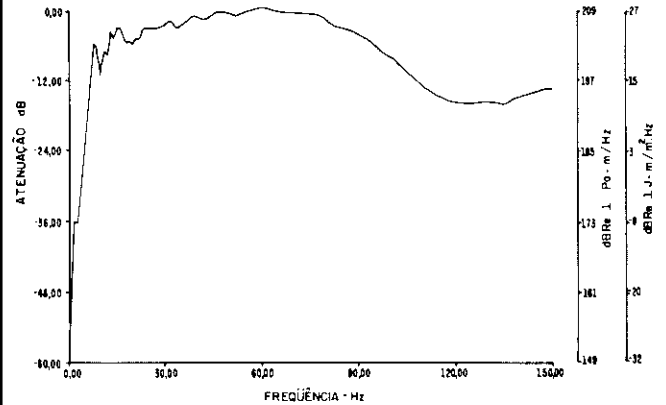


Fig. 13 - Assinatura registrada no campo remoto, nos domínios do tempo e da frequência, do arranjo da Western Geophysical Company utilizado na costa brasileira.

Fig. 13 - Far-field signature for the array used by the Western Geophysical Company along the Brazilian coast, in the time and frequency domains.

Fig. 14 - Assinatura registrada no campo remoto, nos domínios do tempo e da frequência, do arranjo da Geophysical Service Inc. utilizado na costa brasileira.

Fig. 14 - Far-field signature for the array used by the Geophysical Service Inc. along the Brazilian coast, in the time and frequency domains.

algumas frequências.

Por essas diferenças entre arranjos é importante avaliar a assinatura de cada um. As variações dos arranjos durante a operação devido à substituição de *airguns* devem ser controladas, para evitar alterações nas qualidades do arranjo e não modificar significativamente a forma de sua assinatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COTTON, W. R. 1985. The versatility of sleeve guns as marine acoustic sources. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 17, Houston, TX, 1985. *Proceedings* . . . Houston.

DRAGSET, B. 1984. A comprehensive method for evaluating the design of airguns and airguns arrays. *The*

Leading Edge, 3 (10): 52-61.

FRICKE, J. R.; DAVIS, J. M.; REED, D. H. 1985. A standard quantitative calibration procedure for marine seismic sources. *Geophysics*, 50 (10): 1525-32, Oct.

GILES, B. F. & JOHNSTON, R. C. 1973. System approach to airgun array design. *Geophysical Prospecting*, 21 (1): 77-101, Mar.

JENG, Y. 1986. *Analysis of an airgun source in marine seismic exploration*. Connecticut, University of Connecticut.

JOHNSTON, R. C. 1980. Performance of 2 000 and 6 000 PSI airguns: theory and experiment. *Geophysical Prospecting*, 28: 700-15.

JOHNSTON, R. C. 1982. Development of more efficient airgun arrays: theory and experiment. *Geophysical Prospecting*, 30 (6): 752-73.

JOHNSTON, R. C.; REED, D. H.; DESLER, J. F. 1988. Special report of the SEG technical standards committee; SEG standards for specifying marine seismic energy sources. *Geophysics*, 53 (4): 566-75, Apr.

LARNER, K.; HALE, D.; MISENER, S.; HEWLETT, C. 1978. Desired seismic characteristics of an airgun source. In: SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS ANNUAL MEETING, 48, San Francisco, CA, 1978. *Proceedings* . . . San Francisco, SEG.

LYNN, W. & LARNER, K. 1983. Effectiveness of wide marine seismic source arrays. In: EUROPEAN ASSOCIATION OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS, 45, Oslo, 1983. *Proceedings* . . . Oslo.

LOFTHOUSE, J. H.; BENNET, G. T. 1978. Extended arrays for marine

- seismic acquisition. *Geophysics*, 43 (1): 3-22, Jan.
- NOTEBOOM, J. 1978. Signature and amplitude of linear airgun arrays. *Geophysical Prospecting*, 26 (1): 194-201, Mar.
- PARKES, G. E.; HATTON, L.; HAUGLAND, T. 1981. Directivity and other characteristics of a wide airgun array system. In: SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICISTS ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 51, Los Angeles, CA, 1981. *Proceedings* . . . Los Angeles, SEG. p. 105-11.
- SAFAR, M. H. 1976a. The radiation of acoustic waves from an airgun. *Geophysical Prospecting*, 24 (4): 756-72, Dec.
- SAFAR, M. H. 1976b. Efficient design of airgun arrays. *Geophysical Prospecting*, 24 (4): 773-87, Dec.
- SCHULZE-GATTERMANN, R. 1972. Physical aspects of the "airpulsar" as a seismic energy source. *Geophysical Prospecting*, 20 (1): 155-92, Mar.
- SINCLAIR, J. E. & BHATTACHARYA, G. 1980. Interaction effects in marine seismic source arrays. *Geophysical Prospecting*, 28 (3): 323-32, Jun.
- SMITH, S. G. 1975. Measurements of airgun waveform. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 42: 273-80.
- URSIN, B. 1978. Attenuation of coherent noise in marine seismic exploration using very long arrays. *Geophysical Prospecting*, 26 (4): 722-49, Dec.
- ZIOLKOWSKI, A. M. 1970. A method for calculating the output pressure waveform from airgun. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 21: 137-61.
- ZIOLKOWSKI, A. M. 1971. Design of a marine reflection profile systems using airguns as a sound of source. *Journal of the Royal Astronomical Society*, 23: 499-530.
- ZIOLKOWSKI, A. M. 1980. Source array scaling for wavelet deconvolution. *Geophysical Prospecting*, 28: 902-18.
- ZIOLKOWSKI, A. M.; LERWILL, W. E.; MARCH, D.; PEARDON, L. G. 1980. Wavelet deconvolution using a source scaling law. *Geophysical Prospecting*, 28: 872-901.
- ZIOLKOWSKI, A. M.; PARKES, G.; HATTON, L.; HAUGLAND, T. 1982. The signature of an airgun array: Computation from nearfield measurements including interactions. *Geophysics*, 47 (10): 1413-21, Oct.

EXPANDED ABSTRACT

If we record an acoustic signal from a single airgun using a hydrophone placed underneath the water, we observe the first arrival and the energy reflected at the surface (called ghost) with reversed polarity denominated the primary pulse. The bubble effect will yield other pulses denominated secondary pulses or bubble pulses.

In order to observe a pulse from an array of airguns, the depth of the hydrophone must be at the far-field. The far-field of an array is defined as the location at which the first arrival depends only on incident ray direction.

The arrays currently in use are bidimensional (wide arrays), making it possible to cancel undesirable cross line energy. Along the coast of northeastern Brazil, Geophysical Seismic Inc. employed a wide array in an attempt to cancel reflections and diffractions from lateral discontinuities.

The signature of an array at the far-field will be the superposition of the primary and secondary pulses. As the volume of guns in the array varies, the period of the secondary pulse will also vary and therefore its superposition will tend to cancel these pulses.

The distance between guns is important because of the influence which each gun exerts in its vicinity. If the guns are placed close to each other, bubbles will

coalesce, improving the primary pulses in relation to the secondary pulses. If the guns are placed far enough apart, they will present no interference each other meaning that the far-field signature will be the superposition of each gun's signature.

Because of wave field influence, however, it is difficult to achieve this great of a distance.

The array's signature may be ascertained in two ways: theoretical modeling or direct measurement. Modeling requires the knowledge of bubble interactions in order to solve the problem of surrounding influences; for then estimate the far-field from near-field signatures or modeling directly the far-field signatures.

Direct measurement requires suitable techniques in order to recover the appropriate signatures for use in processing or quality control. This means these signatures must be acquired separately from seismic acquisition. In order to ascertain the real shape of the signature, the response of each instrument used in far-field surveys must be established. If $I(t)$ and $H(t)$, representing instrument and hydrophone responses, we can solve $S(t)$:

$$W(t) = S(t) * I(t) * H(t)$$

In order to ascertain the exact pressure value, hydrophone sensitivity must be known.

Evaluation of the arrays may be conducted in the time and frequency domains. In the time domain, the amplitude recorded after spherical divergence correction is transformed to unit of pressure using sensitivity, resulting the widely known scale [bar.m] or [Pa.m]. With this scale, different arrays acquired in different locations may be compared. The ratio between the primary and secondary pulses, called PBR, is important in evaluating tail energy of the signature. In the frequency domain, values are scaled in dB with respect to 1 μ Pa. In order to obtain energy flux spectral density, scaled coefficients are squared, divided by the acoustic impedance, and transformed to dB scale.

Using these time and frequency domain techniques, we can determine which kind of energy is emitted by the source array. Analysis of low and high frequency energies reveals whether the array has two important characteristics in seismic exploration resolution and penetration capability. These characteristics are so vital in Brazilian seismic exploration because the seismic crew sometime meet prospects with targets that require the source to be capable of reaching deep horizons beneath high velocity formations (e. g. carbonates and basalts) at the same time that the acoustic signal must be short enough to allow thin beds to be differentiated. Some far-field signatures of arrays recently used in Brazilian basins were analyzed.

APÊNDICE

A radiação de uma fonte pontual em um fluido homogêneo é descrita pela equação da onda esférica (BERKHOUT, 1980):

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$

ou

$$\frac{\partial^2 (pr)}{\partial r^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 (pr)}{\partial t^2} \quad (A1)$$

onde p é a pressão, r a distância da fonte, $c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$ é a velocidade do som na água de incompressibilidade K e densidade ρ .

Considerando-se apenas as ondas incidentes, a solução da equação acima é expressa por:

$$p(r, t) = \frac{1}{r} s\left(t - \frac{r}{c}\right)$$

ou no domínio da frequência por:

$$P(r, \omega) = \frac{1}{r} S(\omega) e^{-i\omega \frac{r}{c}} \quad (A2)$$

onde $i = \sqrt{-1}$ e $\omega = kc$. Utilizando-se a segunda Lei de Newton

$$-\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \frac{\partial v}{\partial t}$$

a velocidade da partícula é dada por:

$$V(r, \omega) = \frac{-1}{\rho i \omega} \frac{\partial P(r, \omega)}{\partial r}$$

e substituindo $\frac{\partial P(r, \omega)}{\partial r}$ na equação acima obtém-se:

$$V(r, \omega) = \frac{S(\omega)}{r} e^{-i\omega \frac{r}{c}} \cdot \frac{1}{\rho c} \left(1 + \frac{1}{ikr}\right) \quad (A3)$$

Observa-se que para r grande o segundo termo no parêntese tende a zero. Então, a relação da pressão com a velocidade da partícula é dada por:

$$V(r, \omega) = \frac{P(r, \omega)}{\rho c}$$

ou

$$v(r, t) = \frac{p(r, t)}{\rho c} \quad (A4)$$

A região onde a equação (A4) é válida denomina-se campo

remoto de uma fonte pontual. A região onde o segundo termo, entre parênteses, é significativo, isto é, para r pequeno, denomina-se campo próximo de uma fonte pontual (BERKHOUT, 1980).

A energia gerada pela fonte é dada por:

$$E(t) = 4\pi r^2 \int_0^\infty v(r, t) \cdot p(r, t) dt$$

ou

$$E(t) = \frac{4\pi r^2}{\rho c} \int_0^\infty [p(r, t)]^2 dt$$

A energia por unidade de área ou o fluxo de energia é dado por:

$$E_a(t) = \frac{1}{\rho c} \int_0^\infty [p(r, t)]^2 dt$$

ou pelo Teorema de Parseval:

$$E_a(f) = \frac{1}{\rho c} \int_0^\infty |P(f)|^2 df \quad (A5)$$

onde $\frac{|P(f)|^2}{\rho c}$ é a quantidade de energia por unidade de frequência.

A unidade do fluxo de energia no Sistema Internacional é dada por:

$$E_a(f) = \frac{[M] \cdot [L^{-1}] \cdot [T^{-2}] \cdot [M] \cdot [L^{-1}] \cdot [T^{-2}] \cdot [T]}{[M] \cdot [L^{-2}] \cdot [T^{-1}]} = [M] \cdot [T^{-2}]$$

Como Joule (J) = [M] · [L²] · [T⁻²], então

$$E_a(f) = \frac{J}{m^2}$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERKHOUT, A. J. 1980. *Seismic migration; imaging of acoustic energy by wavefield extrapolation*. Amsterdam, Elsevier. (Developments in solid earth geophysics, 12).

AGRADECIMENTOS

Agradeço o incentivo dos geofísicos do Departamento de Exploração da PETROBRÁS Muhamad Baccar (chefe da Divisão de Geofísica), Jorge Marques Toledo Camargo (chefe do Setor de Controle de Qualidade Sísmica) e Rudi Lengler (chefe do Setor de Operações Sísmicas Marítimas).

Agradeço ao geofísico Vandemir Ferreira de Oliveira pela revisão do texto final.