

FELIPE ANDRADE APOLONIO

UMA PROPOSTA PARA UMA FONTE SÍSMICA
MARÍTIMA IMPULSIVA *BROADBAND* USANDO O
CONCEITO DE FONTES DISPERSAS

Tese apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Programa de Pós-
Graduação em Física, para obten-
ção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2016

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da
Universidade Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

A643p
2016 Apolonio, Felipe Andrade, 1986-
 Uma proposta para uma fonte sísmica marítima
 impulsiva *broadband* usando o conceito de fontes dispersas
 / Felipe Andrade Apolonio. - Viçosa, MG, 2016.
 xvi, 111f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndice.

Orientador : Daniel Heber Theodoro Franco.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.105-111.

1. Geofísica. 2. Prospeção sísmica. 3. Sismologia .
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Física.
Programa de Pós-graduação em Física. II. Título.

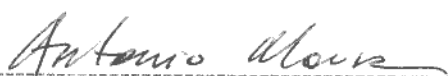
CDD 22. ed. 550.34

FELIPE ANDRADE APOLONIO

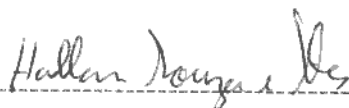
UMA PROPOSTA PARA UMA FONTE SÍSMICA MARÍTIMA IMPULSIVA
BROADBAND USANDO O CONCEITO DE FONTES DISPERSAS

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Física, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 31 de março de 2016.



Antônio Ribeiro de Moura



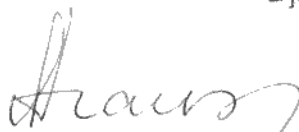
Hallan Souza e Silva



Ricardo Reis Cordeiro



Djalma Manoel Soares Filho



Daniel Heber Theodoro Franco
(Orientador)

À minha mãe, Luzia e à minha amada, Ana Célia.

“Eu segurei muitas coisas em minhas mãos, e eu perdi tudo; mas tudo que eu coloquei nas mãos de DEUS eu ainda possuo.”

“A escuridão não pode expulsar a escuridão, apenas a luz pode fazer isso. O ódio não pode expulsar o ódio, só o amor pode fazer isso.”

Martin Luther King (1929-1968)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xiv
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
1.2 Objetivo do Trabalho	4
1.3 Outros Trabalhos	5
2 O Método Sísmico	7
2.1 O Modelo Convolutacional	9
2.2 Aquisição Sísmica	13
2.3 Teorema da Amostragem e suas implicações	19
2.3.1 Amostragem Temporal	19
2.3.2 Amostragem Espacial	20
2.4 Processamento Sísmico	23
2.5 Interpretação Sísmica	26
3 Fonte Sísmica Marítima	29
3.1 O canhão de ar comprimido: <i>air gun</i>	30
3.1.1 Detonação de um <i>air gun</i>	30
3.1.2 Características de frequência	32
3.1.3 <i>Gundalf: software</i> usado para modelar fontes	36

3.2	O fantasma (<i>ghost</i>) da fonte	38
3.2.1	Como é formado o <i>ghost</i> da fonte	39
3.2.2	Formalismo matemático do sistema <i>ghost</i>	42
3.2.3	Como o <i>ghost</i> afeta o pulso sísmico	44
3.2.4	Campo próximo e campo remoto	46
3.3	Arranjos de <i>air guns</i>	49
3.3.1	Visão operacional de um arranjo	51
3.4	Diretividade do arranjo de <i>air guns</i>	54
3.5	Interação entre <i>air guns</i>	61
3.5.1	<i>Clusters</i> de <i>air guns</i>	63
4	Conceitos de Fontes Dispersas e Fontes Multinível	67
4.1	Fontes dispersas	67
4.1.1	Modelagem usando fontes dispersas	71
4.2	Fontes multinível	75
5	Proposta de Fonte Dispersa e Resultados	81
5.1	Proposta e Método	81
5.2	Resultados das Modelagens	84
5.2.1	Espectro de amplitude das fontes modeladas	85
5.2.2	Padrões de diretividade das fontes	89
5.3	Discussão dos resultados	91
6	Conclusões e Perspectivas	96
A	Questões Econômicas sobre o Mercado de Petróleo	99
A.1	Energias Renováveis	104
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

LISTA DE FIGURAS

2.1	Intervalos de velocidade das ondas P, em km/s, em diferentes materiais e rochas. As rochas reservatório de petróleo são, predominantemente, os arenitos (<i>sandstone</i>) e carbonatos (<i>limestone</i>). Retirado da referência [3].	9
2.2	O Modelo Convolutacional é ilustrado de duas maneiras. Nas séries, usa-se a convenção de valores negativos à esquerda da vertical e positivos à direita. Esquerda: série de impedâncias em tempo ($I_t = Z(t)$), seguida da série de refletividades ($r_t \equiv r(t) = \sum_i r_i$). As séries de 1 à 5 são o resultado da multiplicação do pulso $w(t)$ (não é ilustrado, mas sua forma pode ser inferida de qualquer um dos traços de 1 à 5) com cada um dos coeficientes de reflexão da série $r(t)$ - observe a inversão de polaridade quando $r_i < 0$ e a amplitude modulada por cada valor de r_i . O traço resultante $s_t = s(t)$ é a soma das séries de 1 à 5, sendo esta operação linear equivalente à convolução entre $w(t)$ e $r(t)$ [16]. Direita: primeiro tem-se, em escala de profundidade, a seção geológica (cada conjunto de símbolos como traços, pontos, ladrilhos e etc representam uma dada camada com suas respectivas propriedades) e os perfis (ou <i>logs</i>) de impedância acústica e de coeficientes de reflexão. Depois são ilustrados, em tempo, a função ou série refletividade $r(t)$, o pulso sísmico (<i>input pulse</i>) emitido pela fonte $w(t)$ (apesar de ser ilustrado uma forma de onda sintética - não real/modelada - tal forma denota o caráter não impulsivo da fonte) e o traço sísmico (<i>seismic trace</i>) resultante $s(t)$, como sendo a convolução entre $w(t)$ e $r(t)$ [3].	14
2.3	Representação esquemática das operações sísmicas de campo mostrando alguns componentes operacionais e uma hipotética geologia.	15

2.4	Ilustração de uma aquisição sísmica 3D marítima. As dimensões da imagem estão próximas às reais. Figura retirada da referência [19].	16
2.5	Ilustração de um traço sísmico e um sismograma (coleção de traços sísmicos), que registram o campo de onda em função do tempo. É possível ver algumas curvas - representadas pela coerência entre traços adjacentes - no sismograma. É importante observar que a grandeza física não é, geralmente indicada nos gráficos ou <i>displays</i> sísmicos. No entanto, as medidas do hidrofone são em μbar , geofone em m/s e acelerômetro em m/s^2	17
2.6	Esquerda: uma função senoidal representando um sinal analógico. Direita: representação digital da mesma função.	19
2.7	Uma seção sísmica 2D, em profundidade (de 0,0 à 6,0 km), ilustrando algumas feições geológicas [28]. A escala de cores (não mostrada), que varia de acordo com o <i>software</i> usado para <i>display</i> , denota as amplitudes do sinal sísmico. . .	25
2.8	Cubo sísmico, com eixo vertical em ms, ilustrado por alguns planos, mostrando algumas feições geológicas [19].	25
2.9	Modelos de velocidade obtidos via FWI com modelos iniciais usando bandas de frequência de 1,5-5 Hz (topo), 2-5 Hz (meio) e 4,5-5 Hz (base) [9].	27
2.10	Seção da Figura 2.7 interpretada, destacando, em cores e traços, as possíveis feições geológicas [28].	28
3.1	Ilustração de um <i>air gun</i> , que tipicamente tem dimensões entre 10 e 12 cm por 45 e 65 cm, dependendo do volume e fabricante. É apresentado os componentes básicos de um <i>air gun</i> . (a) Corte de um <i>air gun</i> [31]; (b) <i>air gun</i> pronto para disparar [2]; (c) <i>air gun</i> imediatamente após disparar [3].	31
3.2	(a) Em cima: raio de uma bolha oscilante em função do tempo; embaixo: Correspondente campo de pressão emitido. R_0 é o raio no qual a pressão interna da bolha se iguala à pressão hidrostática [33]. Em (b) o campo de pressão (ou assinatura) de um <i>air gun</i> de 100 cu.in., 2.000 psi m de pressão e 7,6 m de profundidade, medido a 1 metro da fonte [35].	33

3.3	Fotografias em alta velocidade de um <i>air gun</i> da marca Bolt, detonado em um tanque de água. Abaixo a correspondente assinatura medida aproximadamente a 22 cm distante do <i>air gun</i> [31].	34
3.4	(a) Assinatura de um <i>air gun</i> de 250 cu.in. e 2.000 psi para 6, 8, 10 e 12m de profundidade. (b) Correspondentes espectros de amplitude das assinaturas em (a).	35
3.5	(a) Assinatura de um <i>air gun</i> a 8 m e 2.000 psi para volumes de 40, 100, 150 e 250 cu.in. (b) Correspondentes espectros de amplitude das assinaturas em (a).	36
3.6	Arranjo já inserido no <i>software</i> . É mostrado também os campos que devem ser preenchidos para cada <i>air gun</i>	37
3.7	Ilustração de alguns parâmetros que devem ser inseridos para a modelagem da assinatura de um arranjo de <i>air gun</i>	38
3.8	Cabeçalho do relatório que mostra os principais resultados da modelagem.	39
3.9	Ilustração da formação do pulso virtual, ou <i>ghost</i> , da fonte [38].	39
3.10	Esquerda: raios indicando as trajetórias que dão origens aos pulsos: primário (em verde), <i>ghost</i> do receptor (em azul), <i>ghost</i> da fonte (em amarelo), <i>ghost</i> de fonte e receptor (vermelho) [39]. À direita é ilustrado como se dá a composição da assinatura da fonte [40] (modificado de [33]).	40
3.11	Ilustração de um harmônico qualquer que compõe a assinatura da fonte. O <i>ghost</i> tem sua polaridade revertida e um atraso $t_f = \tau$ em relação ao pulso primário. O valor de t_f é que irá determinar se a interferência entre os pulsos será construtiva ou destrutiva [33].	41
3.12	Amplitude da resposta em frequência do sistema <i>ghost</i> da fonte. São mostradas as respostas para diferentes profundidades.	43
3.13	(a) Assinatura de um <i>air gun</i> de 250 cu.in. e 2.000 psi para 6, 8, 10 e 12 m de profundidade com o <i>ghost</i> da fonte. (b) Correspondentes espectros de amplitude das assinaturas em (a).	45

3.14	Acima: fotografias de Stonehenge com a inclusão de dois <i>ghosts</i> (esquerda) e após a remoção dos mesmos. Embaixo: Seção sísmica com <i>ghost</i> de fonte e receptor (esquerda) e após a remoção/atenuação dos mesmos (direita) [41]. .	46
3.15	Assinatura de um <i>air gun</i> de 40 cu.in. Acima: assinatura no campo próximo (medida a uma distância da fonte não informada). A amplitude do pulso primário e da primeira bolha são designados respectivamente por P e B . Como vê-se claramente o efeito do pulso primário e não do <i>ghost</i> , constata-se que a assinatura é medida mais próxima ao <i>air gun</i> do que à superfície livre, onde ambos efeitos - primário e <i>ghost</i> - deveriam aparecer com aproximadamente as mesmas amplitudes. Embaixo: a assinatura <i>far field</i> ilustrando a presença do <i>ghost</i> . As amplitudes $P-P$ e $B-B$ são as amplitudes de pico a pico do pulso primário e pico a pico da primeira bolha, respectivamente. A razão pico-bolha é dada por $PBR = P-P/B-B$. Em ambos os casos $T = \tau$ é o período da bolha, o mesmo definido na equação 3.1 [38].	49
3.16	As assinaturas em azul são de <i>air guns</i> individuais cujos volumes, em cu.in., são indicados à esquerda, modeladas num hidrofone a 300 m abaixo dos <i>air guns</i> . Se os 6 <i>air guns</i> forem detonados simultaneamente num arranjo (cuja geometria não é indicada), a assinatura modelada resultante a 300 m é a mostrada na curva vermelha. Note que o eixo vertical é omitido. Este é um exemplo de <i>tuned array</i> [45].	51
3.17	Navio sísmico rebocando dois arranjos de <i>air guns</i> iguais (configuração <i>flip-flop</i>) a 6 m de profundidade. Um arranjo consiste de 3 subarranjos, que são compostos de 6 posições e possuem 8 <i>air guns</i> cada. As dimensões do arranjo são 15 x 16 m (IL x XL). Os volumes indicados estão em cu.in. e o volume total do arranjo é de 3.397 cu.in. [45] ©WesternGeco.	52
3.18	Assinatura da fonte e espectro de amplitude para o arranjo mostrado na Figura 3.17 [43].	53
3.19	Esta fotografia mostra o <i>gundeck</i> de dois navios. Esta é a parte do navio onde os subarranjos ficam localizados quando não estão em operação ou quando estão em manutenção [46].	53

3.20	Esta fotografia mostra a operação de colocação (<i>deployment</i>) de um subarranjo na água [47].	54
3.21	Espectro de amplitude para um <i>air gun</i> de 250 cu.in. e 2.000 psi a 8 m de profundidade. Não está incluído o <i>ghost</i> da fonte, o que é feito forçando-se $r = 0$ para a superfície água-ar na modelagem.	55
3.22	Mesmas características da fonte que na Figura 3.21 mas com a inclusão <i>ghost</i>	56
3.23	Ilustração de como se dá a diretividade de uma fonte composta por dois elementos [40].	57
3.24	Ilustração de um arranjo da empresa PGS. Os retângulos indicam os <i>air guns</i> , onde verde é um <i>air gun</i> ativo e azul indica que este está desligado. Os círculos vermelhos indicam o raio máximo aproximado da bolha. Os números acima de cada <i>air gun</i> são apenas índices de identificação e os valores embaixo são os volumes, em cu.in. O volume total é de 4.130 cu.in. A malha é de 1 m x 1 m.	59
3.25	Espectro de amplitude para o arranjo da Figura 3.24, mostrando o padrão de diretividade do arranjo. O plano azimutal escolhido foi o IL.	60
3.26	O mesmo que na Figura 3.25, mas para o plano XL.	61
3.27	(a) <i>Cluster</i> composto por 2 <i>air guns</i> (2-gun cluster) [48]. (b) <i>Cluster</i> composto por 3 <i>air guns</i> (3-gun cluster) [49].	63
3.28	Assinatura modelada no <i>far field</i> para três casos: (i) um único <i>air gun</i> de 125 cu.in. foi modelado e seu resultado foi multiplicado por 2, imitando o que seria obtido no caso de 2 <i>air guns</i> de 125 cu.in. não interagentes (curva azul); (ii) <i>cluster</i> composto por 2 <i>air guns</i> de 125 cu.in. separados por 1 m (curva marrom); (iii) um único <i>air gun</i> de volume 250 cu.in. (curva verde). Em todos os casos a pressão foi 2.000 psi e a profundidade de 8 m.	65
3.29	Medidas de assinatura no <i>near field</i> de um <i>air gun</i> de 600 cu.in. e um <i>cluster</i> de 3 <i>air guns</i> de 200 cu.in cada. Ambos foram detonados com 2.000 psi e a 6 m de profundidade. Note que a escala do eixo de frequência está em logaritmo. Os eixos verticais indicam as amplitudes normalizadas [51].	66

4.1	Ilustração indicando como se dá a aquisição convencional - sem <i>blending</i> ! - (à esquerda); aquisição <i>blended</i> com foco na qualidade (ao centro), pois a duração do levantamento (<i>survey time</i>) é a mesma, mas aumentou-se o número de tiros (mais energia emitida e registrada); aquisição <i>blended</i> com foco na duração da aquisição (à direita), pois mantém-se o número de tiros e reduz-se a duração da aquisição. Modificado de [53].	68
4.2	Ilustração da aplicação do conceito de “multibandas” de frequência no sistema de áudio moderno [54].	70
4.3	Alguns navios fonte não tripulados rebocando cada um uma fonte <i>narrowband</i> e um cabo, no conceito de fontes dispersas - DSA, cumprindo espaço e temporalmente os requisitos necessários para corretamente iluminar a subsuperfície. A amostragem espacial das fontes e as profundidades destas dependem da característica de frequência que se deseja com cada fonte [55].	71
4.4	Esquerda: ilustração de 4 bandas de frequência (<i>ultralow, low, mid, high frequencies</i>), representadas por quatro cores. A soma destas 4 bandas resulta na curva delineada pelos pontos [57]. Direita: pulso de fase zero equivalente ao espectro da curva pontilhada à direita [58]. Esta seria a forma do pulso ideal de qualquer aquisição sísmica!	72
4.5	Comparação dos pulsos sísmicos (direita de cada figura) que representam as bandas de frequência escolhidas, Figura 4.4 com os respectivos sismogramas sintéticos gerados num meio homogêneo devido à propagação destes pulsos (esquerda) [57].	73
4.6	A figura central mostra o campo de onda registrado à 1.000 m de profundidade num modelo sintético. Foi escolhido 3 bandas de frequência (5-15, 10-30 e 25-75 Hz) para os pulsos, cada uma representada por uma bola vermelha de raio diferente. A profundidade de cada fonte é 7,5 m. À direita é mostrado um traço, $P_{kj}^+(z_m, z_0)$, e embaixo à esquerda o espectro de amplitudes médio do campo incidente $P_j^+(z_m, z_0)$. Modificado de [10].	74
4.7	O mesmo que na Figura 4.6 mas com cada fonte na profundidade que otimiza a emissão do pulso. Modificado de [10].	75

4.8	Ilustração de quatro instantes da detonação de um arranjo de <i>air guns</i> (tempo cresce para a direita). Em cima é visto um arranjo convencional, onde os 3 subarranjos atiram simultaneamente, gerando construtivamente o campo de onda descendente assim como o <i>ghost</i> . Embaixo é visto o mesmo mas para o caso de um arranjo em 3 níveis de profundidade - MLS. Devido ao atraso relativo na detonação dos arranjos, é possível gerar um campo de ondas descendente construtivo, mas agora os subarranjos têm <i>ghosts</i> atrasados entre si que não se reforçam [59].	76
4.9	Esquerda: ilustração da resposta impulsiva do sistema <i>ghost</i> de ambas as configurações da figura 4.8 (arranjo convencional à 7,5 m e MLS à 7,5 m, 15,0 m e 22,5 m). Direita: resposta em frequência dos sistemas <i>ghost</i> [59].	77
4.10	Possíveis configurações para uma fonte de 3 níveis (a, b e c) e uma fonte horizontal (d) [52].	77
4.11	Gráficos indicando qual a melhor profundidade para o segundo nível, estando o primeiro nível na profundidade de 6 m (em cima) e de 8 m (embaixo) [60].	79
4.12	Esquerda: número de níveis, de acordo com o NSE, para 3 profundidades. Direita: tabela com as profundidades ótimas para os diferentes níveis [52]. . .	80
4.13	Curvas do NSE para dois <i>air guns</i> à 6 m e 9 m, variando-se o volume do segundo (9 m) <i>air gun</i> , sabendo-se que o volume do primeiro (6 m) é de 500 cu.in. (esquerda) e 1.000 cu.in. (direita). No caso ótimo (menor NSE), nota-se que o <i>air gun</i> mais profundo tem sempre maior volume [60].	80
5.1	Ilustração de um arranjo da empresa PGS. Os retângulos indicam os <i>air guns</i> , onde verde é um <i>air gun</i> ativo e azul indica que este está desligado. Os círculos vermelhos indicam o raio máximo aproximado da bolha. Os números acima de cada <i>air gun</i> são apenas índices de identificação e os valores embaixo são os volumes, em cu.in. O volume total é de 4.130 cu.in. A malha é de 1 m x 1 m.	83
5.2	Ilustração dos 3 subarranjos, que agora detonam independentemente, valendo-se do conceito de fontes dispersas. À esquerda vê-se a referência aos subarranjos com seu respectivo volume.	84

5.3	Tabela com informações históricas dos dados sísmicos da Petrobras de 2000 à 2016. Estas informações contemplam dados adquiridos pela Petrobras, por outras empresas parceiras nos blocos e dados comprados.	85
5.4	Esquerda: ilustração em perfil da disposição dos 3 subarranjos (sb1, sb2 e sb3 da esquerda para a direita.). Direita: diferentes configurações para a fonte dispersa, que serão comparadas com os casos convencionais e multinível. . .	86
5.5	Em cima: esquerda: espectro de amplitude dos subarranjos 1 à 9 m (vermelho - 'sb1-9m') e 3 à 6 m de profundidade (azul - 'sb3-6m'); direita: espectro dos subarranjos 1 e 3 dispersos a 9 e 6 m (vermelho - 'sb1-9m + sb3-6m') e multinível (azul - 'sb1-9m - sb3-6m') com os mesmos subarranjos às mesmas profundidades do caso disperso. Embaixo: comparação entre a fonte dispersa (vermelho) e a fonte convencional (azul) à 6 m ('sb1-sb3-6m'), esquerda, e 8 m ('sb1-sb3-8m'), direita.	86
5.6	Comparação entre os subarranjos 2 (azul) e 3 (vermelho) à 6 m de profundidade.	87
5.7	Em cima: esquerda: espectro de amplitude dos subarranjos 1 à 12 m (vermelho - 'sb1-12m'), 2 à 6 m (azul - 'sb2-6m') e 3 à 9 m de profundidade (verde - 'sb3-9m'); direita: espectro dos subarranjos 1, 2 e 3 dispersos à 12, 6 e 9 m (vermelho - 'sb1-12m + sb2-6m + sb3-9m') e multinível (azul - 'sb1-12m - sb2-6m - sb3-9m') com os mesmos subarranjos às mesmas profundidades do caso disperso. Embaixo: comparação entre a fonte dispersa (vermelho) e a fonte convencional (azul) à 6 m ('sb1-sb2-sb3-6m'), esquerda, e 8 m ('sb1-sb2-sb3-8m'), direita.	88
5.8	Em cima: esquerda: espectro de amplitude dos subarranjos 1 à 13,5 m (vermelho - 'sb1-13,5m'), 2 à 8 m (azul - 'sb2-8m') e 3 à 10,5 m de profundidade (verde - 'sb3-10,5m'); direita: espectro dos subarranjos 1, 2 e 3 dispersos à 13,5, 8 e 10,5 m (vermelho - 'sb1-13,5m + sb2-8m + sb3-10,5m') e multinível (azul - 'sb1-13,5m - sb2-8m - sb3-10,5m') com os mesmos subarranjos às mesmas profundidades do caso disperso. Embaixo: comparação entre a fonte dispersa (vermelho) e a fonte convencional (azul) à 6 m ('sb1-sb2-sb3-6m'), esquerda, e 8 m ('sb1-sb2-sb3-8m'), direita.	89

5.9	Padrão de diretividade do plano IL (esquerda) e XL (direita) para a fonte convencional à 8 m de profundidade. Estes são os mesmos padrões das Figuras 3.25 e 3.26.	90
5.10	Padrão de diretividade do plano IL (esquerda) e XL (direita) para a fonte fonte multinível 12-6-9 m de profundidade.	90
5.11	Padrão de diretividade do plano IL (esquerda) e XL (direita) para a fonte dispersa 12-6-9 m de profundidade.	91
5.12	À esquerda tem-se uma comparação entre a fonte dispersa apresentada na Figura 5.8 com a fonte convencional à 8 m de profundidade. O eixo da frequência está em escala logarítmica para elucidar a região de baixas frequências. Percebe-se também o preenchimento das regiões com <i>notches</i> . À direita é mostrada a comparação entre as duas fontes dispersas apresentadas nas Figuras 5.7 e 5.8, destacando-se o ligeiro ganho nas baixas frequências.	92
A.1	Apesar do aumento no investimento no setor energético nos últimos anos, o cenário financeiro do mercado petrolífero aponta para a redução de investimentos [63]. (a) Aumento do capital industrial (excluindo-se o capital financeiro); (b) capitalização dos diferentes segmentos de O&G antes e após o declínio no preço do petróleo.	100
A.2	Investimento acumulado, de 2011 à 2035, em infraestrutura de fornecimento de energia, por combustível (em valores de 2010) [64].	101
A.3	Previsão de gastos em E&P [65].	102
A.4	Investimentos em diferentes países na cadeia de E&P [63].	103
A.5	Gastos com sísmica, mostrando acentuado crescimento desde 2004 [66]. . . .	104
A.6	Fornecimento de combustível líquido [64].	104

RESUMO

APOLONIO, Felipe Andrade, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2016. **Uma proposta para uma fonte sísmica marítima impulsiva *broadband* usando o conceito de fontes dispersas.** Orientador: Daniel H. T. Franco.

Fonte sísmica é um componente indispensável ao método sísmico de exploração de petróleo. No caso marítimo, fontes impulsivas compostas por *air guns* têm sido vastamente usadas por décadas. A proposta deste trabalho é apresentar uma fonte que seja capaz de realçar as baixas frequências tão necessárias ao dado sísmico, além de atenuar o efeito prejudicial do *ghost* da fonte. Para tal, empregou-se o conceito de fontes dispersas, que consiste em dedicar uma unidade de fonte para uma faixa de frequência. Neste trabalho, foi utilizado cada um dos subarranjos que compõem a fonte sísmica marítima como sendo uma unidade de fonte. Uma consequência imediata da fonte dispersa é o caráter isotrópico e homogêneo do seu padrão de diretividade, quando comparada com outras fontes disponíveis no mercado de sísmica. Além de atenuar o efeito do *ghost*, realçando assim todas as frequências impactadas por tal fenômeno, encontrou-se uma expressão analítica que descreve os *notches* do padrão de diretividade de uma fonte sísmica impulsiva.

ABSTRACT

APOLONIO, Felipe Andrade, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2016.
A proposal for a broadband impulsive marine seismic source using the dispersed sources concept. Advisor: Daniel H. T. Franco.

Seismic sources are imperative regarding the seismic exploration for oil and gas. Offshore, impulsive sources comprised by air guns have been extensively used for decades. The proposal here is to present a source able to enhance the so required low frequencies as well as attenuate the source ghost effect that damages the seismic data. Therefore, it was borrowed the dispersed source concept, consisting of dedicate a source unit to a frequency bandwidth. In this work, each subarray which comprise a marine seismic source was used as a unit source. A direct consequence of this dispersed source is the isotropic and homogeneous feature of its directivity pattern when compared with other sources available in the seismic market. Besides atnuatte the ghost efect, enhancing all frequencies affected by this phenomenon, we found an analytical expression to describe the behavior of the directivity pattern of a impulsive seismic source.

Capítulo 1

Introdução

A Geofísica, como indica seu nome, relaciona-se com a física da Terra e sua atmosfera. Seu início pode ser atribuído como sendo a partir das descobertas (ou constatações) de Gilbert, segundo o qual a Terra se comportava como um imenso magneto, e da teoria da Gravitação de Newton. Apesar da mineração e busca por metais datarem de tempos remotos, o uso científico da Geofísica data da metade do século XIX, quando Von Wrede, usando um teodolito magnético ¹, mostrou ser possível localizar depósitos de minerais magnéticos sob a superfície terrestre.

A contínua expansão na demanda por metais de todos os tipos e o enorme aumento no uso de produtos derivados do petróleo (cuja exploração e produção em escala comercial também datam da metade do século XIX) levaram ao desenvolvimento de técnicas geofísicas mais sensíveis para a localização de depósitos e estruturas em subsuperfície. A detecção destas estruturas dependia das características que diferenciavam elas do meio circundante. Assim, métodos baseados na variação das propriedades elásticas das rochas foram desenvolvidos para detectar estruturas associadas com óleo e gás, tais como falhas geológicas, anticlinais, sinclinais (a Seção 4.8 da referência [2] fornece conceitos básicos da geologia de exploração de petróleo). A variação de outras propriedades, tais como a condutividade elétrica, correntes naturais na Terra, mudanças locais na gravidade, campo magnético, radioatividade, fornecem informações sobre a natureza das estruturas em subsuperfície, e então permite ao geofísico determinar os

¹Dispositivo desenvolvido por Johann von Lamont no século XIX que media a declinação, inclinação e intensidade do campo magnético da Terra [1].

1. Introdução

locais mais *favoráveis* para os depósitos procurados [2].

Existem uma variedade de métodos geofísicos para investigação, cada um sensível a alguma propriedade do meio em subsuperfície. Dentre tais métodos destacam-se: sísmico, gravitacional, magnético e elétrico. Estes métodos podem ser usados de maneira complementar, um preenchendo a lacuna de outro método, devido às suas peculiaridades e limitações. O presente trabalho, no entanto, se concentrará exclusivamente no método sísmico. Não entrar-se-á em detalhes acerca dos outros métodos, mas o leitor interessado pode consultar as referências [2] e [3] para melhor entendimento.

1.1 Motivação

Como será visto no Capítulo 2, o método sísmico baseia-se na emissão de uma fonte de energia em direção à subsuperfície. Esta interação com o meio é então registrada, obtendo-se o dado sísmico, que por sua vez é invertido numa tentativa de se obter informações do meio. Nesta tentativa de inverter o dado sísmico, o registro de informação de baixa frequência tem se mostrado essencial. A necessidade se tornou tão patente que o Comitê de Pesquisa da SEG (*Society of Exploration Geophysicist*), uma das associações que concentram os esforços em pesquisa geofísica no mundo, organizou, em 2005, um *workshop* em exploração sísmica de baixa frequência, dada tamanha importância do assunto [4].

Era necessário, então, suprir limitações tais como (i) a reduzida capacidade das fontes sísmicas marítimas (*air gun*²) e terrestres (vibradores e explosivos) em emitir baixas frequências, (ii) o fato do ruído *crescer exponencialmente* conforme a frequência *diminui*, o que torna a relação sinal-ruído (S/N) pobre nesta faixa e (iii) o efeito danoso da reflexão fantasma (*ghost*) na superfície terra-ar ou água-ar (este efeito será visto no Capítulo 3), que impõe, por sua vez, severas atenuações (chamadas de *notches*) nas baixas frequências (na verdade, em todo o espectro) emitidas já em deficiência pela fonte³.

²Canhão de ar comprimido, discutido no Capítulo 3, largamente utilizado como fonte marítima em sísmica de exploração e que será o elemento constituinte da fonte sísmica estudada neste trabalho.

³Tal efeito atua de forma igual nos receptores - ou sensores - do campo de onda, mas não será discutido neste trabalho.

1. Introdução

Muitos trabalhos e melhorias foram desenvolvidos a partir de então, tanto do ponto de vista de engenharia quanto do ponto de vista geofísico, de forma a atacar principalmente os efeitos do *ghost* da fonte [5] e dos receptores [6–8]. Várias técnicas foram desenvolvidas, nenhuma definitiva e perfeita.

São notórias as melhorias que as baixas frequências fornecem na resolução sísmica, diminuindo os lobos laterais do sinal sísmico de uma reflexão que poderia interferir de forma destrutiva com uma reflexão vizinha, além do seu alto poder de penetração em subsuperfície [4,9]. Deve-se ter em mente que as baixas frequências geradas por uma fonte sísmica viajam muito mais longe do que as altas, tal como fazem uma onda acústica no ar ou mesmo eletromagnética. Assim, a energia disponível nas baixas é especialmente importante para a exploração de objetivos geológicos profundos, tais como sub-sal⁴ e sub-basalto⁵.

No entanto, talvez a maior motivação onde este trabalho ganha mais voz está no ganho nas baixas frequências. Isto porque esta faixa de frequência desempenha um papel importantíssimo no processo de inversão do dado sísmico, como será comentado no Capítulo 2. As baixas frequências são imprescindíveis para o processo chamado de *Full Waveform Inversion* (FWI), que parte de um modelo inicial do campo de velocidades das camadas geológicas e, por meio de iterações inerentes ao método, encontra uma representação ideal para o meio geológico. Como pode ser visto na Figura 2.9 do Capítulo 2, os resultados melhoram à medida que mais baixas frequências são incluídas. Ressalta-se que qualquer ganho nas baixas frequências de uma fonte, em se comparando com as fontes convencionais, é de incomensurável valor, que por sua vez pode ser agregado a toda a cadeia da exploração sísmica.

A questão de licenciamento ambiental é um tema delicado quando se trata de aquisição sísmica, e é também afetada pelo método proposto neste trabalho. Os órgãos de proteção ambiental ligados ao governo⁶ ao redor do mundo exigem que as empresas

⁴É comum o emprego do prefixo *sub* para designar estruturas geológicas que se encontrem abaixo de uma outra. *Sub* refere-se *espaço*, ao passo que *pré* refere-se a *tempo*. Em geologia, uma estrutura A que se depositou antes (pré) de uma outra B pode, hoje, encontrar-se acima (sobre) da mesma.

⁵O basalto é uma rocha ígnea com alto poder de absorção de ondas sísmicas.

⁶No Brasil este órgão é o IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.

1. Introdução

de aquisição sísmica façam estudos de impactos ambientais na fauna e flora locais possíveis de serem atingidos com a atividade sísmica. Na sísmica marítima este trabalho é mais delicado devido à carência de meios que mensurem este impacto. Uma forma de mitigar tal avaliação é na modelagem do efeito da detonação dos canhões de ar, que emitem, além da banda de frequência útil à sísmica (até ~ 200 Hz), frequências até a casa das dezenas de kHz. O método proposto, como será comentado, consegue minimizar em até 9 dB o pico de máxima intensidade do pulso emitido pela fonte estudada. Observa-se que estudos e modelagens de impacto ambiental (que não são o objetivo deste trabalho) deverão ser realizados.

Por fim, citamos uma motivação econômica para o presente trabalho. Como pode ser conferido no Apêndice A, as cifras que envolvem a indústria do petróleo são altíssimas, na casa dos trilhões de US\$. Deste montante, uma única aquisição de dados sísmicos abarca até poucas centenas de milhões de US\$. Soma-se a isso o fato de que mesmo em época de crise do mercado, principalmente devido à atual baixa do preço do petróleo, não existe perspectiva de alteração da matriz energética fóssil para uma outra renovável. As empresas exploradoras de petróleo têm, muitas vezes, que cumprir com obrigações, como realizar aquisições sísmicas e perfurar poços de petróleo. Logo, mesmo num cenário adverso, a atividade sísmica ainda é o caminho mais seguro.

1.2 Objetivo do Trabalho

O presente trabalho visa, principalmente, realçar as baixas frequências (a saber, até $\sim 15 - 20$ Hz) do pulso emitido por uma fonte sísmica marítima impulsiva, como o *air gun*, que será estudada no Capítulo 3. É de se comentar que a proposta apresentada neste trabalho realça também as altas frequências, por isso é usado o termo *broadband* (banda larga/extensa, numa tradução livre), onde a maior parte do espectro possui amplitudes mais uniformes em comparação às fontes tradicionais. Para tanto, a metodologia proposta faz uso do conceito de fontes dispersas, introduzido recentemente por A. J. Berkhout [10].

Como será visto no Capítulo 3 quando for estudado a *diretividade* de fontes

1. Introdução

sísmicas, no caso marítimo a própria configuração de um arranjo de *air gun* também provoca *notches* no espectro de amplitudes do dado sísmico de forma análoga ao *ghost* da fonte. Este trabalho também objetiva elucidar os conceitos de diretividade, onde será possível ver analiticamente como ocorrem os *notches* no espectro. Além disso, o presente trabalho, ainda por meio do conceito de fontes dispersas, propõe uma solução para amenizar os danos dos *notches* atribuídos ao arranjo de fontes, o que ainda não existe no mercado de exploração sísmica.

Além do já exposto, será estudado no Capítulo 2 a questão da limitação da amostragem espacial dos dados sísmicos. A proposta de fonte apresentada neste trabalho poderá, como consequência direta da sua aplicação, apresentar uma sensível melhoria no que se refere à amostragem espacial, visto que as fontes dispersas atuam de forma independente, ao contrário da forma convencional empregada atualmente. Isto possibilita que se use o teorema da amostragem, que será estudado na Seção 2.3, indicando um possível ganho operacional. No entanto, como será discutido oportunamente, estudos são necessários neste sentido.

1.3 Outros Trabalhos

O esforço para a realização do trabalho deste doutorado começou, na verdade, no ano de 2010 com uma tentativa de se aplicar a Transformada Wavelet Direcional em problemas de imagens de radar. Os esforços desenvolvidos no tratamento de wavelets renderam a publicação da referência [11]. As circunstâncias foram tais que o objeto do trabalho passou a ser a pesquisa de dados sísmicos, ainda com o intuito de se aplicar o ferramental da Transformada Wavelet.

No entanto, ao se propagar na subsuperfície, o campo de ondas acústico é atenuado de uma maneira dependente da frequência. Este efeito, por sua vez, é inerente ao processo e é corrigido na etapa de processamento do dado sísmico. Nesta correção, a forma do pulso que define o campo de onda torna-se invariante no tempo e assim o domínio de Fourier convencional passa a ser o indicado. A Transformada Wavelet, bem como a Análise Microlocal, podem ser usadas na detecção de falhas e fraturas, por

1. Introdução

exemplo, o que não foi objeto de estudo deste trabalho que, por sua vez concentrou-se em *como* o campo de onda é gerado, e não em como este campo de onda interage com as camadas geológicas e é processado digitalmente.

Outras tentativas de trabalho, como mostrar o impacto da diretividade no processo da deconvolução do dado sísmico, ou mesmo como se dá a interação entre os *air guns* em função de seus parâmetros, apesar de se mostrarem relevantes, já tinham sido estudados pela comunidade científica. Outro problema, como propor uma fonte sísmica completamente isotrópica, esbarrou na limitação operacional para rebocar muitos *air guns*.

Este trabalho está dividido da seguinte forma: no Capítulo 2 é feito um apanhado geral do método sísmico da reflexão, repassando pelas principais áreas do método bem como seus conceitos fundamentais. No Capítulo 3 serão discutidos aspectos e fenômenos relacionados à fonte sísmica marítima impulsiva (*air gun*), que servirão de base para o Capítulo 4, onde os conceitos de fontes dispersas e fontes multinível serão apresentados. O Capítulo 5 é dedicado à proposta deste trabalho bem como a análise dos resultados. Por fim, no Capítulo 6 as conclusões e consequências imediatas desta proposta serão apresentados, além de muitos trabalhos e estudos que aparecerão como desdobramentos naturais da metodologia apresentada.

Capítulo 2

O Método Sísmico

O método sísmico é, de longe, o mais importante em termos de investimentos e retorno em conhecimento geológico, o que se deve, principalmente, à sua alta precisão, resolução e grande poder de penetração do campo de ondas¹. O vasto uso do método se dá principalmente na exploração de petróleo, onde raramente um poço exploratório é perfurado² sem informação sísmica [2]. A exploração sísmica é uma herança dos estudos sísmicos de terremotos, e foi sendo aperfeiçoada a partir da década de 20. Quando um terremoto ocorre, pode-se dizer que a região vizinha ao seu hipocentro recebe uma descarga de energia, provocando o movimento das rochas nestes locais, gerando as famigeradas ondas sísmicas de corpo - *body waves* - P (primárias, irrotacionais, longitudinais, compressionais) e S (secundárias, rotacionais, transversais, cisalhantes) e as ondas superficiais - *surface waves* - (como as ondas Rayleigh e Love)³, que viajam

¹O termo campo de ondas ou *wavefield* é bastante comum nos textos referentes ao método sísmico, isto porque na verdade tem-se inúmeros eventos sísmicos, referentes aos mais diversos aspectos geológicos, num único registro de campo. Mais adiante, na Seção 2.2, será comentado sobre alguns eventos sísmicos.

²Numa estimativa muito grosseira, um poço de petróleo em mar é sempre mais custoso do que a aquisição sísmica relacionada a ele. No entanto vários fatores têm que ser levado em conta, como parametrização e objetivos da aquisição (levantamento) sísmico, localização e objetivo do poço, disponibilidade das equipes de sísmica e poço, fatores econômicos, etc.

³As ondas de interesse na exploração sísmica são, majoritariamente, as ondas P. As ondas S, apesar de fornecerem informações de interesse geológico, estão, pouco a pouco, ganhando notoriedade, principalmente devido às aquisições OBS (*Ocean Bottom Seismic*), que possuem receptores no leito marinho, possibilitando o registro de tais ondas, visto que estas não se propagam em meios fluidos (meios que não possuem resistência ao cisalhamento), como a água. As ondas de superfície são consideradas como ruídos. Não é o objetivo do presente trabalho detalhar o conhecimento das ondas sísmicas. Para conceitos descritivos, o leitor é endereçado às seções 4.2 da referência [2] e 3.3 da referência [3]. Para uma análise matemática sugere-se as seções 2.3 à 2.7 de [12].

2. O Método Sísmico

até serem, possivelmente, registradas por sismógrafos espalhados pela Terra. Através da análise destes dados é possível inferir as propriedades elásticas das camadas de rocha percorridas pelas ondas.

Diferentemente da sismologia de terremotos que investiga profundidades de até poucas centenas de quilômetros até a litosfera, no método sísmico de exploração de petróleo a profundidade não passa de cerca de 10km. Ademais, as fontes de energia⁴, na exploração sísmica, são controláveis e móveis, além das distâncias entre a fonte e os pontos de registro (distâncias comumente chamadas de *offset*) serem pequenas (da ordem de dezenas de metros a alguns quilômetros), como será visto na Seção 2.2.

É importante notar, aqui, que existem os métodos sísmicos da *reflexão* e o da *refração*. A refração, em sísmica, se refere-se especificamente àquelas ondas viajando num meio 1 que, ao incidirem numa interface - que separa este meio de um meio 2 com *velocidade maior* - num ângulo maior que o crítico, passam a viajar ao longo da interface com a velocidade do meio 2, o que causa uma perturbação na interface que por sua vez, via condições de contorno, passa a gerar no meio 1 as *head waves*, sendo estas as ondas objeto de estudo da sísmica de refração. Ambos os métodos apresentam diferenças em muitos aspectos, sendo o da *refração* usado, predominantemente, para outras investigações - avaliações regionais de bacias, tectonismo, análise da crosta terrestre, exploração mineral, engenharia civil - que não o da exploração de petróleo. Todos os desenvolvimentos deste Capítulo referem-se ao método da *reflexão*. Assim, doravante, ao ser utilizado o termo *método sísmico*, estará se referindo ao método sísmico da *reflexão*.

Passaremos agora para alguns conceitos e etapas indispensáveis à aplicação do método sísmico. O objetivo é, apenas, fornecer uma visão macro de como se realiza uma **aquisição** de dados sísmicos, comentar sobre o **processamento** (ou processamento sísmico) e pautar qual é o papel da **interpretação** dos dados sísmicos. Ao longo do

⁴Todas as fontes de energia no método sísmico são fontes de ondas compressoriais ou acústicas, e o seu efeito (ou forma de onda temporal, ou assinatura da fonte) muitas vezes recebe o nome de *wavelet*. Ondas elásticas, como as ondas S e as superficiais, apenas aparecem em meios que suportam o cisalhamento ou rotação de suas partículas (o que não ocorre, como já dito, em meios fluidos). Estas ondas apenas aparecem no caso terrestre ou no caso marítimo com receptores de fundo marinho - OBS. Nestes casos diz-se que as ondas rotacionais provieram de uma conversão de ondas compressoriais numa incidência oblíqua [2,12].

2. O Método Sísmico

Capítulo, serão abordados também alguns conceitos e métodos inerentes ao processo como um todo, como o modelo convolucional e a teoria da amostragem. Deve-se ter em mente que o nível da informação, na maioria das vezes, não passa do caráter informativo, mas sempre que necessário, referências serão indicadas para uma maior riqueza de detalhes e profundidade das análises.

2.1 O Modelo Convolucional

Antes de falar propriamente do modelo convolucional, é útil discorrer um pouco sobre as velocidades dos diferentes materiais que compõem a geologia da subsuperfície bem como como as ondas se comportam na interface entre dois meios com propriedades distintas. Para tal, a Figura 2.1 ilustra os intervalos mais prováveis da velocidade das ondas P em diferentes rochas e materiais.

v_p (km s ⁻¹)	
<i>Unconsolidated materials</i>	
Sand (dry)	0.2–1.0
Sand (water-saturated)	1.5–2.0
Clay	1.0–2.5
Glacial till (water-saturated)	1.5–2.5
Permafrost	3.5–4.0
<i>Sedimentary rocks</i>	
Sandstones	2.0–6.0
Tertiary sandstone	2.0–2.5
Pennant sandstone (Carboniferous)	4.0–4.5
Cambrian quartzite	5.5–6.0
Limestones	2.0–6.0
Cretaceous chalk	2.0–2.5
Jurassic oolites and bioclastic limestones	3.0–4.0
Carboniferous limestone	5.0–5.5
Dolomites	2.5–6.5
Salt	4.5–5.0
Anhydrite	4.5–6.5
Gypsum	2.0–3.5
<i>Igneous/Metamorphic rocks</i>	
Granite	5.5–6.0
Gabbro	6.5–7.0
Ultramafic rocks	7.5–8.5
Serpentinite	5.5–6.5
<i>Pore fluids</i>	
Air	0.3
Water	1.4–1.5
Ice	3.4
Petroleum	1.3–1.4
<i>Other materials</i>	
Steel	6.1
Iron	5.8
Aluminium	6.6
Concrete	3.6

Figura 2.1: Intervalos de velocidade das ondas P, em km/s, em diferentes materiais e rochas. As rochas reservatório de petróleo são, predominantemente, os arenitos (*sandstone*) e carbonatos (*limestone*). Retirado da referência [3].

Em se tratando das ondas S, se considerar-se um meio que a suporte (lembrando: um meio não fluido, que possua resistência ao cisalhamento), a velocidade desta pode chegar até a 70% da velocidade da onda P neste mesmo meio [3]. Já as ondas de superfície apresentam velocidades sempre menores que a da onda S.

2. O Método Sísmico

Agora é possível definir o conceito de impedância acústica, uma medida de resistência ao movimento das partículas. Para uma dada camada geológica i , a impedância acústica com incidência normal é dada por:

$$Z_i = \rho_i v_i , \quad (2.1)$$

onde ρ_i é a densidade da camada i e v_i é a velocidade de propagação - da onda P - na camada i . O coeficiente de reflexão r_i , para uma onda incidente de amplitude A_I , de uma interface que separa dois meios i e $i + 1$ é dado por:

$$r_i \equiv \frac{A_R}{A_I} = \frac{Z_{i+1} - Z_i}{Z_{i+1} + Z_i} , \quad (2.2)$$

em que A_R é a amplitude da onda refletida. De forma análoga, o coeficiente de transmissão T_i é dado por:

$$T_i \equiv \frac{A_T}{A_I} = \frac{2Z_i}{Z_{i+1} + Z_i} , \quad (2.3)$$

em que A_T é a amplitude da onda transmitida. Para maiores detalhes sobre coeficientes de reflexão e transmissão num ângulo qualquer, o leitor é convidado às seções 2.1.2 e 2.6.2 da referência [16].

Note que quando uma onda que viaja num meio i de impedância Z_i incide numa interface que o separa de um meio $i + 1$ de impedância Z_{i+1} tal que $Z_{i+1} < Z_i$ tem-se $r_i < 0$, o que implica numa mudança de fase na polaridade da onda refletida. No mar, no caso especial da incidência na interface água-ar⁵, considerando a densidade da água do mar como sendo 1,0 g/cm³ e do ar como 0,0129 g/cm³, e usando os valores de velocidade na Figura 2.1, encontra-se que $r \approx -1$; neste caso, a interface água-ar funciona como um espelho quase perfeito, se forem desconsideradas as flutuações desta interface devido ao movimento das ondas. Este tipo de reflexão é de grande importância no método sísmico, pois gera o chamado fantasma (*ghost*), ou fonte virtual, que será estudado em detalhes no Capítulo 3. Tal fenômeno acarreta uma severa redução em

⁵Também chamada de superfície livre.

2. O Método Sísmico

algumas frequências de interesse sísmico, gerando um *notch*⁶ (em tradução livre: corte, entalhe) no espectro de amplitude do sinal.

O modelo convolucional é extremamente simplificado, onde considera-se um meio composto por camadas horizontais, de impedância acústica $Z_i = \rho_i v_i$, e correspondentes coeficientes de reflexão e transmissão. Considere-se ainda um sistema de aquisição em que a fonte de energia, ou pulso sísmico, $w(t)$ e o receptor estejam localizados na mesma posição em superfície. Os processos envolvidos na geração do registro de campo, também chamado de *traço sísmico*⁷, podem ser vistos como a sequência de operações:

1. Na superfície emite-se o pulso $w(t)$ que viaja para baixo;
2. Na primeira interface, a amplitude de cada amostra do pulso é multiplicada pelo coeficiente de reflexão, e a forma de onda resultante retorna à superfície onde é registrada;
3. Na mesma interface parte da energia do pulso, representada pelo produto de suas amplitudes e o coeficiente de transmissão, atravessa a interface e continua a descer;
4. A fração de energia transmitida atinge sucessivamente as interfaces subsequentes, repetindo-se em cada uma delas o que ocorreu na primeira interface;
5. No trajeto ascendente, repetem-se, no sentido inverso, os fenômenos descritos nas etapas 2, 3 e 4. Assim, os sinais refletidos para baixo representam os fenômenos chamado de *múltiplas* e que não serão considerados;
6. As reflexões nas diversas interfaces são registradas, cada uma relacionada ao tempo de emissão-reflexão-registro, também conhecido como tempo duplo (ida e

⁶Apesar deste efeito estar presente em toda a banda de frequência do espectro de amplitude do sinal, já existem tecnologias de aquisição que o corrigem e/ou minimizam nas altas frequências. No entanto, o maior desafio é contorná-lo nas baixas frequências, principalmente o que se refere à fonte sísmica marítima.

⁷No caso marítimo como no terrestre, apesar de muitas vezes o termo *receptor* ser usado, entenda-o como um *arranjo de receptores* justapostos formando uma *estação* ou *canal*. O registro desta estação ou canal é que recebe o nome de *traço sísmico*. Na Seção 2.3.2 será as reais causas de um arranjo.

2. O Método Sísmico

volta). Nota-se aí, a dificuldade de se isolar a contribuição individual de cada refletor.

Este modelo despreza algumas coisas como o efeito do coeficiente de transmissão (como na prática r é pequeno, temos $T \approx 1$), reflexões múltiplas, o pulso sísmico não muda sua forma ao se propagar (sem absorção), nem há ruídos ambientais, não contempla difrações, dentre outros aspectos. No entanto, apesar de simples em sua formulação, este modelo pode ser ampliado para entender conceitualmente o que ocorre em subsuperfície com a passagem da onda. Como pode ser visto na Figura 2.2, o traço registrado, $s(t)$, é a convolução entre o pulso emitido pela fonte, $w(t)$, e a série temporal de refletividades⁸ $r(t)$. Assim:

$$s(t) = w(t) * r(t) , \quad (2.4)$$

onde o sinal $*$ denota a operação de convolução, que é dada por:

$$f(t) * g(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) g(t - \tau) d\tau , \quad (2.5)$$

onde f e g são duas funções quaisquer.

Dadas estas informações incipientes da geração e propagação das ondas sísmicas, é possível ter uma noção de como a geologia influencia as reflexões registradas, as quais representam as informações que o geofísico usa para aplicar o processo inverso, ou seja, extrair a descrição da geologia responsável por gerar aquele dado sísmico registrado. Este tema será abordado nas seções 2.4 e 2.5.

O método sísmico faz parte de uma metodologia chamada *resposta impulsiva*, que está presente em muitos estudos científicos da natureza e problemas de engenharia. De forma geral, esta metodologia funciona da seguinte forma: (i) excita-se o meio

⁸Matematicamente, $r(t)$ pode ser escrito como uma soma de funções impulso unitárias, multiplicadas por seus respectivos coeficientes de reflexão r_i , atrasadas pelo seu correspondente tempo duplo t_i . Ou seja: $r(t) = \sum_i r_i \delta(t_i - t_j)$, onde $\delta(t_i - t_j)$ é o delta de Kronecker:

$$\delta(t_i - t_j) = \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se } t_i = t_j \\ 0 & \text{se } t_i \neq t_j \end{cases} .$$

2. O Método Sísmico

com uma fonte de energia pontual (impulso⁹), (ii) registra-se a sua resposta e, após diferentes aplicações dos passos anteriores, (iii) infere-se as propriedades do meio a partir dos dados, pois cada (im)pulso emitido pela fonte traz informações sobre o meio. Na prática, no entanto, muitas dificuldades (comportamento absorvido do meio, fenômenos não esperados, ruídos, fonte não impulsiva, etc) vêm à tona. No método sísmico, uma das limitações mais difíceis de serem contornadas é o fato de a fonte ser não impulsiva, ou seja, seu espectro de frequências, na região de interesse sísmico (entre 0 Hz e 150 a 200 Hz), apresentar deficiências, que são inerentes ao aparato operacional. Estas limitações serão vistas em detalhes quando falarmos do *air gun* e sistema *ghost* no Capítulo 3.

2.2 Aquisição Sísmica

É interessante deixar claro ao leitor que o método sísmico aplicado em terra e em mar, apesar de possuírem o mesmo objetivo (subsidiar o processo de locação de poços), possuem operacionalidades completamente diferentes. Enquanto no mar os levantamentos sísmicos são feitos com navios, que executam toda a tarefa, desde rebocar as fontes sísmicas, os cabos com receptores, ou mesmo instalar os receptores de fundo marinho, quando for o caso, em terra há diferentes equipes que trabalham desde a distribuição das fontes até os receptores. A natureza das fontes sísmicas pode diferir, onde é usado em terra, geralmente, fonte impulsiva ou vibrador mecânico e no mar destaca-se majoritariamente o uso de fontes impulsivas à base de canhões de ar comprimido - *air guns*; as diferenças valem também para os receptores, pois em terra são usados geofones e acelerômetros - medidores de velocidade e aceleração de partículas respectivamente - e em mar predominantemente usa-se os hidrofones - sensores de pressão - apesar do crescente uso de técnicas com sensores de velocidade de

⁹Por impulso entende-se um sinal altamente concentrado e de curta duração no domínio do tempo, um impulso tipo $\delta(t)$ de Dirac. No domínio de Fourier tal impulso tem *espectro branco*, com todas as frequências com amplitude iguais a 1. Lembrando, a transformada de Fourier de uma função qualquer $f(t)$, $\mathcal{F}\{f(t)\}$, é dada por:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt .$$

2. O Método Sísmico

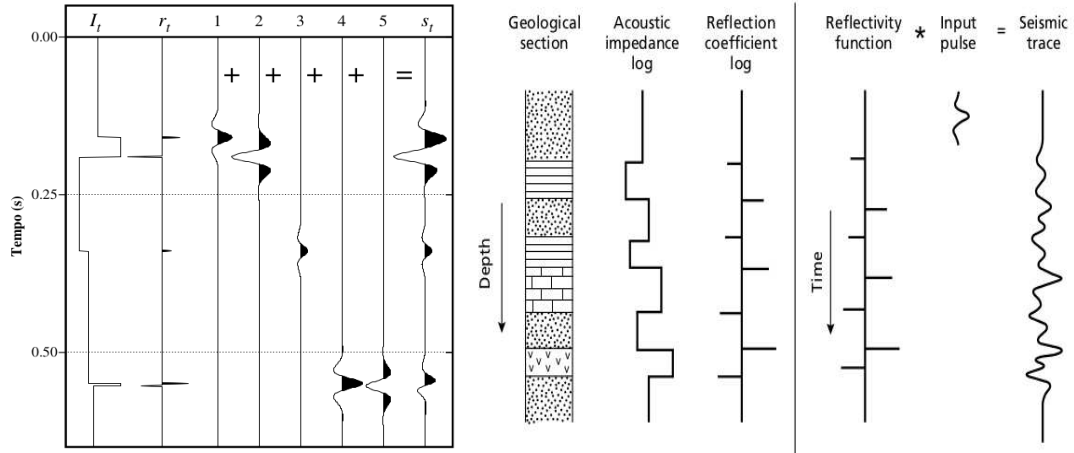


Figura 2.2: O Modelo Convolutivo é ilustrado de duas maneiras. Nas séries, usa-se a convenção de valores negativos à esquerda da vertical e positivos à direita. Esquerda: série de impedâncias em tempo ($I_t = Z(t)$), seguida da série de refletividades ($r_t \equiv r(t) = \sum_i r_i$). As séries de 1 à 5 são o resultado da multiplicação do pulso $w(t)$ (não é ilustrado, mas sua forma pode ser inferida de qualquer um dos traços de 1 à 5) com cada um dos coeficientes de reflexão da série $r(t)$ - observe a inversão de polaridade quando $r_i < 0$ e a amplitude modulada por cada valor de r_i . O traço resultante $s_t = s(t)$ é a soma das séries de 1 à 5, sendo esta operação linear equivalente à convolução entre $w(t)$ e $r(t)$ [16]. Direita: primeiro tem-se, em escala de profundidade, a seção geológica (cada conjunto de símbolos como traços, pontos, ladrilhos e etc representam uma dada camada com suas respectivas propriedades) e os perfis (ou *logs*) de impedância acústica e de coeficientes de reflexão. Depois são ilustrados, em tempo, a função ou série refletividade $r(t)$, o pulso sísmico (*input pulse*) emitido pela fonte $w(t)$ (apesar de ser ilustrado uma forma de onda sintética - não real/modelada - tal forma denota o caráter não impulsivo da fonte) e o traço sísmico (*seismic trace*) resultante $s(t)$, como sendo a convolução entre $w(t)$ e $r(t)$ [3].

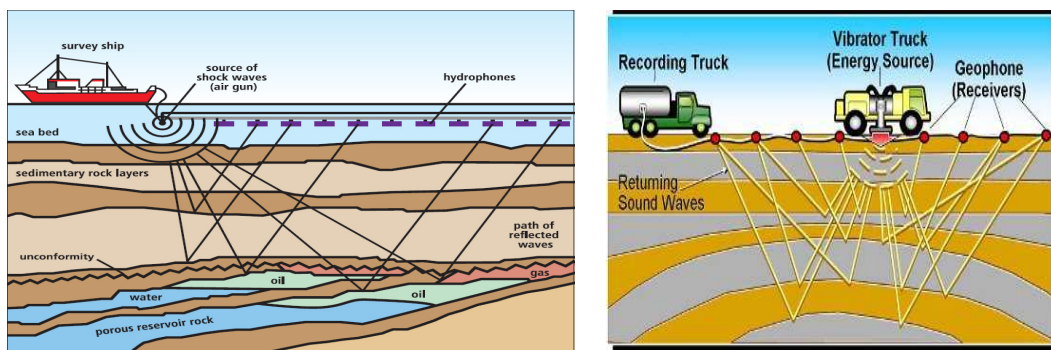
partículas, cujo objetivo é aumentar o espectro de amplitude do sinal registrado [6]. As fontes sísmicas marítimas serão estudadas no Capítulo 2, ao passo que mais detalhes sobre fontes sísmicas usadas em terra, bem como os receptores usados tanto em terra quanto em mar, podem ser encontrados nas referências [2,3,13,14].

Pode-se ilustrar, de forma pictórica, como se dão as aquisições (levantamentos) de dados sísmicos em mar e em terra. A figura ilustra uma situação marítima em 2.3(a) e terrestre em 2.3(b). No caso marítimo, é mostrado uma visão em perfil geologia local, com a lâmina d'água e algumas camadas sedimentares, ilustrando reservatórios de água, óleo e gás¹⁰; é mostrado também o navio sísmico (*survey ship*), a fonte de ondas sísmicas (*air gun* - na prática é um arranjo ou *array* de vários *air guns*, como

¹⁰A título de informação, os reservatórios são formados, em sua grande maioria, por rochas porosas e permeáveis. É nos poros destas rochas que se localizam os fluidos.

2. O Método Sísmico

será explicado no Capítulo 3), e um cabo com os receptores das ondas, os hidrofones¹¹. É ilustrado também algumas frentes de onda emergindo da fonte, além da trajetória de alguns raios que, sempre que encontrarem um contraste de impedância acústica, serão refletidos, até que a onda que estes representam seja registrada pelos hidrofones. No caso terrestre, em termos operacionais, tem-se a fonte, aqui representada por um vibrador mecânico (*Vibrator Truck*) e um dispositivo que coleta os registros (*Recording Truck*) dos geofones.



(a) Ilustração de uma aquisição sísmica marítima 2D [17].

(b) Ilustração de uma aquisição sísmica terrestre 2D [18].

Figura 2.3: Representação esquemática das operações sísmicas de campo mostrando alguns componentes operacionais e uma hipotética geologia.

É importante reforçar que estes desenhos são meramente ilustrativos, não denotando todos os processos envolvidos num levantamento sísmico. A etapa anterior à execução de um levantamento é chamada de *Survey Design* (Desenho da Aquisição) e tem por objetivo realizar modelagens e estudos complementares, a partir de informações preexistentes na área (dados sísmicos antigos, informações geológicas, dados de poços, etc), para encontrar a melhor estratégia para a aquisição, levando-se em conta o(s) alvo(s) geológico(s) (um reservatório ou possível reservatório de petróleo) que se deseja mapear. Para enriquecer a compreensão, é ilustrado na Figura 2.4 um navio sísmico numa aquisição de dados 3D (vista de um possível observador no leito marinho).

¹¹Cabe ressaltar aqui que um levantamento tal como ilustrado em 2.3(a) é chamado de levantamento 2D, pois o navio reboca apenas um cabo ou *streamer*. No entanto, passadas as dificuldades iniciais de disponibilidades de equipamentos e avanços tecnológicos, desde a década de 70 que levantamentos sísmicos 3D, com múltiplos *streamers*, vêm crescendo, e hoje representam a quase totalidade dos levantamentos sísmicos marítimos [15].

2. O Método Sísmico

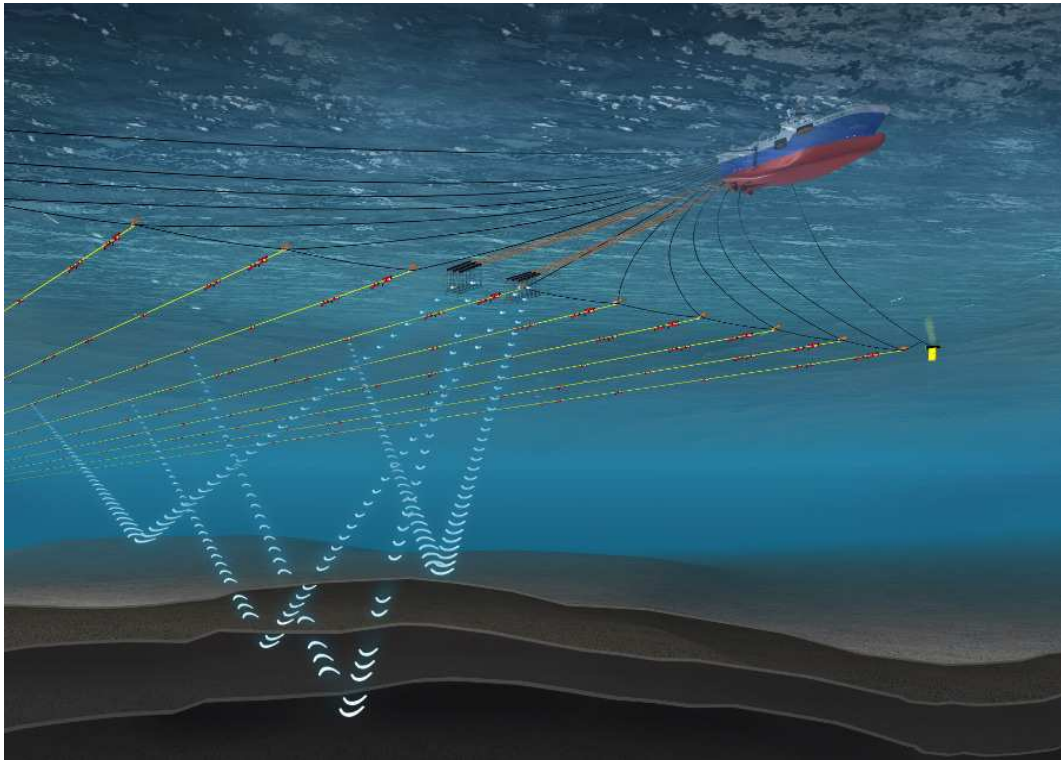


Figura 2.4: Ilustração de uma aquisição sísmica 3D marítima. As dimensões da imagem estão próximas às reais. Figura retirada da referência [19].

Observando atentamente a Figura 2.4, é possível destacar:

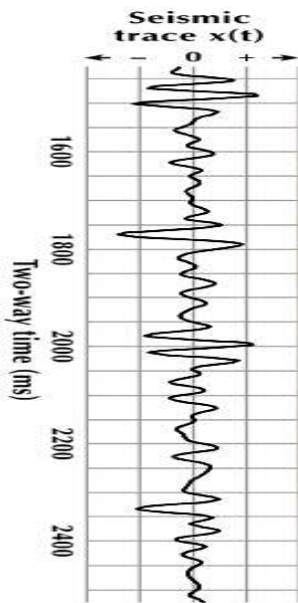
- 10 *streamers* amarelos, com o mais à esquerda não ilustrado. Os dispositivos vermelhos ao longo dos *streamers* são controladores de profundidade e direção. Geralmente usa-se entre 8 e 12 *streamers* entre 6 e 8 km, com separação lateral entre 50 e 150 m, e com sensores a cada 12,5 m (em sísmica terrestre pode ser entre 25 e 50 m);
- Duas fontes sísmicas (neste caso arranjos de *air guns*), representadas por pequenos retângulos pretos, imediatamente atrás do navio e no começo dos *streamers*. Usa-se duas fontes por questões operacionais e econômicas, pois enquanto uma fonte é carregada de ar pelo compressor, a outra já está disponível para detonar. Neste caso dizemos que a configuração das fontes é *flip-flop*. É bastante comum utilizar, em campo, intervalos de pontos de disparos (ou de tiros) de 25 m, principalmente por questões operacionais. Este valor pode chegar a 18,75 m ou 37,5 m a depender

2. O Método Sísmico

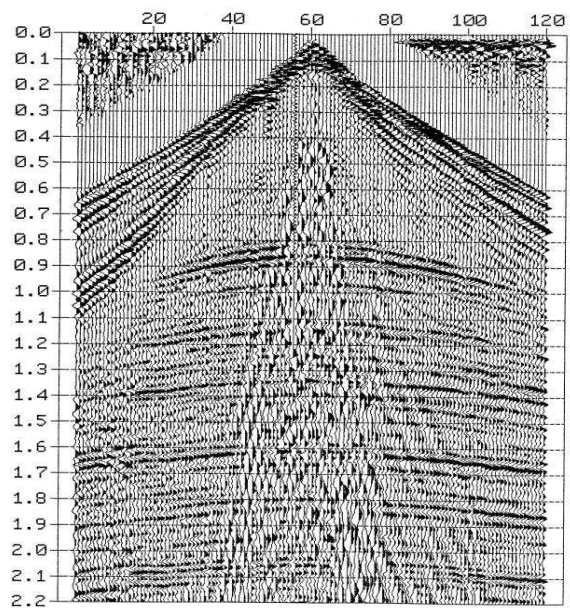
das exigências da aquisição;

- Cabos pretos de ligação entre *streamers* e destes com o navio e cabos marrons que fornecem ar comprimido do navio para as fontes.

Um registro sísmico mede o distúrbio provocado pela passagem do campo de ondas, em função do tempo, na região do sensor. Tal registro recebe, como já visto, o nome de traço sísmico, e é ilustrado na Figura 2.5(a). Uma coleção de traços justapostos formada por sensores espalhados ao longo de uma linha (no caso marítimo um cabo ou *streamer* e em terra uma linha de receptores) recebe o nome de sismograma de campo, como pode ser visto na Figura 2.5(b). Estes são os entes básicos de qualquer levantamento sísmico.



(a) Exemplo de um traço sísmico [23].



(b) Exemplo de um sismograma de campo [24].

Figura 2.5: Ilustração de um traço sísmico e um sismograma (coleção de traços sísmicos), que registram o campo de onda em função do tempo. É possível ver algumas curvas - representadas pela coerência entre traços adjacentes - no sismograma. É importante observar que a grandeza física não é, geralmente indicada nos gráficos ou *displays* sísmicos. No entanto, as medidas do hidrofone são em μbar , geofone em m/s e acelerômetro em m/s^2 .

Não é de interesse no presente trabalho detalhar os inúmeros eventos associados ao método sísmico; por eventos entende-se os tipos de ondas associados a um registro sísmico, que podem ser: ondas refletidas (o principal interesse), ondas refratadas, ondas

2. O Método Sísmico

guiadas, *ground roll* (onda Rayleigh, principalmente presente em dados terrestres) e outros ruídos coerentes e aleatórios. Um material rico em detalhes e ilustrações é encontrado em [2,20,21].

Após o dado ser adquirido pelas estações de registro (a depender da disponibilidade da empresa que fará a aquisição e/ou das peculiaridades da área de estudo, é possível ter entre 4 e 8 mil receptores ativos para cada disparo da fonte), este passa por uma série etapas que visam: (i) separar o sinal - oriundo das reflexões das camadas em subsuperfície - dos ruídos¹² presentes nos registros; (ii) preparar uma imagem sísmica que represente a geologia da subsuperfície. Esta etapa do método sísmico é conhecida como Processamento Sísmico, etapa esta que será comentada na Seção 2.4.

Referindo-se ainda ao sismograma, tal qual na Figura 2.5(b), este vai representar uma forma de onda mais ou menos complexa de acordo com a geologia. Por exemplo, a geologia mais simples é aquela de camadas horizontais plano-paralelas. Neste caso, as curvas geradas pelas reflexões de tais camadas são hipérboles perfeitas, que fornecerão informações das velocidades do meio. No entanto, uma geologia com tais características não existe em lugar algum.

A incerteza relacionada ao correto registro do campo de onda está intimamente relacionada à dificuldade de interpolar as curvas que o representam, devendo-se isto ao fato deste campo ser apenas amostrado nos locais onde existem estações de registro. A análise destas formas de onda é essencial no processamento dos dados sísmicos. A base física e matemática para tal não é nova e foi desenvolvida e/ou descoberta nos séculos XIX e XX, tais como os conceitos de séries e transformada de Fourier (onde um sinal qualquer pode ser decomposto em funções periódicas ortogonais simples, facilitando sua análise), amostragem (que introduz a ideia de falseamento ou *aliasing*, que será visto mais adiante) e o poderoso desenvolvimento da eletrônica digital, proporcionando o surgimento da era do computador digital, que removeu a limitação de se tratar uma

¹²É importante lembrar que o conceito de **ruído** tem diferentes definições, sendo uma das mais aceitas como “tudo aquilo que não for útil, num registro sísmico, para construção da imagem sísmica da geologia da subsuperfície”. Os ruídos se dividem entre aleatórios e coerentes. No entanto, com o desenvolvimento de técnicas de processamento de dados sísmicos e maior conhecimento teórico, os ruídos ditos coerentes estão ganhando aplicabilidade na construção da imagem sísmica. As referências [19] e [22] são indicadas para um maior entendimento.

2. O Método Sísmico

grande e por vezes complexa quantidade de dados ¹³.

2.3 Teorema da Amostragem e suas implicações

As formas de onda de interesse geofísico são, geralmente, funções contínuas (análogas) do tempo e do espaço (no caso espacial viu-se que a quantidade de receptores espalhados é quem realiza o processo de amostragem). Para aplicar o poder da computação digital na análise do dado sísmico, é preciso expressá-lo de forma digital, e também discretizá-lo no tempo. Um exemplo é mostrado na Figura 2.6, onde um sinal contínuo $f(t)$ (que pode ser qualquer função do tempo e/ou espaço), aqui representado por uma senóide, pode ser discretizado (ou digitalizado) tomando-se sua amplitude a cada intervalo de amostragem fixo τ , gerando a função digital $g(t)$.

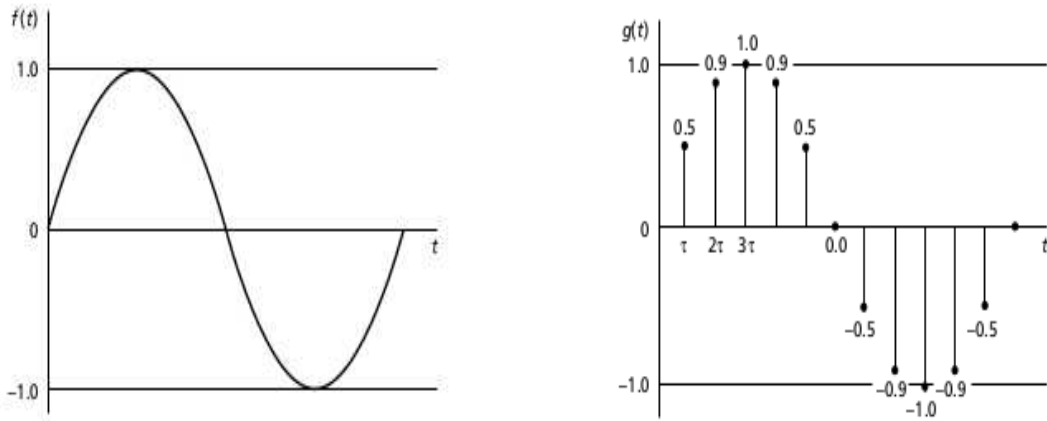


Figura 2.6: Esquerda: uma função senoidal representando um sinal analógico. Direita: representação digital da mesma função.

2.3.1 Amostragem Temporal

É desejável que no processo de amostragem não se perca nenhuma informação contida no original analógico. Agora, é possível enunciar o *teorema da amostragem de Nyquist-Shannon*:

¹³Para se ter uma noção, uma aquisição marítima, numa área em torno de 1.000 km², estima-se que os dados ocupem entre 40 e 50 TB de espaço em disco.

2. O Método Sísmico

Um sinal analógico em função do tempo t , $f(t)$, de banda limitada ($F(f) = 0, \forall f > f_{max}$, em que $F(f)$ é a transformada de Fourier de $f(t)$, f_{max} é a frequência máxima do sinal $f(t)$) é amostrado sem perda de informação se a frequência de amostragem $f_s \equiv 1/T_s$ (T_s é o intervalo de amostragem) for maior que o dobro de f_{max} . Ou seja, para manter-se a informação do sinal deve-se ter:

$$T_s \leq \frac{1}{2f_{max}}. \quad (2.6)$$

Quando um sinal de banda limitada não respeita o teorema acima, diz-se que este sinal está falseado ou em *alias*. Um corolário extraído do teorema acima pode ser usado para definir a *frequência de Nyquist* f_N como sendo a maior frequência que pode ser corretamente amostrada em um sinal com intervalo de amostragem T_s definido. Assim, do teorema da amostragem, é imediato que:

$$f_N = \frac{1}{2T_s}. \quad (2.7)$$

Para um sinal temporal, f será dada em Hertz. Atualmente o intervalo de tempo usual para amostrar os traços sísmicos é entre 1 e 2 ms (milissegundo); no pior dos casos, quando $T_s = 2$ ms, tem-se que a máxima frequência amostrada corretamente é de $f_N = 250$ Hz, o que é muito razoável, visto que a banda de frequências emitidas pelas fontes sísmicas não é maior que 200 Hz; soma-se a isto a atenuação devido à propagação em subsuperfície, pois a Terra age como um filtro cuja atenuação é proporcional à frequência, tal como ocorre com as ondas eletromagnéticas num condutor¹⁴.

2.3.2 Amostragem Espacial

No caso espacial, o mais delicado, pode-se considerar que a amostragem é feita ao longo de uma linha (no caso 2D) ou mesmo numa superfície (no caso 3D) de registro,

¹⁴Há outros efeitos a serem considerados como atenuadores das frequências mais altas, como o movimento diferencial entre fluido e matriz rochosa provocado pela passagem da onda no meio, além das inúmeras reflexões que ocorrem em sucessões de camadas de espessuras centimétricas a poucos metros. Um detalhamento destes conceitos pode ser encontrado nas seções 2.8 e 2.9.3 de [16].

2. O Método Sísmico

onde é razoável considerá-los como sendo horizontal. Feita esta consideração, está-se afirmando que o campo de ondas, que pode ser pensado como uma soma de ondas planas,¹⁵ qualquer que seja sua direção de propagação θ em relação à vertical, será registrado ao longo de uma linha ou superfície horizontal. Isto nos remete ao conceito de ciclicidade espacial horizontal:

$$\eta = \frac{1}{\lambda_x} = \frac{k_x}{2\pi} = \frac{f \sin \theta}{v}, \quad (2.8)$$

onde $\lambda_{App} = \lambda_x = \lambda / \sin \theta$ é o comprimento de onda aparente na horizontal, k_x é o número de onda horizontal¹⁶ e v é a velocidade da onda acústica no meio em que esta é registrada¹⁷. Aplicando o teorema da amostragem no caso espacial, tem-se que um sinal analógico $f(x)$ de banda limitada e ciclicidade máxima η_{max} é amostrado corretamente apenas se o intervalo de amostragem respeitar a desigualdade:

$$\Delta x \leq \frac{1}{2\eta_{max}} \Leftrightarrow \Delta x \leq \frac{v_{min}}{2f_{max} \sin \theta_{max}}, \quad (2.9)$$

o que nos permite definir a ciclicidade de Nyquist:

$$\eta_N = \frac{1}{2\Delta x}. \quad (2.10)$$

A equação 2.9 nos diz qual deverá ser o menor intervalo de amostragem espacial (entenda-se como a malha de receptores dispostos na superfície de aquisição¹⁸) que deve-se ter numa área (com parâmetros esperados v_{min} , f_{max} e θ_{max}) para se evitar o *alias* espacial. Já a equação 2.10 é o complementar da equação 2.9, pois aquela afirma qual é a máxima ciclicidade possível de se registrar para um dado Δx .

¹⁵Na teoria de propagação de ondas, é possível expandir/decompor uma onda esférica em ondas planas, o que é garantido pela integral de Weyl [25].

¹⁶Aqui está-se considerando o caso 2D, onde os receptores estão dispostos ao longo de um eixo-x, mas pode ser extrapolado para o caso 3D, onde os receptores estão dispostos ao longo de um plano-xy.

¹⁷A velocidade da onda na água depende da pressão hidrostática (ou profundidade), temperatura e salinidade. Estes fatores combinados fazem com que a velocidade da água oscile em torno de 1.500 m/s, e daqui em diante, para estimativa e modelagens considerar-se-á este valor.

¹⁸Aqui é interessante introduzir os conceitos de *inline* (IL) e *crossline* (XL). A IL refere-se à direção colinear com as linhas de detonação da fonte (linhas de tiro), ao passo que a XL é a direção ortogonal a esta. Estes termos também são usados para se referir ao plano vertical que contém a linha de tiro (plano IL) e seu correspondente plano ortogonal (plano XL).

2. O Método Sísmico

Passando da teoria à prática, os ruídos são eventos que mais contribuem para a necessidade uma boa amostragem espacial do campo de onda. No caso terrestre tem-se o *ground roll* (uma onda de superfície $\Rightarrow \theta \approx 90^\circ$), com velocidade em torno de 900 m/s e frequência máxima entre 40 e 50 Hz; no caso marítimo onde tem-se sempre a (i) onda direta (que viaja diretamente da fonte ao receptor pela água), que viaja quase horizontalmente ($\theta \approx 90^\circ$) com velocidade de 1.500 m/s, a uma frequência em torno de 120 Hz, (ii) os ruídos provenientes das extremidades do cabo e o (iii) *swell noise*, que é um ruído de baixa velocidade e baixa frequência, resultado direto das flutuações da pressão hidrostática no *streamer* causadas pelas flutuações das ondas. Tais eventos por vezes requerem um espaçamento de receptores na IL de menos de 10 m. Como já foi mencionado, ao referirmos a um *receptor*, estamos falando de um *arranjo de receptores* ou *estação* com, por exemplo, 4 receptores separados por 3,125 m, formando uma estação, e assim evitando o problema da mau amostragem dos eventos acima. No entanto, este problema persiste na direção XL, onde, no mar, a mínima separação entre cabos é de cerca de 50 m e assim, só que os eventos citados acima têm uma preferência de viajar em direções próximas à IL.

Superado este problema da amostragem na aquisição, deve-se ter muito cuidado no processo de construção da imagem sísmica, que será brevemente descrito a seguir. Neste processo, é imprescindível que, por vezes, tenha-se uma amostragem mais densa do que a que a adquirida na direção XL, o que é garantido pela interpolação do campo de onda [21], pois frequências que não estão em *alias* no processo de aquisição, podem estar no processo de migração [26]. Ainda, algumas etapas do processamento podem ser executadas em domínios que não o do sismograma (onde se tem o registro de todos os receptores para cada disparo da fonte) em que o espaço entre cada traço é aquele da separação entre receptores em campo. Pode ser usado, por exemplo, o domínio do receptor (todos os traços que um dado receptor registrou), e agora o intervalo espacial entre traços é a distância entre disparos sucessivos da fonte, da ordem de 25 m. Esta questão de amostragem espacial é bastante delicada e será abordada novamente no Capítulo 4.

2.4 Processamento Sísmico

Como já mencionado neste Capítulo, o trabalho do geofísico é, partir do dado de campo, obter informações da geologia. Para tanto, uma série de processos é aplicado ao dado com este fim. Nesta Seção, apenas será citado os principais processos,¹⁹ deixando o leitor interessado consultar as referências [16,21] para o detalhamento do assunto.

O dado, antes de tudo, precisa ser condicionado para receber as etapas do processamento. Tal condicionamento pode compreender as tarefas de: correto posicionamento espacial dos traços sísmicos, aplicação de correções temporais nos mesmos, correção de amplitudes que eliminem distorções, reamostragem e regularização espacial dos traços e atenuação dos ruídos.

O processo de atenuação (ou filtragem) de ruídos não possui uma ordem específica, podendo atuar mais de uma vez durante o processamento dos dados. É válido notar que alguns processos deixam ruídos sintéticos (ruídos que não vêm de campo, mas são oriundos dos artefatos dos processos computacionais) no dado, próprios do algoritmo usado para manipulação do mesmo. Por isso é sempre importante uma análise crítica de *controle de qualidade* (QC, da sigla em inglês) após cada estágio. Assim como praticamente todos os processos, estas filtrações podem ser feitos, e muitas vezes o são, em diferentes domínios dos dados, como o de Fourier, tanto na frequência quanto no número de onda ($f - k$), dentre outros.

A aquisição sísmica moderna faz uso da *multiplicidade*, que é a repetição de informação de diversos tiros num mesmo *bin*, ou cela da aquisição²⁰. Dentre os diversos benefícios trazidos pela multiplicidade podemos destacar o aumento na relação sinal/ruído aleatório, dentre outros, e possibilidade de obtenção de estimativas da velocidade da subsuperfície, indispensável à outras técnicas de processamento que con-

¹⁹A maioria das descrições apresentadas nesta Seção referem-se às técnicas *convencionais* de processamento sísmico. No entanto uma forma *não convencional* de se extrair a informação desejada tem atraído bastante atenção atualmente. É a chamada *Full Waveform Inversion* (FWI), como introduzido no Capítulo 1, que acredita-se aumentar a riqueza e confiabilidade das propriedades físicas que caracterizam a geologia do meio [27], como será visto na Seção 2.5.

²⁰A cela é geralmente um retângulo com dimensões de poucos metros e é a unidade básica que compõe o *grid* da aquisição em subsuperfície. Em cada cela tem-se geralmente um número alto de traços (este número é, por vezes, chamado de multiplicidade ou *fold* da aquisição), que pode passar de uma centena e depende dos parâmetros e técnica de aquisição escolhidos.

2. O Método Sísmico

duzem à uma imagem sísmica dos refletores em profundidade. Para a estimativa das velocidades, faz-se uso da organização dos dados no chamado domínio CDP (*Common Depth Point*), onde, como o nome sugere, o dado é organizado de forma tal que cada traço de cada tiro (detonação da fonte) que foi gerado no mesmo “ponto” (na verdade, mesma cela) em profundidade seja agrupado. Neste novo grupo de dados, cada traço corresponde a um *offset* diferente, e assim um mesmo evento está em tempos diferentes. A partir daí, o dado é corrigido de forma que os tempos de um mesmo refletor coincidam (*normal moveout correction* - NMO), possibilitando a obtenção das curvas de velocidades.

Um outro processo é tentar remover o efeito do pulso sísmico, $w(t)$, dos dados, que é chamado de *deconvolução*. Para tal, se faz necessário o conhecimento do pulso, seja proveniente de modelagem, extraído do dado, ou registrado em campo, o que nem sempre é possível. Por isso a deconvolução pode ser *determinística* - quando se conhece o pulso - ou *estatística* - quando são feitas premissas sobre o dado para deconvolução. Existem diversas formas de proceder na deconvolução do pulso sísmico.

Posteriormente, alguns processos são feitos no intuito de se corrigirem alguns fatores inerentes à propagação, tais como a atenuação de reflexões múltiplas²¹ e compensação dos efeitos de absorção do meio. Feito isto, a depender da complexidade geológica do meio, os diferentes traços de um mesmo CDP pode ser somados/empilhados (*stacking*) para a posterior *migração sísmica* (processo visto a seguir), gerando uma *seção sísmica*. Uma coleção de seções gera o que chamamos de *cubo sísmico*²².

Em se tratando de geologia, a única certeza é que as camadas e estruturas geológicas não são plano-paralelas. Isto faz com que energia das reflexões num determinado traço sísmico não seja proveniente da cela (ou CDP) à qual este traço esteja associado. Para isso, na obtenção da imagem sísmica, usa-se o campo de velocidades obtido anteriormente no processo conhecido como *migração sísmica*, para posicionar e focalizar as

²¹Atualmente tem-se visto trabalhos que visam empregar a utilização das múltiplas como sinal, gerando informações não contidas nas reflexões primárias.

²²Os eixos deste cubo são, no plano horizontal, o eixo da IL e da XL, ou as dimensões em km da área do levantamento. O eixo vertical pode estar representado tanto em tempo de reflexão quanto em profundidade dos refletores. Não será discutido aqui as vantagens e desvantagens de um e outro, podendo as referências indicadas no início desta Seção ajudarem na compreensão.

2. O Método Sísmico

reflexões nos devidos locais em subsuperfície que de fato geraram tais reflexões. Esta etapa pode ser feita, novamente, a depender da complexidade geológica, antes ou após o empilhamento (conhecido na literatura como migração pré ou pós *stack*). A Figura 2.7 ilustra uma seção sísmica e a Figura 2.8 um cubo sísmico.

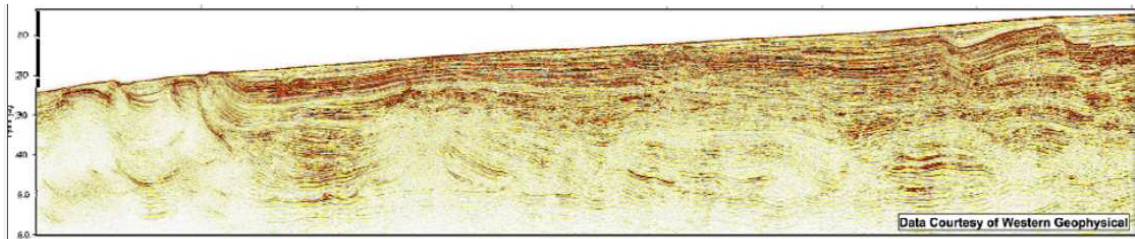


Figura 2.7: Uma seção sísmica 2D, em profundidade (de 0,0 à 6,0 km), ilustrando algumas feições geológicas [28]. A escala de cores (não mostrada), que varia de acordo com o *software* usado para *display*, denota as amplitudes do sinal sísmico.

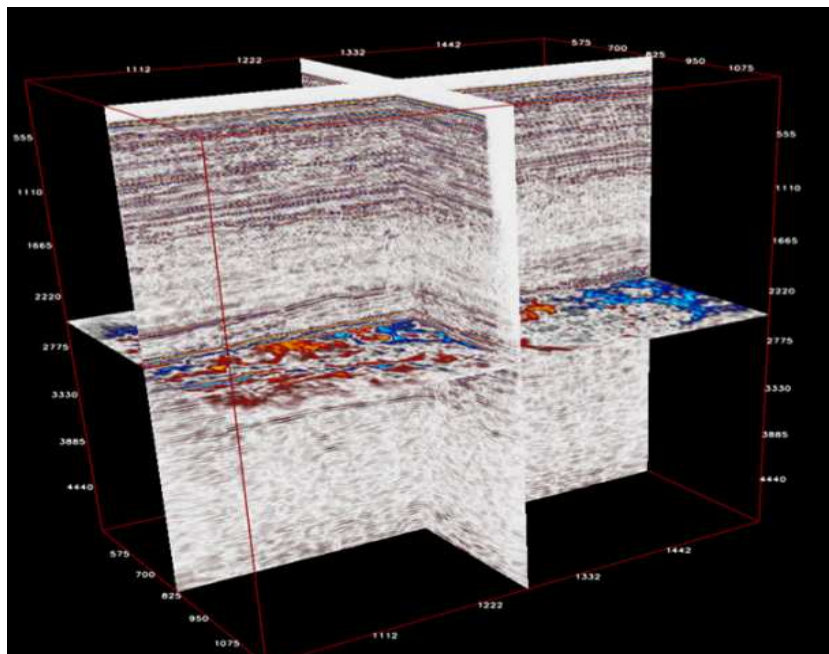


Figura 2.8: Cubo sísmico, com eixo vertical em ms, ilustrado por alguns planos, mostrando algumas feições geológicas [19].

Imagens como as das Figuras 2.7 e 2.8 mostram a refletividade do meio em subsuperfície, que indicam, por sua vez, *propriedades de interfaces* e não de camadas. Imagens de velocidade sísmica como aquelas obtidas no processo de FWI, como na Figura 2.9, por sua vez, ilustram *propriedades de camadas*. Não é consenso em sísmica

2. O Método Sísmico

de exploração de petróleo qual dos dois métodos é melhor. Por vezes esta discussão é injustificável, sendo preciso analisar caso a caso e, se possível, aplicá-los em conjunto.

2.5 Interpretação Sísmica

Para introduzir o conceito de *interpretação sísmica*, abaixo segue um trecho extraído da Seção 4.8.2 de Telford *et al.* [2]:

The primary objective of a seismic survey for hydrocarbons usually is to locate structures... However, many structures that provide excellent traps²³ do not contain oil or gas in economic quantities. Because drilling wells is very costly, we try to derive from seismic data as much information as possible about the geological history of the area and about the nature of the rocks in an effort to form an opinion about the probability of encountering petroleum in the structures that we map.

É pré-requisito que o geofísico que trabalhe com interpretação de dados sísmicos tenha um conhecimento profundo de geologia. Nesta etapa todas as informações da sísmica, bem como de outras fontes tais como perfis de poços existentes na área, devem ser compiladas. É na interpretação que são feitas as conjecturas com objetivo de determinar a locação de um poço. No entanto, não apenas da imagem sísmica que o intérprete se vale. É, geralmente, nesta etapa que se faz uso da *inversão sísmica*, um trabalho em conjunto com o processamento onde as informações de refletividade e, portanto, de interfaces, são transformadas em informações de impedância acústica e/ou elástica e, portanto, de camadas, que por sua vez pode ser convertido em propriedades de reservatórios [4,9], como tipo de rochas, porosidade, mapas de espessuras, etc.

Entretanto, as informações de baixa frequência (até ~ 10 Hz) são indispensáveis para a correta determinação das impedâncias. Tais frequências advêm, hoje, da interpretação dos dados, ou mesmo de dados de perfis de poços²⁴, não fazendo parte

²³Trapas ou armadilhas são potenciais regiões geológicas onde um reservatório de petróleo pode ser encontrado.

²⁴Este procedimento não é o mais indicado, visto que a informação de um poço é apenas local, 1D, e é extrapolada para toda a região que se pretende fazer a inversão.

2. O Método Sísmico

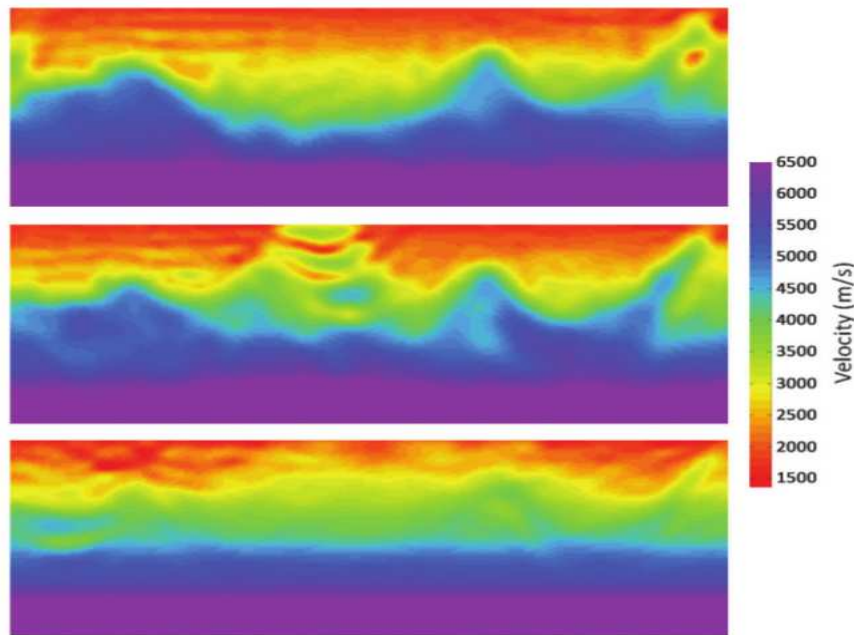


Figura 2.9: Modelos de velocidade obtidos via FWI com modelos iniciais usando bandas de frequência de 1,5-5 Hz (topo), 2-5 Hz (meio) e 4,5-5 Hz (base) [9].

explícita dos dados sísmicos, o que pode gerar falsos indícios acerca do modelo geológico [16]. Um exemplo da importância das baixas frequências em sísmica pode ser visto na Figura 2.9, obtida via FWI [9]. Este é um exemplo sintético que ilustra o uso crescente de baixas frequências (de baixo para cima) no modelo inicial que é usado no processo iterativo do FWI. O modelo da parte superior da Figura 2.9 pode ser considerado melhor por apresentar feições geológicas mais realistas.

O dado sísmico também fornece inúmeras informações, ou atributos, que podem ajudar na delimitação de eventuais incertezas. Técnicas imprescindíveis nesta etapa são aquelas que dão indícios indiretos da presença de hidrocarbonetos (*Direct Hydrocarbon Indicator* - DHI), tais como o *bright spot* (mancha brilhante), *flat spot* (região plana, relativa ao contato entre óleo e água quando assim presentes em reservatórios), *dim spot* (mancha esmaecida) e AVO (*Amplitude Versus Offset*). Estes DHI's referem-se a comportamentos na amplitude do dado sísmico quando da presença de hidrocarboneto nos poros das rochas. Muitas vezes são referidos como anomalias sísmicas.

Um exemplo de seção sísmica interpretada é mostrado na Figura 2.10. As diferentes cores denotam diferentes tipos de rochas, que guardam semelhanças geológicas

2. O Método Sísmico

entre si. Os traços em preto ilustram interfaces entre camadas ou falhas geológicas, que podem estar associadas a armadilhas estruturais que contêm petróleo.

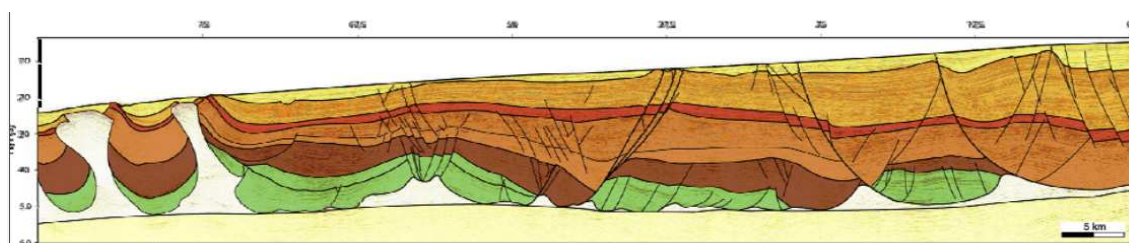


Figura 2.10: Seção da Figura 2.7 interpretada, destacando, em cores e traços, as possíveis feições geológicas [28].

Capítulo 3

Fonte Sísmica Marítima

Este Capítulo é dedicado à fonte sísmica marítima, mais precisamente ao *air gun*, canhão de ar comprimido usado como fonte de energia sísmica. Discutiremos os detalhes técnicos de como opera um *air gun*, falaremos do sistema *ghost* da fonte, do arranjo de *air guns*, que é a forma como a fonte é usada em campo, e também veremos aspectos como diretividade e interação do arranjo, que assumem um papel importante quando se está falando de um arranjo. Ao longo do texto serão discutidos os impactos que cada aspecto da fonte incorre no dado sísmico.

A lista de fontes sísmicas marítimas é extensa e os métodos usados para gerar a onda acústica pode ser agrupado em quatro categorias: (i) fontes químicas ou explosivas (dinamites), que por questões ambientais e operacionais perderam uso, mas de grande importância no início das campanhas marítimas; (ii) mecânica ou vibração física, onde uma placa transmite as ondas sísmicas para a água e, apesar das enormes dificuldades operacionais, somente agora este tipo de fonte vem ganhando atenção, mas sem nenhuma aquisição em escala de produção e publicamente divulgada na indústria; (iii) elétrica, onde uma descarga elétrica é provocada na água, gerando uma bolha vapor d'água que condensa e implode, gerando o pulso sísmico; (iv) pneumática/hidráulica, em que uma quantidade de gás (geralmente ar - pneumático) ou fluido (geralmente água - hidráulico) pressurizado é injetado na água. Os exemplos mais proeminentes deste tipo são o *water gun*, onde a água injetada sob pressão provoca a cavitação do meio e a consequente implosão gera o pulso sísmico e o *air gun*, em que

3. Fonte Sísmica Marítima

o ar injetado provoca a expansão do meio e as subsequentes oscilações da bolha de ar formada gera o pulso sísmico.

Apesar de alguns trabalhos indicarem a aplicabilidade do *water gun*, alegando a vantagem de não possuir oscilações de bolhas subsequentes - o que prejudica o dado sísmico -, como ocorre com *air gun*, o primeiro tipo de fonte sofre um efeito difícil de contornar na aquisição e de lidar no processamento, chamado de *precursor*, que vem a ser o pequeno pulso devido à expulsão da água da *gun* e que antecede a implosão que gera o maior sinal [29], sendo este o principal motivo deste tipo de fonte não ser usado atualmente. No caso do *air gun*, veremos como contornar o problema das bolhas subsequentes - também chamado de *efeito bolha* - na aquisição. Medidas visando mitigar o efeito residual da bolha também são tomadas no processamento dos dados.

3.1 O canhão de ar comprimido: *air gun*

O *air gun*, como dito, é um dispositivo que libera ar comprimido na água. As pressões P utilizadas pelo compressor podem chegar até a 10.000 psi, embora 2.000 psi seja a pressão¹ mais utilizada em campo. Será visto agora como opera um *air gun*.

3.1.1 Detonação de um *air gun*

Na Figura 3.1(a) temos uma fotografia mostrando um corte vertical de um *air gun* da marca Bolt². A Figura 3.1(b) mostra um esquema de *air gun* pronto para disparar (atirar). As câmaras (*chambers*) A e B são preenchidas com ar comprimido, que entra em A através de orifício no canto superior esquerdo e passa para B através de uma abertura axial na lançadeira (*shuttle*). A câmara B é mantida fechada, pois a borda C é maior que a borda D, o que exerce uma força maior tendendo a manter B

¹1 psi (1 libra/polegada quadrada) $\equiv$ 6.894,76 Pascal $\equiv$ 0,068046 atm. Como será visto adiante, os gráficos que ilustram o campo de pressão emitido pela fonte têm seus eixos verticais em Bar-m, que é uma medida de 1 Bar (10^5 Pascal $\equiv$ 0,986923 atm) medido a 1 metro da fonte.

²Pode-se citar a Sercel como outra fabricante de *air guns*. As fabricantes têm seus tipos de *air gun*. Entretanto, em se tratando de marcas ou tipos de *air guns*, é interessante notar que apesar de a liberação do ar na água depender do *design* do *air gun*, isto não afeta significativamente as características físicas do fenômeno. Experimentos demonstraram que dada uma assinatura de um tipo de *air gun*, é possível obter uma assinatura equivalente usando outro tipo de *air gun*. Em suma, em se tratando de características da emissão do pulso, *gun type is hype* [30].

3. Fonte Sísmica Marítima

fechada. Para detonar o *air gun*, um sinal elétrico é emitido ao solenoide que, por sua vez, permite a passagem de ar comprimido que segue até a parte de baixo da borda C. Isto produz uma força para cima que é suficiente para romper a posição de equilíbrio da lançadeira, que abre-se rapidamente. Isto permite que o ar pressurizado na câmara B³ seja expulso repentinamente para a água através de algumas regiões vazadas, chamadas de portas laterais (*port*), como ilustra a Figura 3.1(c). O movimento da lançadeira é amortecido antes que esta atinja o topo da câmara A, pois a força responsável por seu movimento rapidamente cai à medida que o ar é injetado na água, e assim a força que atua no sentido oposto faz com que a câmara B seja novamente fechada, e repete-se o ciclo.

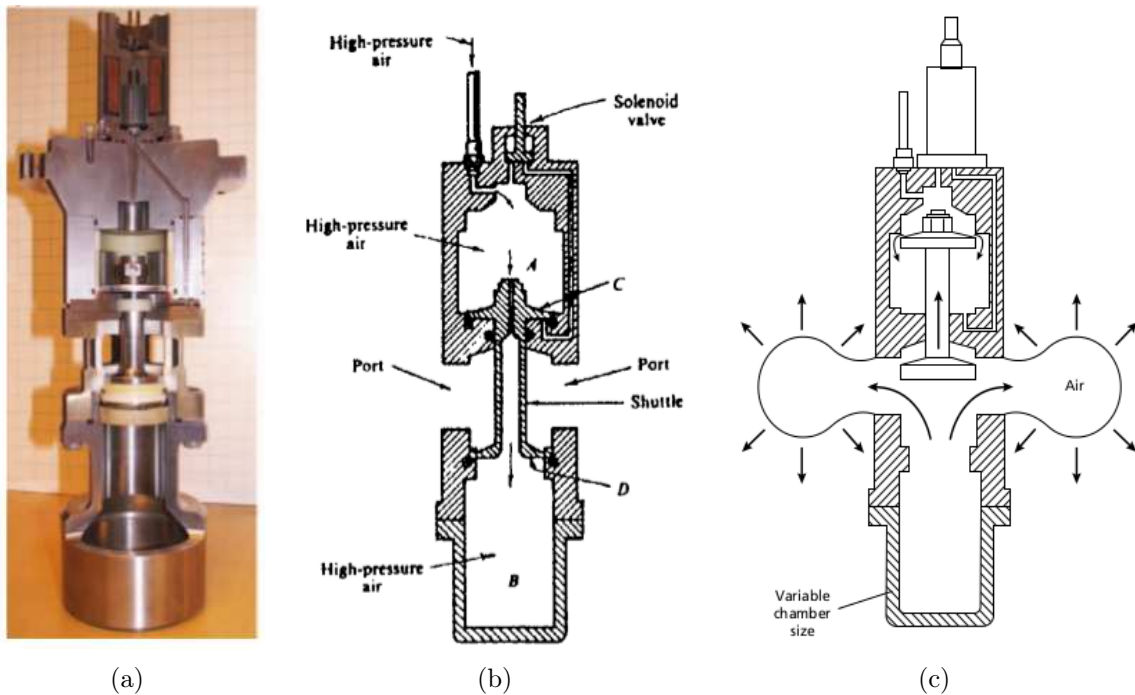


Figura 3.1: Ilustração de um *air gun*, que tipicamente tem dimensões entre 10 e 12 cm por 45 e 65 cm, dependendo do volume e fabricante. É apresentado os componentes básicos de um *air gun*. (a) Corte de um *air gun* [31]; (b) *air gun* pronto para disparar [2]; (c) *air gun* imediatamente após disparar [3].

O comportamento do campo de pressão emitido pelo *air gun* pode ser entendido analisando-se a Figura 3.2(a). Inicialmente a pressão dentro da bolha excede em muito

³Na continuidade deste trabalho, ao nos referirmos ao volume de uma *air gun*, estaremos nos referindo ao volume da câmara B, que representa o volume de ar injetado na água e é usualmente dado em polegada cúbicas (in³ ou cu.in.) e 1 cu.in. $\equiv$ 16,387 cm³.

3. Fonte Sísmica Marítima

a pressão externa ou hidrostática, tal que a bolha se expande rapidamente. O momento possuído pela bolha em expansão é suficiente para que o raio da bolha ultrapasse o raio de equilíbrio R_0 , onde as pressões interna e hidrostática são iguais. Quando a expansão para (raio máximo), a pressão dentro da bolha é menor que a pressão hidrostática⁴, tal que a bolha começa a diminuir de tamanho. Tal colapso ultrapassa a posição de equilíbrio e o ciclo inicia novamente. A bolha continua a oscilar, com um período indo de dezenas a centenas de milissegundos (e raios correspondentes entre 0,1 e 1,0 m). A oscilação continuaria indefinidamente, se não houvesse perdas por atrito com a camada de água nem a flutuabilidade da bolha, que faz com que esta seja destruída ao atingir a superfície⁵.

Rememorando o exposto na Seção 2.1, seria ideal para a prospecção sísmica uma fonte impulsiva, tal qual uma função tipo- δ , porém, o que vemos na assinatura de um *air gun* são sucessivas oscilações de uma bolha. Para fins de nomenclatura, consideramos pulso *primário* como o principal (o de interesse para levantamentos sísmicos) e *todas* as demais oscilações são consideradas apenas como *bolha*⁶, a qual procura-se atenuar. A Figura 3.3 mostra instantâneos de uma detonação, e o correspondente campo medido, mostrando que o pico de amplitude da assinatura do *air gun* ocorre instantes após a abertura das portas, entre 1 e 4 ms.

3.1.2 Características de frequência

Uma aproximação para o período T de oscilação da bolha pode ser descrito pela equação de Rayleigh-Willis:

$$T = C_1 \frac{P^{1/3} V^{1/3}}{P_h^{5/6}}, \quad (3.1)$$

⁴Vale ressaltar que os dispositivos de registro, neste caso hidrofone, medem variações ou perturbações de pressão, ou $\Delta p = p_d - p_h$, onde p_d , devido à fonte de ar, é por vezes chamada de *driving pressure* e p_h é a pressão hidrostática.

⁵Para entender como se dão as trocas de calor entre a bolha e sua vizinhança, recomenda-se a referência [32]. Os parâmetros da bolha em função do tempo podem variar muito, como a temperatura que pode cair abaixo de 0° C, formando cristais de gelo na bolha. Há evidências que a bolha é constituída de uma espécie de “fumaça” de pequenas bolhas, em vez de uma grande bolha [33]. No entanto, este assunto foge do escopo deste trabalho.

⁶Estima-se que a energia, indesejada, da bolha compreende até cerca de 50% da energia emitida pela fonte [34].

3. Fonte Sísmica Marítima

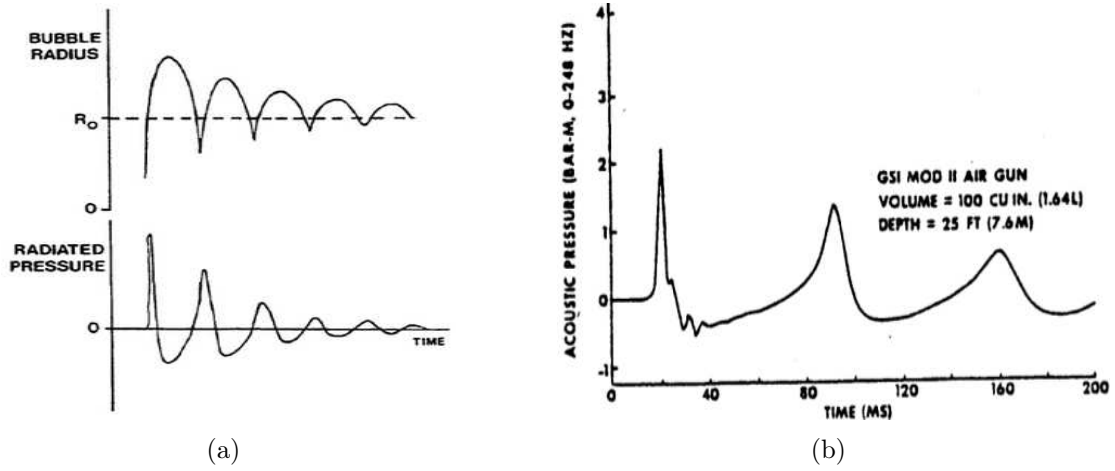


Figura 3.2: (a) Em cima: raio de uma bolha oscilante em função do tempo; embaixo: Correspondente campo de pressão emitido. R_0 é o raio no qual a pressão interna da bolha se iguala à pressão hidrostática [33]. Em (b) o campo de pressão (ou assinatura) de um *air gun* de 100 cu.in., 2.000 psi m de pressão e 7,6 m de profundidade, medido a 1 metro da fonte [35].

onde P e V são, respectivamente, a pressão interna (de acordo com o compressor) e o volume (a câmara B na figura 3.1(b)) do *air gun* antes de o ar ser injetado na água e P_h é a pressão hidrostática na profundidade em que se encontra a fonte. A constante C_1 depende de características do *design* da fonte. A energia fornecida para os *air guns* pelo compressor é o produto VP [34], mas esta não é a energia emitida como onda acústica, como será visto na Seção 3.5 quando o tema interação entre *air guns* for abordado. Não é difícil entender as relações entre T e as grandezas que o definem, pois quanto maior a pressão do compressor e o volume do *air gun* é de se esperar que o período aumente, ao passo que quanto maior a pressão hidrostática, maior é a massa de água que o ar injetado, e por conseguinte a bolha, deve mover para expandir-se, provocando uma diminuição do período.

A equação 3.1 mostra que o período de oscilação da bolha diminui com o aumento da pressão hidrostática, em consequência do aumento da profundidade da fonte, pois $P_h = P_{atm} + \rho g d$, onde P_{atm} é a pressão atmosférica, ρ é a densidade da água do mar, g é a aceleração da gravidade e d a profundidade em que a fonte é rebocada pelo navio. Define-se a grandeza $1/T$ como a *frequência fundamental* ou *característica*, f_c , de um *air gun*. O efeito da profundidade é mostrado na Figura 3.4. A Figura 3.4(a) mostra a assinatura modelada (detalhes sobre a modelagem serão vistos na Se-

3. Fonte Sísmica Marítima

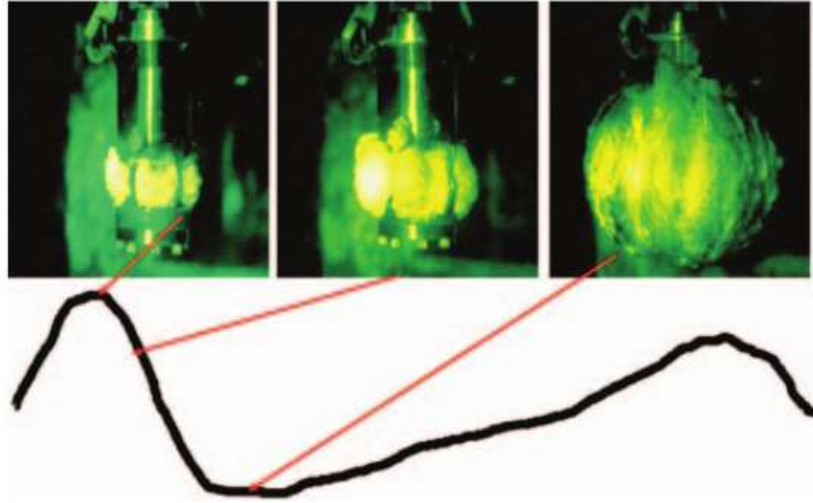


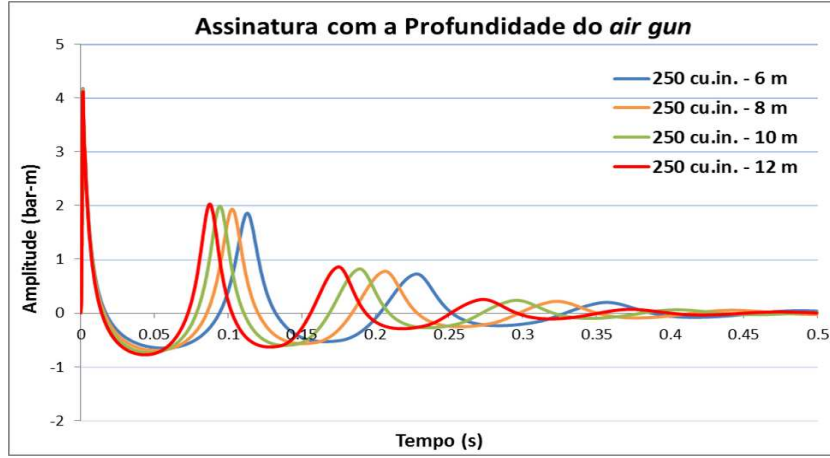
Figura 3.3: Fotografias em alta velocidade de um *air gun* da marca Bolt, detonado em um tanque de água. Abaixo a correspondente assinatura medida aproximadamente a 22 cm distante do *air gun* [31].

ção 3.1.3) de um *air gun* de 250 cu.in. e 2.000 psi, para diferentes profundidades, ilustrando como o período T diminui com o aumento de d . O espectro de amplitude, dado pela transformada de Fourier da assinatura, é mostrado na Figura 3.4(b), onde a frequência fundamental f_c é a correspondente ao primeiro pico de cada um dos espectros mostrados, entre 7 e 10 Hz. Perceba que há mais conteúdo de baixas frequências para as profundidades menores.

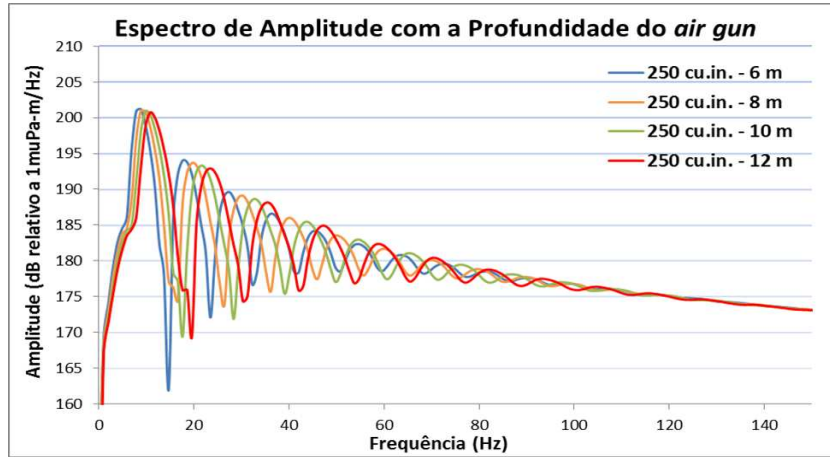
A fim de estudar o efeito da variação do volume do *air gun*, analisamos a Figura 3.5. A figura 3.5(a) mostra a assinatura modelada de um *air gun* a 8 m de profundidade e 2.000 psi, para diferentes volumes, ilustrando como o período T aumenta com o aumento de V . O espectro de amplitude é também mostrado na Figura 3.5(b), indicando mais uma vez a frequência fundamental.

Analisando-se a expressão 3.1, constata-se que quanto maior o período T , menor é a frequência fundamental f_c e, mediante análise das Figuras 3.4 e 3.5, percebe-se que quanto menor f_c , maior é o conteúdo de baixas frequências, ou seja, dados dois *air guns* 1 e 2 tal que $f_{c1} > f_{c2}$, maiores serão as amplitudes das frequências até f_{c1} se comparadas às amplitudes das frequências até f_{c2} . Logo, para uma dada profundidade, um volume maior representará um ganho nas baixas frequências. Ademais, uma menor profundidade, para um dado volume, também acarretará maior conteúdo de baixas

3. Fonte Sísmica Marítima



(a)

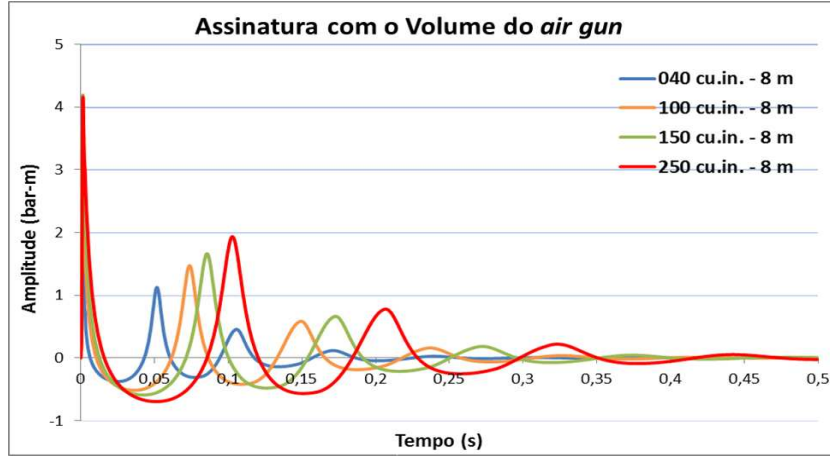


(b)

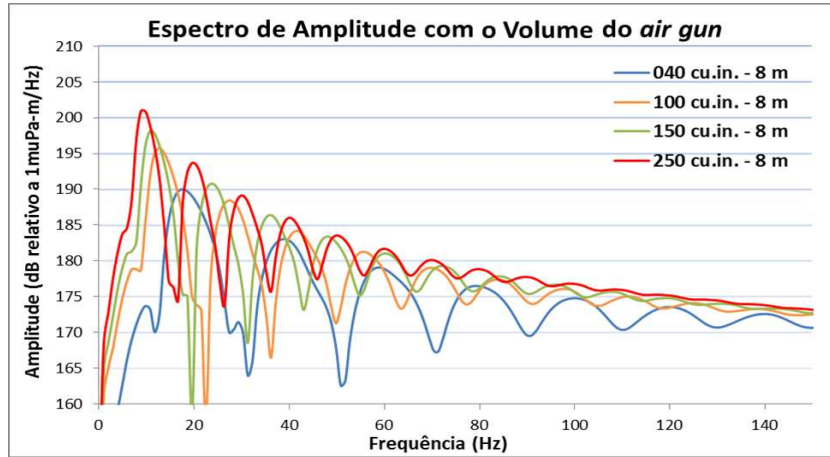
Figura 3.4: (a) Assinatura de um *air gun* de 250 cu.in. e 2.000 psi para 6, 8, 10 e 12m de profundidade. (b) Correspondentes espectros de amplitude das assinaturas em (a).

frequências. Entretanto, quando se analisa o comportamento espectral de acordo com variações na profundidade, há que se considerar o efeito, não considerado nesta Seção, do *ghost* da fonte, que será visto na Seção 3.2 e que atua no sentido contrário, ou seja, quanto menor a profundidade, menor o conteúdo de baixas frequências, o que acaba por inviabilizar o uso de profundidades menores para a obtenção de baixas frequências [33]. Estes aspectos serão retomados no Capítulo 5 quando será discutido a proposta de fontes dispersas. Podemos apenas deslocar a frequência característica variando-se essencialmente volume e profundidade, mas de forma geral, o espectro emitido por um *air gun* é limitado nas baixas frequências, em torno de 5 a 7 Hz, sendo isto um aspecto inerente ao seu *design*.

3. Fonte Sísmica Marítima



(a)



(b)

Figura 3.5: (a) Assinatura de um *air gun* a 8 m e 2.000 psi para volumes de 40, 100, 150 e 250 cu.in. (b) Correspondentes espectros de amplitude das assinaturas em (a).

3.1.3 *Gundalf*: software usado para modelar fontes

A modelagem das fontes sísmicas é feita por um *software* específico, que resolve as equações do movimento [36] associadas ao campo de pressão e velocidade de partículas no entorno de uma bolha oscilante. Um dos resultados desta modelagem é o pulso sísmico $w(t)$. Neste trabalho utilizou-se o *software Gundalf* (*Gun Design And Linear Filtering*), da empresa Oakwood Computing Associates. O trabalho principal no qual as modelagens se baseiam é, como indicam seus desenvolvedores, aquele descrito na referência [37].

Para proceder com a modelagem, primeiro o arranjo de fontes deve ser inserido.

3. Fonte Sísmica Marítima

Isto é feito adicionando cada um dos *air guns*, escolhendo-se sua posição, tipo, pressão, volume e etc., como visto na figura 3.6.

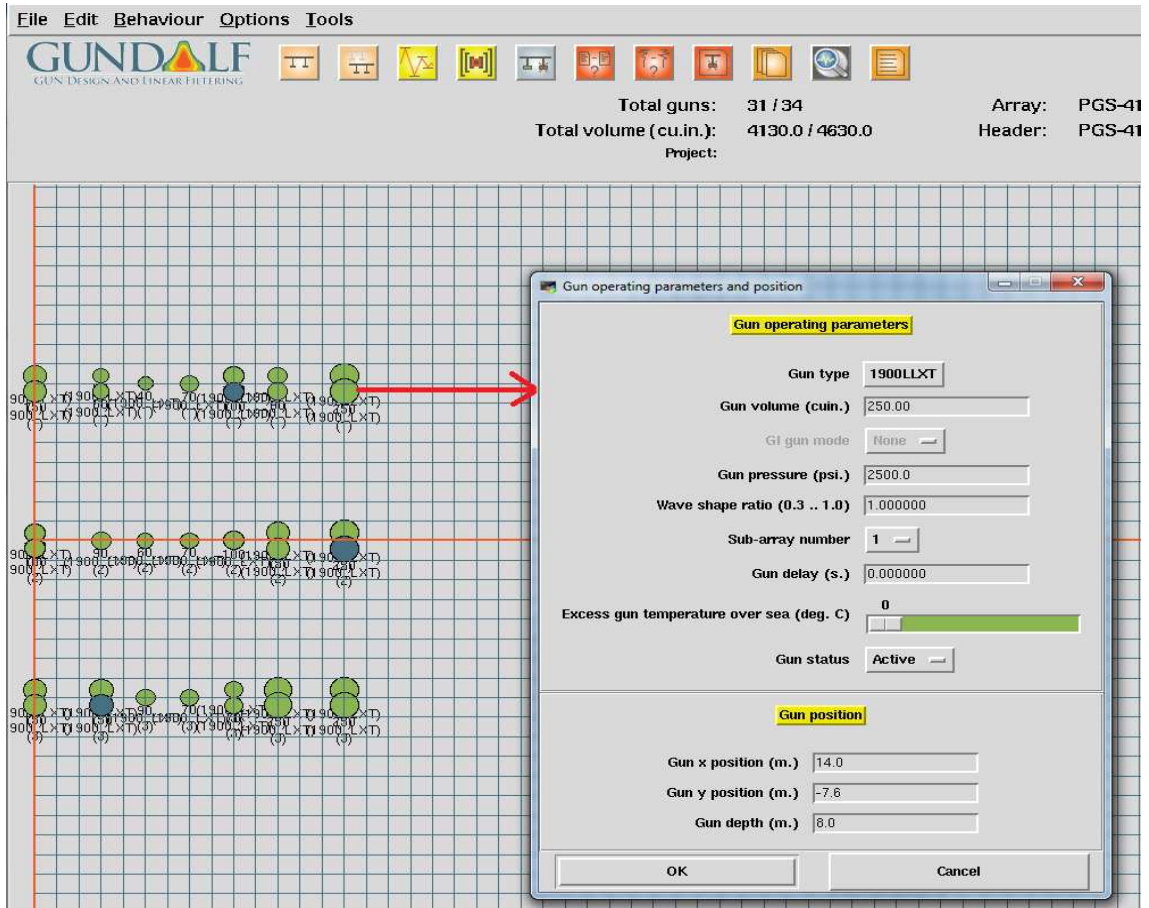


Figura 3.6: Arranjo já inserido no *software*. É mostrado também os campos que devem ser preenchidos para cada *air gun*.

Alguns parâmetros como intervalo de amostragem do resultado da modelagem, da modelagem em si (que é utilizado internamente para os cálculos), filtros que julguem necessários, como mostra a figura 3.7. Além destes, parâmetros como coeficiente de reflexão da superfície ar-água, temperatura e velocidade da água do mar na profundidade média do arranjo também são solicitados.

Os produtos da modelagem são, como já dito, a assinatura do pulso $w(t)$ e seu espectro de amplitude, além dos padrões de ditetividade, gráficos de decaimento sonoro, dentre outros. O cabeçalho do arquivo de saída, que pode ser um html ou um arquivo em formato pdf, pode ser visto na figura 3.8.

3. Fonte Sísmica Marítima

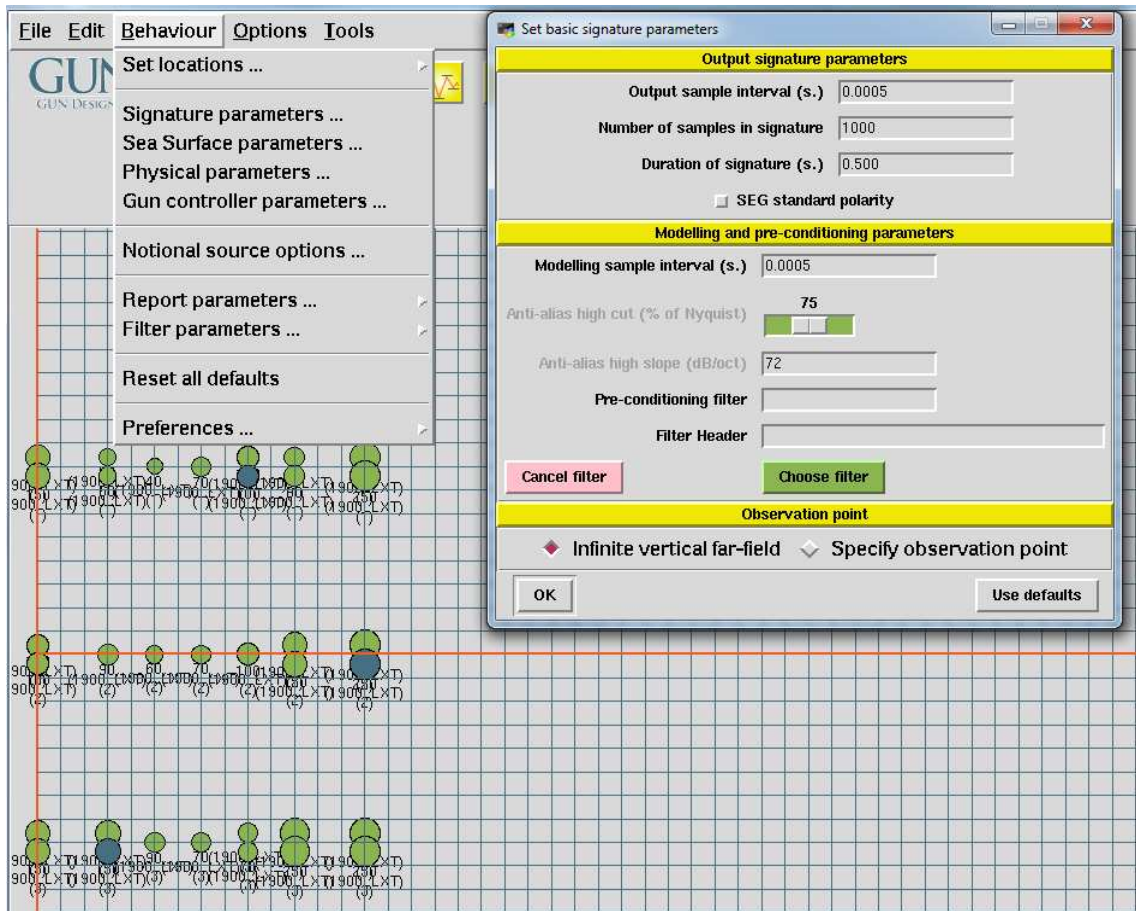


Figura 3.7: Ilustração de alguns parâmetros que devem ser inseridos para a modelagem da assinatura de um arranjo de *air gun*.

3.2 O fantasma (*ghost*) da fonte

A reflexão da radiação emitida pela fonte na superfície água-ar tem um efeito inextricável no campo de radiação e, como tal, é considerado um efeito intrínseco do campo de onda, do ponto de vista do processamento sísmico. Em trabalhos envolvendo fontes sísmicas, as assinaturas da fonte são apresentadas com sua reflexão intrínseca na superfície livre. Nas frequências de interesse sísmico⁷, a superfície água-ar é praticamente um refletor perfeito, pois $r \approx -1$, como vimos na Seção 2.1, em que o sinal negativo representa uma reversão de polaridade das ondas refletidas. Logo, a energia gerada logo abaixo desta superfície não pode escapar para o ar, e tal superfície age

⁷Como já comentado no Capítulo 2, o interesse da sísmica de exploração vai até ~ 150 -200 Hz por uma série de fatores: (i) a partir desta faixa o espectro emitido pela fonte sísmica possui amplitudes muito baixas, (ii) alguns algoritmos de processamento possuem limitações nas altas frequências e (iii) o filtro natural da terra que filtra as altas frequência mais do que as baixas.

3. Fonte Sísmica Marítima

GUNDALF array modelling suite - Array report

Gundalf revision AIR8.1j, Date 2015-10-30, Epoch 2015-10-30

Tue Jun 14 12:20:51 BRT 2016 (u3ss)

This report is copyright [Oakwood Computing Associates Ltd.](#) 2002-. The report is automatically generated using [GUNDALF](#)

Report pre-amble and it may be freely distributed in whole or in part provided it retains copyright identifiers.

Author: AQM

Author Organisation: Petrobras

Contents

- [Signature filtering policy](#)
- [Some notes on the modelling algorithm](#)
- [Array summary](#)
- [Modelling summary](#)
- [Array geometry and gun contribution](#)
- [Array centres and timing](#)
- [Array directivity](#)
- [Signature characteristics](#)
- [Acoustic energy characteristics](#)
- [Drop-out characteristics](#)
- [Inventory usage](#)
- [Gundalf calibration details](#)

Figura 3.8: Cabeçalho do relatório que mostra os principais resultados da modelagem.

como um espelho, produzindo uma imagem virtual da radiação sísmica, geralmente chamada de fantasma (ou *ghost*).

3.2.1 Como é formado o *ghost* da fonte

Considerando a Figura 3.9, é possível notar que a diferença de caminho entre o pulso primário e o pulso virtual⁸, ou *ghost*, pode ser dado pelo cateto $2d \cos \theta$ do triângulo retângulo de hipotenusa $2d$. Em consequência, o atraso temporal entre os pulsos é dado por:

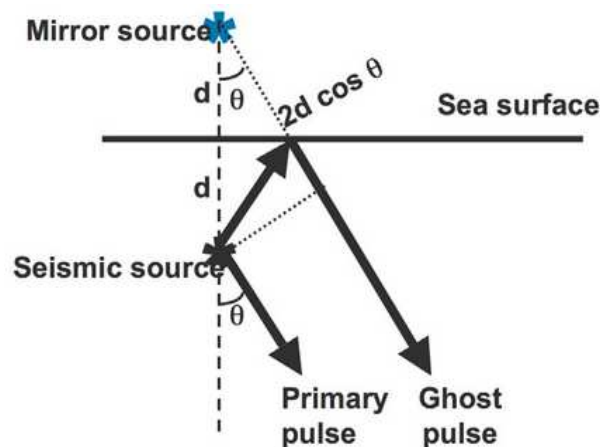


Figura 3.9: Ilustração da formação do pulso virtual, ou *ghost*, da fonte [38].

⁸“Virtual” devido à analogia com a ótica, mas o pulso existe e está presente na assinatura sísmica.

3. Fonte Sísmica Marítima

$$t_f = \frac{2d \cos\theta}{v}, \quad (3.2)$$

onde v é a velocidade da onda acústica na água, considerada 1.500 m/s.

A equação 3.2 mostra que o atraso é função do ângulo θ com que o campo de radiação emerge da fonte, fato este que será melhor explorado quando a diretividade de fontes sísmicas for estudada na Seção 3.4. Viu-se, então, que a assinatura é, de fato, composta pelo pulso primário e seu *ghost*, atrasado no tempo e de polaridade invertida em comparação com o pulso primário. Cabe observar que este fenômeno também ocorre no receptor, ou seja, há uma reflexão adicional na superfície livre logo acima dos receptores que causam o mesmo efeito que o caso da fonte, como pode ser visto à esquerda da Figura 3.10. No entanto, a abordagem no lado do receptor é maior e já possui melhores resultados do que o da fonte. Os trabalhos das referências [6–8] e alguns lá citados são representativos no quesito atenuação do *ghost* do receptor. Na parte direita da Figura 3.10 vê-se uma ilustração de como é formado a assinatura como a combinação dos dois efeitos.

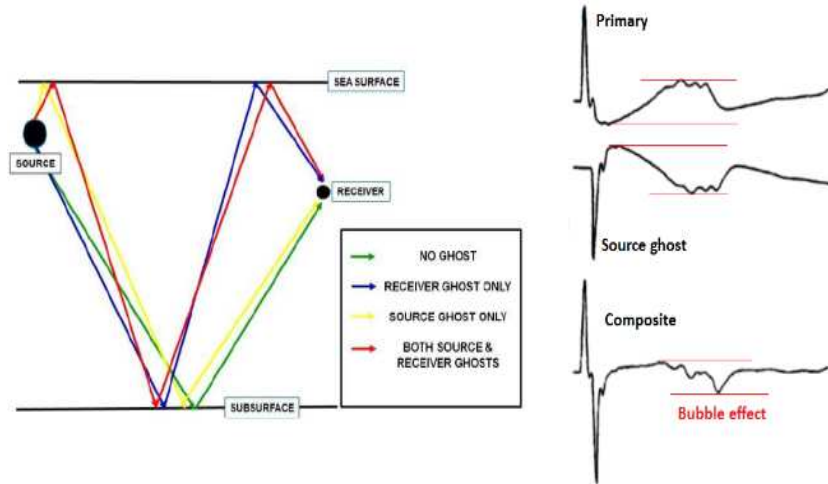


Figura 3.10: Esquerda: raios indicando as trajetórias que dão origem aos pulsos: primário (em verde), *ghost* do receptor (em azul), *ghost* da fonte (em amarelo), *ghost* de fonte e receptor (vermelho) [39]. À direita é ilustrado como se dá a composição da assinatura da fonte [40] (modificado de [33]).

A parte direita da Figura 3.10 mostrou o efeito do *ghost* no domínio do tempo. A consequência do fenômeno no domínio da frequência pode ser examinada através

3. Fonte Sísmica Marítima

da análise da figura 3.11, que ilustra um harmônico qualquer da assinatura da fonte (pulso primário + *ghost*). De acordo com a figura, o *ghost* tem a polaridade invertida e é atrasado de $t_f = \tau$ em relação ao primário.

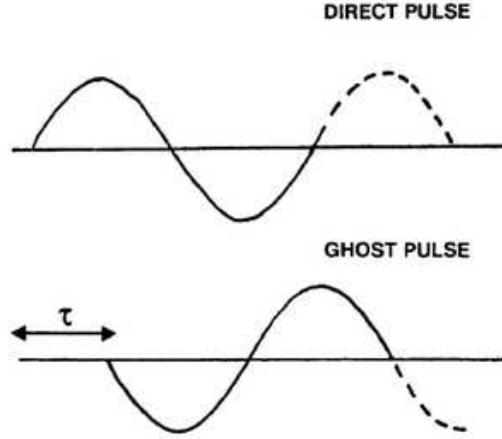


Figura 3.11: Ilustração de um harmônico qualquer que compõe a assinatura da fonte. O *ghost* tem sua polaridade revertida e um atraso $t_f = \tau$ em relação ao pulso primário. O valor de t_f é que irá determinar se a interferência entre os pulsos será construtiva ou destrutiva [33].

Usando a equação 3.2 vemos que a distância percorrida no tempo t_f será $t_f v = 2d \cos \theta$. Se $t_f v$ for igual à múltiplos ímpares da metade do comprimento de onda λ , teremos interferência construtiva; enquanto que se $t_f v$ for igual à múltiplos pares de meio comprimento de onda, teremos interferência destrutiva:

- destrutiva se: $t_f v = 0, 0\lambda, 1, 0\lambda, 2, 0\lambda, 3, 0\lambda, \dots$
- construtiva se: $t_f v = 0, 5\lambda, 1, 5\lambda, 2, 5\lambda, 3, 5\lambda, \dots$

Como o pulso sísmico é composto por um vasto intervalo de frequências, as interferências construtivas e destrutivas funcionarão como um modulador de todo o espectro de amplitude, pois entre estes dois extremos tem-se os casos intermediários, que também atuarão em cada harmônico. Desta forma, as frequências de *notch*⁹ f_n , onde ocorrem a interferência destrutiva, são dadas por:

$$f_n = \frac{n}{t_f} = \frac{nv}{2d \cos \theta}, \quad (3.3)$$

em que $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

⁹Não confundir f_n com f_N , a frequência de Nyquist, discutida no Capítulo 2.

3. Fonte Sísmica Marítima

3.2.2 Formalismo matemático do sistema *ghost*

Como pode-se notar da discussão já feita até aqui sobre o *ghost*, este age como um sistema linear, pois um sinal de entrada aplicado ao sistema *ghost* terá como saída a própria entrada mais a saída atrasada e revertida em relação à primária. Uma propriedade importante de cada sistema linear é sua resposta impulsiva $h(t)$, definida como a saída obtida quando um impulso é aplicado na entrada, ou seja:

$$h(t) = \mathbf{T}\{\delta(t)\} , \quad (3.4)$$

onde t é uma variável qualquer e $\mathbf{T}$ é o operador de transformada linear. Dadas as explicações sobre o sistema *ghost*, não é difícil perceber que sua resposta impulsiva é dada por:

$$h_f(t) = \delta(t) - \delta(t - t_f) , \quad (3.5)$$

onde t_f é o atraso dado pela equação 3.2. O sinal negativo advém da consideração de $r = -1$. Podemos, ainda, redefinir o pulso (*wavelet*) emitido pela fonte, $w(t)$, para contemplar o efeito do fantasma, de forma que:

$$p(t) = w(t) * h_f(t) , \quad (3.6)$$

relembrando que a operação de convolução é linear. Pode-se usar $p(t)$ para substituir $w(t)$ na equação 2.4. Para uma definição mais precisa do pulso $p(t)$ que engloba sistemas dos instrumentos de registro, *ghost* do receptor (que atua de forma análoga ao da fonte), é indicada a Seção 2.10 da referência [16].

Usando as propriedades da transformada de Fourier de $\mathcal{F}\{\delta(t)\} = 1$ e $\mathcal{F}\{\delta(t - t_f)\} = e^{-i\omega t_f}$, chegamos que a resposta em frequência (ou transformada de Fourier da resposta impulsiva) do sistema *ghost* é dada por:

$$H(\omega) = 1 - e^{-i\omega t_f} . \quad (3.7)$$

Após manipulações algébricas, chega-se que a amplitude da resposta em frequên-

3. Fonte Sísmica Marítima

cia pode ser escrita como:

$$|H(\omega)| = 2 \left| \sin \left(\frac{\omega t_f}{2} \right) \right|, \quad (3.8)$$

onde $\omega = 2\pi f$. Note que $|H(\omega)| = 0$ quando:

$$\frac{\omega_n t_f}{2} = n\pi \Rightarrow f_n = \frac{n}{t_f}, \quad (3.9)$$

com $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, em completo acordo com a equação 3.3.

Fazendo-se $\theta = 0^\circ$ em 3.2 e substituindo-se t_f na equação 3.8 para diferentes valores de profundidade, é possível analisar de forma gráfica o efeito em frequência do *ghost* da fonte, como ilustrado na figura 3.12.

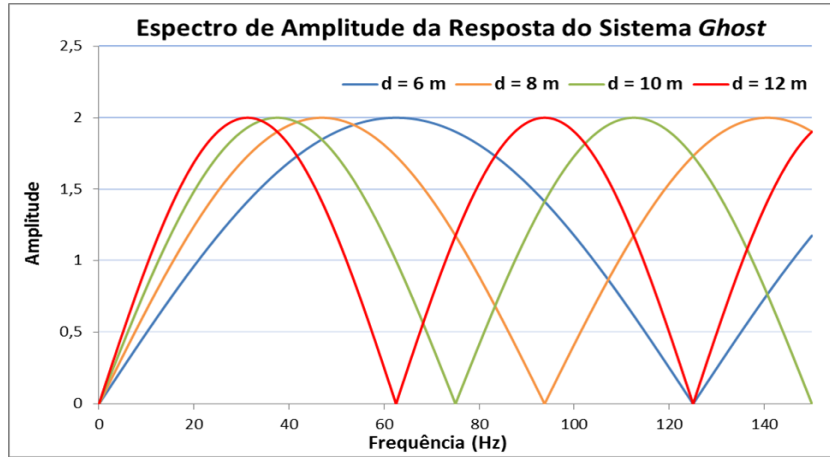


Figura 3.12: Amplitude da resposta em frequência do sistema *ghost* da fonte. São mostradas as respostas para diferentes profundidades.

Um primeiro ponto a se notar é que independente da profundidade d escolhida, existe *sempre* um *notch* em 0 Hz. As soluções propostas pelas companhias de aquisição sísmica visam, em sua maioria, atenuar o efeito dos *notches* que não o primeiro. Pelos argumentos já citados nos Capítulos 1 e 2, este primeiro *notch* é o que mais preocupa atualmente a comunidade que trabalha com sísmica de exploração. Nota-se ainda que conforme a profundidade d é aumentada, menos o sistema *ghost* afeta as baixas frequências (em direção oposta à conclusão obtida quando apenas o sinal primário - sem *ghost* - foi analisado na Seção 3.1.2), mas em contrapartida o segundo *notch* está em frequências menores, prejudicando a parte das altas frequências. Logo, a escolha

3. Fonte Sísmica Marítima

da profundidade da fonte é, quase sempre, um jogo de custo-benefício, que deve ser estudado na etapa de *Survey Design*.

3.2.3 Como o *ghost* afeta o pulso sísmico

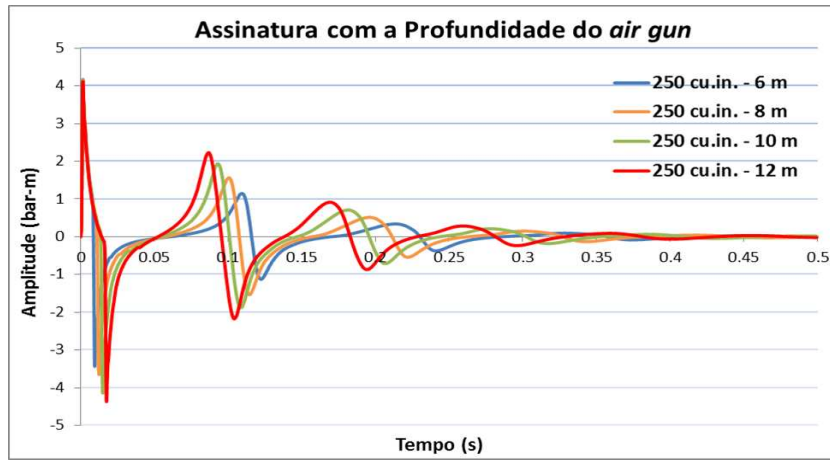
Usando-se a redefinição de pulso sísmico $p(t) = w(t) * h_f(t)$ e lembrando que a transformada de Fourier de uma convolução no tempo é o produto dos seus espectros de amplitude¹⁰ na frequência, pode-se aplicar $h_f(t)$ nos pulsos e $|H(f)|$ nos espectros da Figura 3.4 e obter-se os resultados indicados na Figura 3.13.

Conforme foi comentado na Seção 3.1.2, o efeito do *ghost* nas baixas frequências em profundidades menores sobressai-se perante o ganho obtido pela frequência fundamental f_c menor quando comparado com profundidades maiores, o que pode ser visto na Figura 3.13(b), que mostra um maior conteúdo de baixas frequências (até ~ 20 Hz) dado pela fonte a 12 m de profundidade (curva vermelha) em comparação com a fonte a 6 m de profundidade (curva azul). No entanto, se se deseja melhorar o conteúdo de baixas frequências, deve-se aumentar o período de oscilação T da bolha, por exemplo aumentando-se seu volume.

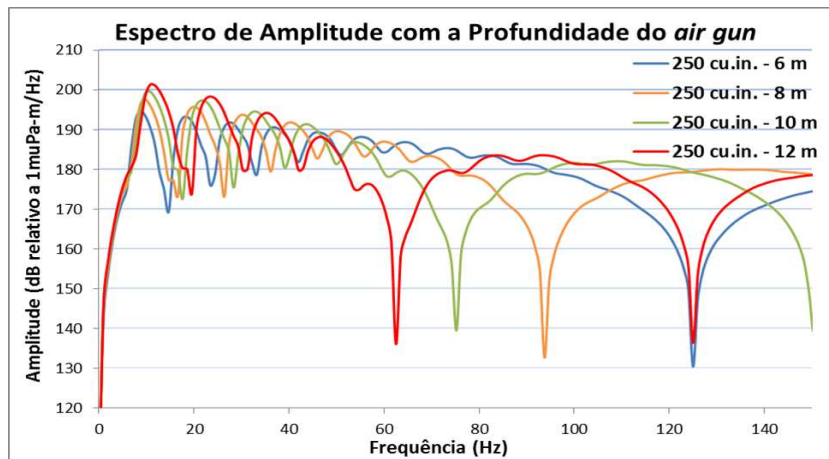
Como já visto até aqui, o *ghost* prejudica o dado sísmico por atenuar certas faixas de frequências e eliminar alguns harmônicos do sinal sísmico. Se o ruído aleatório for levado em conta, e notar que o seu efeito se espalha por todo o espectro de amplitude na faixa de frequências útil ao dado sísmico, vê-se que na região do espectro onde o *ghost* mais afeta, a relação sinal-ruído é menor, correndo-se o risco de ressaltar o ruído na etapa da deconvolução do pulso sísmico (onde deseja-se planificar o espectro do pulso - torná-lo num impulso de curta duração). Para tanto o efeito do *ghost* é “corrigido” no processamento. Esta é uma questão de muito debate na comunidade geofísica, pois

¹⁰Nos referimos, no presente trabalho, exclusivamente ao espectro de amplitude de uma fonte sísmica marítima, sem nos reportar às características da *fase*. Isto se deve ao fato de um sinal $w(t)$ obtido por meio de um *air gun* ter características de fase bem definidas. É comum considerar o pulso *far field*, será visto na Seção 3.2.4, o mais utilizado no processamento sísmico, um sinal de fase mínima. Ou seja, de todos os sinais existentes, $x(t)$, que possuem o mesmo espectro de amplitude de $w(t)$, o de fase mínima será aquele que possuir, para qualquer tempo t , a maior energia parcial $E_P(t) = \int_{-\infty}^t |x(\tau)|^2 d\tau$. O que é algo concebível, dada a característica impulsiva - ou próximo a isto - de emissão do ar pelo *air gun*. Pouco além disso pode ser discorrido acerca das características de fase de uma fonte sísmica marítima. Para os efeitos da fase no do pulso sísmico no processo de deconvolução, é indicado a Seção 3.2.4 da referência [16].

3. Fonte Sísmica Marítima



(a)



(b)

Figura 3.13: (a) Assinatura de um *air gun* de 250 cu.in. e 2.000 psi para 6, 8, 10 e 12 m de profundidade com o *ghost* da fonte. (b) Correspondentes espectros de amplitude das assinaturas em (a).

há quem acredite que o dado sísmico é limitado na aquisição sísmica, não podendo ser recuperadas frequências que não foram adquiridas. O presente trabalho adota esta posição.

A Figura 3.14 ilustra uma seção sísmica com o *ghost* da fonte e receptor, à

3. Fonte Sísmica Marítima

esquerda, e a seção sísmica após a remoção¹¹ de ambos os *ghosts*. A parte de cima da Figura 3.14 é uma comparação com o efeito do *ghost* em fotografia, onde à esquerda temos a adição de dois *ghosts* numa fotografia de Stonehenge e à direita vemos claramente a nitidez dos detalhes após a remoção dos mesmos.

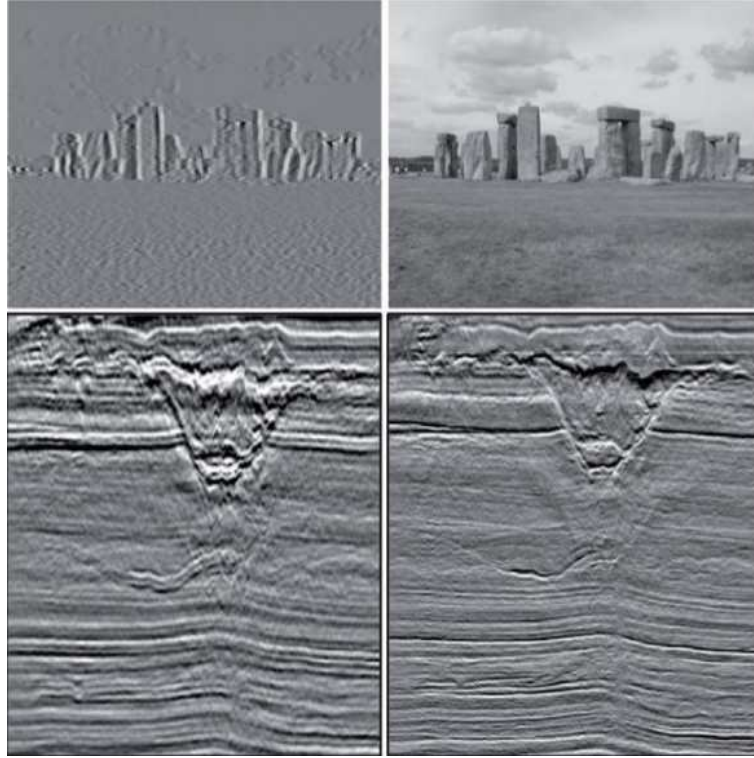


Figura 3.14: Acima: fotografias de Stonehenge com a inclusão de dois *ghosts* (esquerda) e após a remoção dos mesmos. Embaixo: Seção sísmica com *ghost* de fonte e receptor (esquerda) e após a remoção/atenuação dos mesmos (direita) [41].

3.2.4 Campo próximo e campo remoto

A equação da onda acústica¹² com densidade ρ constante num meio homogêneo e isotrópico (situações que se aplicam ao caso de propagação na água do mar), a uma

¹¹As imagens da Figura 3.14 foram retiradas do trabalho [41], da empresa de aquisição PGS (Petroleum Geo-Services), e há sempre que se criticar e entender o processo envolvido por trás da solução apresentada. No caso da remoção do *ghost* do receptor, a empresa faz uso de receptor que mede variação de pressão (hidrofone) e sensores de velocidade (geofone), e sabe-se que existem problemas na região das frequências menores que 20 a 25 Hz. No que tange à remoção do *ghost* da fonte, a Petrobras ainda não fez uso desta metodologia, mas sabe-se que a empresa faz uso híbrido, de uma solução na aquisição, conhecida como Multi Level Source (MLS), que será vista no Capítulo 5, com etapas no processamento.

¹²A dedução da equação da onda a partir das Leis de Hooke e da 2ª Lei de Newton não será abordada neste trabalho. Para tal, consultar as referências [2,16].

3. Fonte Sísmica Marítima

dada posição $\vec{r}$ da posição de detonação da fonte, de forma a não considerarmos o termo fonte na equação, é escrita abaixo:

$$\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 p(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = \nabla^2 p(\vec{r}, t) , \quad (3.10)$$

onde p é o campo de ondas de pressão, v a velocidade de propagação da onda na água, t é o tempo e $\vec{r} \equiv (r, \theta, \phi)$, com θ e ϕ sendo os ângulos polar e azimutal, respectivamente.

Uma solução da equação 3.10 para uma fonte pontual (por exemplo, um *air gun* sem considerar a fonte virtual ou *ghost*) nem a absorção da camada de água¹³, com simetria esférica, pode ser escrita como:

$$p(r, t) = \frac{1}{r} f\left(t - \frac{r}{v}\right) , \quad (3.11)$$

em que f é uma função qualquer que depende da fonte.

Assim, como era de esperar, vemos o comportamento do decaimento com $1/r$ do campo de pressão. Se passarmos agora para o caso real, onde há a presença do *ghost*, considerando a solução independente do tempo, e usarmos o princípio da superposição dos campos de onda, vemos que quanto mais próximo se estiver da fonte de radiação mais a *forma*¹⁴ da onda será impactada pela presença das duas fontes (real e virtual). Desta maneira, se numa dada região do espaço, com $\theta = \theta_0$ e $\phi = \phi_0$ constantes e $r_1 \neq r_2$, os campos $p(r_1, \theta_0, \phi_0)$ e $p(r_2, \theta_0, \phi_0)$ diferirem em sua *forma*, tal região recebe o nome de campo próximo ou *near field*. Ao passo que se numa dada região os campos $p(r_1, \theta_0, \phi_0)$ e $p(r_2, \theta_0, \phi_0)$ não variarem sua *forma*, tal região recebe o nome de *far field*. É de se notar que no *far field*, podemos variar (θ, ϕ) e termos campos de onda com *forma* e amplitude diferentes para um mesmo r . Este caso será estudado na Seção 3.4.

É preciso notar ainda que a delimitação entre as duas regiões não é exata e depende de fatores como erro de tolerância aceitável, profundidade da fonte, frequência a ser analisada. Pela discussão feita, é evidente que estes conceitos fundamentam-se em questões geométricas da distribuição das fontes (até aqui tratadas como um *air gun*

¹³Nas condições do experimento sísmico, a absorção do espectro de amplitude na faixa de frequência útil à sísmica é, na média, inferior a 10^{-3} dB/km [42].

¹⁴Note que está-se referindo à *forma* ou à *fase* do campo de onda e não à amplitude, que como viu-se obedece à lei de escala $1/r$.

3. Fonte Sísmica Marítima

e seu *ghost* associado), no entanto é de se considerar que quando temos mais *air guns* detonando, como é o caso dos arranjos de *air guns* estudados na Seção 3.3, a distribuição geométrica destas fontes implicarão também nos conceitos de *near* e *far field* bem como na *diretividade* do arranjo. Salvo expresse em contrário, quando explicitamente é dito qual a posição onde o campo de onda é medido (como nas Figuras 3.2 e 3.3, indicando medidas no *near field*), todas as assinaturas mostradas neste trabalho estão na região do *far field*¹⁵.

Quando se trata de uma medida de campo no *far field*, é comum usar um hidrofone a uma profundidade maior que 100 m, verticalmente abaixo da posição da fonte¹⁶. Quando a assinatura é modelada, os *softwares* de modelagem consideram distâncias padrão para o *far field*. O *Gundalf*, por exemplo, não especifica qual a distância é usada para a assinatura no *far field*. O *Nucleus+*, outro *software* de modelagem de fonte, da empresa PGS, utiliza uma distância padrão de 9.000 m.

A Figura 3.15 mostra, acima, a assinatura de um *air gun* de 40 cu.in (pressão, profundidade e posição da medida não informados) medida no *near field*, onde é possível ver que o efeito dos pulsos primário e secundários domina, não sendo possível perceber o efeito do *ghost*. Embaixo é mostrado a assinatura no *far field* (posição da medida não informada), sendo possível notar que o pulso primário e o *ghost* têm a mesma representatividade. Note que é definido as grandezas P e B como sendo os picos primário e da primeira bolha para o *near field* e $P-P$ e $B-B$ respectivamente como as amplitudes pico a pico para a primária e primeira bolha no *far field*. A razão pico-bolha $PBR = P-P/B-B$ é uma medida relativa do tamanho da bolha. Quando os arranjos de fontes forem tratados na Seção 3.3, veremos que esta razão será menor do que a encontrada no caso de um *air gun*. Ainda atentando para a Figura 3.15 é visto que as amplitudes seja no *near* seja no *far field* são da mesma ordem de grandeza. Isto se devendo à unidade na qual a medida é mostrada, no eixo vertical, que é em Bar-m,

¹⁵O termo assinatura de campo remoto ou *far field signature* é, muitas vezes, usado pela comunidade geofísica para designar a assinatura da fonte que emerge verticalmente da mesma, ou seja fazendo-se $\theta = 0$ na Figura 3.9.

¹⁶Esta tarefa é operacionalmente difícil, pois exige um sistema de posicionamento preciso, e hoje é apenas realizada para efeitos de pesquisas. Há que se tomar cuidado com a camada de água, pois esta deve ser grande o suficiente para que a reflexão do fundo do mar não seja registrada até que a assinatura seja completamente medida.

3. Fonte Sísmica Marítima

ou seja, qualquer que seja o ponto de observação da medida ou modelagem, é feito um cálculo reverso, também chamado de *back calculation*, usando a lei de escala $1/r$ para estimar o campo como se fosse observado a 1 metro da fonte [43].

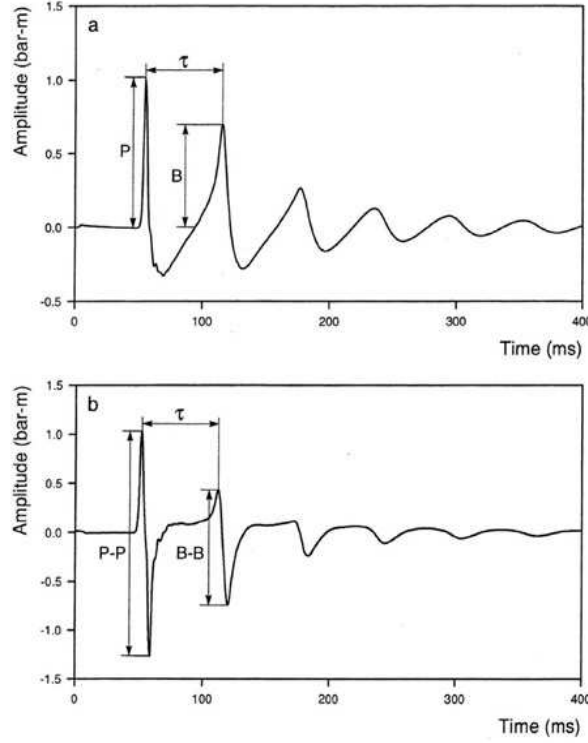


Figura 3.15: Assinatura de um *air gun* de 40 cu.in. Acima: assinatura no campo próximo (medida a uma distância da fonte não informada). A amplitude do pulso primário e da primeira bolha são designados respectivamente por P e B . Como vê-se claramente o efeito do pulso primário e não do *ghost*, constata-se que a assinatura é medida mais próxima ao *air gun* do que à superfície livre, onde ambos efeitos - primário e *ghost* - deveriam aparecer com aproximadamente as mesmas amplitudes. Embaixo: a assinatura *far field* ilustrando a presença do *ghost*. As amplitudes $P-P$ e $B-B$ são as amplitudes de pico a pico do pulso primário e pico a pico da primeira bolha, respectivamente. A razão pico-bolha é dada por $PBR = P-P/B-B$. Em ambos os casos $T = \tau$ é o período da bolha, o mesmo definido na equação 3.1 [38].

3.3 Arranjos de *air guns*

Dados experimentais e estudos teóricos sobre *air guns* (veja a referência [44] e aquelas lá citadas) fornecem a seguinte expressão para a amplitude do pulso primário emitido, quando a pressão P e a profundidade d são constantes (tal como ocorre nas aquisições sísmicas):

3. Fonte Sísmica Marítima

$$A = C_2 V^{1/3}, \quad (3.12)$$

onde C_2 depende do *design* do *air gun* e V é o volume do *air gun*. A variação da amplitude com o volume pode ser observada na Figura 3.5(a).

Através das equações 3.1 e 3.12 é possível ver que para se ter um pulso primário de alta amplitude, seria possível optar por um único *air gun* de grande volume. No entanto, isto seria improdutivo, devido à altíssima capacidade requerida do compressor, além de as bolhas secundárias não serem atenuadas, o que prejudicaria o dado sísmico. Para tanto, faz-se uso de um arranjo ou *array* de *air guns*.

Num arranjo, com um dado volume total, usa-se a dependência de $V^{1/3}$ para se usar mais *air guns*, gerando assim um pulso de maior amplitude. Vale-se ainda das características de frequência, visto na Seção 3.1.2, próprias de cada *air gun* com seu particular volume V , onde a diversidade dos volumes torna tais características complementares, fazendo com que o espectro de amplitude do pulso seja mais uniforme.

O uso de um arranjo de *air guns* de diferentes volumes, quando todos são disparados no mesmo instante¹⁷, possibilita ainda que o pulso primário seja adicionado construtivamente ao passo que as oscilações secundárias da bolha adicionam-se destrutivamente. Nota-se que o *ghost* da bolha de um dado *air gun* de volume V_1 que compõe o arranjo atua de forma a cancelar o efeito direto da bolha de um outro *air gun* de volume V_2 , com $V_1 < V_2$. Estes efeitos podem ser vistos na Figura 3.16, que mostra as assinaturas modeladas (curvas em azul) para 6 volumes, indicados à esquerda, a 2.000 psi e numa profundidade não indicada. As assinaturas foram modeladas no *far field*, a 300 m de profundidade abaixo do *air gun*. Se estes 6 *air guns* forem dispostos num arranjo (geometria não indicada) e detonados simultaneamente, a assinatura modelada a 300 m do arranjo é a indicada na parte de baixo da figura (em vermelho). Note que a bolha foi atenuada, deixando apenas um resquício, chamado de bolha residual (*residual bubble pulses*). Note também a amplitude A e o período da bolha T crescentes com o aumento do volume V .

A razão pico-bolha da assinatura do arranjo mostrada na Figura 3.16 é, segundo

¹⁷Um arranjo deste tipo recebe o nome de *tuned array*.

3. Fonte Sísmica Marítima

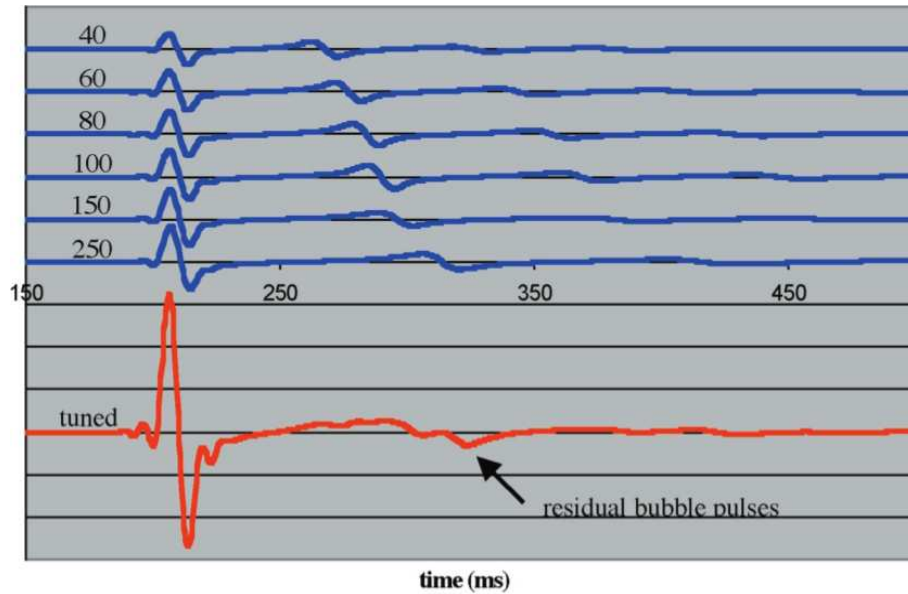


Figura 3.16: As assinaturas em azul são de *air guns* individuais cujos volumes, em cu.in., são indicados à esquerda, modeladas num hidrofone a 300 m abaixo dos *air guns*. Se os 6 *air guns* forem detonados simultaneamente num arranjo (cuja geometria não é indicada), a assinatura modelada resultante a 300 m é a mostrada na curva vermelha. Note que o eixo vertical é omitido. Este é um exemplo de *tuned array* [45].

a referência [45], 8,6. É interessante apenas notar que esta a PBR e a grandeza $P-P$ são dois parâmetros usados para na escolha de um arranjo de fonte sísmica. Prefere-se valores, geralmente, acima de 20 para a razão PBR e acima de 100 Bar-m para a grandeza $P-P$. Estes critérios estão definidos no domínio do tempo, mas existem aqueles definidos no domínio da frequência.

3.3.1 Visão operacional de um arranjo

Características de fonte, como PBR e $P-P$, são próprias da configuração de cada empresa que realiza o levantamento sísmico. Propor um arranjo de *air guns* como fonte sísmica não é tarefa fácil. Exige uma assinatura que seja estável sob condições de mar revolto. Como é comum um ou outro *air gun* falharem durante a aquisição, são feitos estudos do impacto disto na assinatura do arranjo, que é comparada com o arranjo da assinatura original, completa. No entanto, são predefinidos critérios de aceitação ou não da assinatura modificada, no que chamamos de critérios de *dropout*. É necessário fazer testes de campo antes de dispor a solução no mercado. Geralmente as empresas

3. Fonte Sísmica Marítima

têm de duas a três configurações de arranjos que disponibilizam aos seus clientes. Feitos estes comentários, a proposta de fonte apresentada neste trabalho partirá de um arranjo padrão de uma das empresas de aquisição, como será discutido no Capítulo 5.

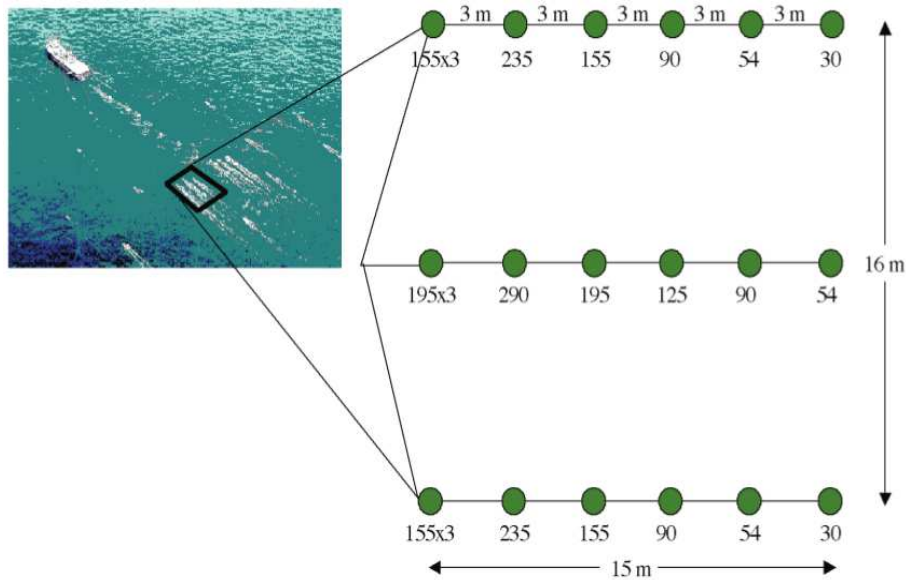


Figura 3.17: Navio sísmico rebocando dois arranjos de *air guns* iguais (configuração *flip-flop*) a 6 m de profundidade. Um arranjo consiste de 3 subarranjos, que são compostos de 6 posições e possuem 8 *air guns* cada. As dimensões do arranjo são 15 x 16 m (IL x XL). Os volumes indicados estão em cu.in. e o volume total do arranjo é de 3.397 cu.in. [45] ©WesternGeco.

A Figura 3.17 mostra uma aquisição marítima real, da empresa WesternGeco. É destacado no polígono preto o arranjo de *air guns* e, na parte direita da figura, vê-se uma ilustração indicando as dimensões reais do arranjo. O arranjo é formado por 3 subarranjos¹⁸ espaçados de 8 m cada, que por sua vez possuem 6 posições para os *air guns* (ou *gun positions*) espaçados de 3 m cada. Cada *gun position* pode ser ocupada por um único *air guns* ou por um *cluster* de *air guns* (veremos os motivos de se usarem *clusters* de *air gun* na Seção 3.27). Os números da ilustração denotam os volumes dos *air guns* em cu. in. No início de cada subarranjo o volume é sucedido de ‘x3’, indicando que aí temos um *cluster* de 3 *air guns*. Na Figura 3.18, vemos a assinatura e o espectro de amplitude do disparo simultâneo do arranjo indicado na Figura 3.17, que possui um volume total de 3.397 cu.in.

¹⁸O plano que contém o subarranjo coincide com o plano IL.

3. Fonte Sísmica Marítima

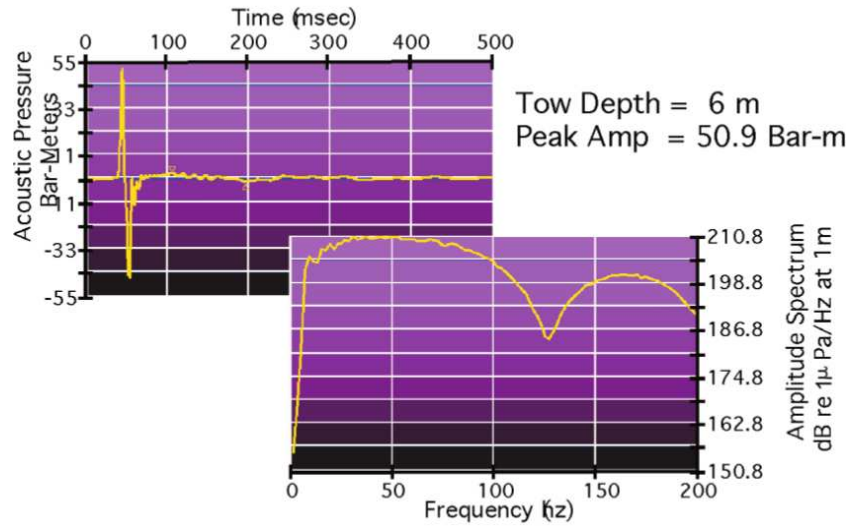


Figura 3.18: Assinatura da fonte e espectro de amplitude para o arranjo mostrado na Figura 3.17 [43].

A Figura 3.19 ilustra, para dois navios, o local, chamado de *gundeck*, onde situam-se os subarranjos quando não estão em operação ou quando estão em manutenção. Por fim, a Figura 3.20 mostra a colocação de um subarranjo na água. Estas figuras tentam apenas dar uma noção da quantidade de equipamentos e dificuldades envolvidos num arranjo de *air guns*, noção que muitas pessoas que trabalham com sísmica não possui.



Figura 3.19: Esta fotografia mostra o *gundeck* de dois navios. Esta é a parte do navio onde os subarranjos ficam localizados quando não estão em operação ou quando estão em manutenção [46].

3. Fonte Sísmica Marítima



Figura 3.20: Esta fotografia mostra a operação de colocação (*deployment*) de um subarranjo na água [47].

3.4 Diretividade do arranjo de *air guns*

Apesar das benesses trazidas por um arranjo de *air guns*, outros fenômenos surgem devido à proximidade entre os *air gun* numa tal configuração. Pode-se destacar a diretividade (variação da assinatura da fonte com os ângulos polar e azimutal) e interação (que será vista na Seção 3.5). Como já visto na Seção 3.2, na região do *far field* metade da energia do pulso é devida ao *ghost* que, por sua vez, depende do ângulo θ de emergência do pulso da fonte. Assim, mesmo o caso mais simples de um único *air gun* possui a variação da assinatura com a direção.

As Figuras 3.21 e 3.22 ilustram este fenômeno. A escala de cores denota a amplitude do espectro, indo de 220 dB (vermelho escuro) à 100 dB (violeta). O eixo horizontal indica o ângulo θ de emergência da fonte (0° está no centro, valores negativos à esquerda, até -90° , e positivos à direita, até 90°). O eixo vertical indica a frequência f , que vai de 0 à 250 Hz. A palavra “*Fore*” embaixo à esquerda indica que naquele lado localiza-se o navio e, portanto estamos mostrando a diretividade no plano IL ($\phi = 0^\circ$). Por se tratar de uma única fonte, temos simetria esférica e o ângulo azimutal não faz diferença.

Para a Figura 3.21, percebe-se um comportamento isotrópico, sem variação da assinatura da fonte com θ e, portanto, sem diretividade. Nota-se ainda que as oscilações em vermelho/laranja até aproximadamente 70 Hz são devidas ao efeito oscilante da

3. Fonte Sísmica Marítima

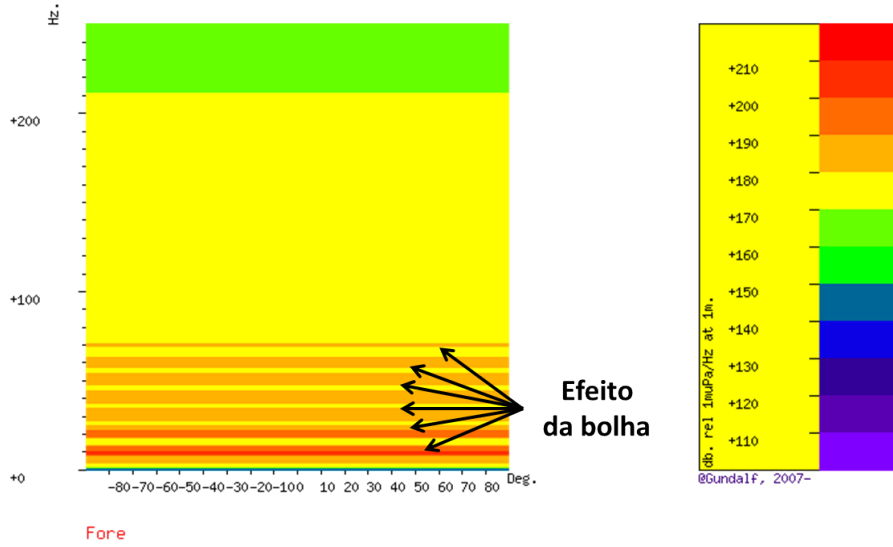


Figura 3.21: Espectro de amplitude para um *air gun* de 250 cu.in. e 2.000 psi a 8 m de profundidade. Não está incluído o *ghost* da fonte, o que é feito forçando-se $r = 0$ para a superfície água-ar na modelagem.

bolha, como pode ser verificado pela cuidadosa análise da Figura 3.4(b), em que a curva laranja indica justamente a assinatura do *air gun* considerado na Figura 3.21, mas para $\theta = 0^\circ$. Na Figura 3.22, os dois primeiros *notches* associados ao *ghost*, caracterizados pelas curvas de baixa amplitude indicadas na figura, se deslocam para mais altas frequências conforme o módulo do ângulo θ aumenta, em completo acordo com a equação 3.3.

Entretanto, considerando-se um arranjo, tal como o mostrado na Figura 3.17, tem-se um fenômeno análogo ao que ocorre acima. Basta haver uma separação espacial, como o pulso primário e seu *ghost*, para que fenômenos de diretividade apareçam. Referindo-se à Figura 3.23, considere duas fontes posicionadas em ‘L’ e ‘R’, separadas por uma distância $2x$. Considerando o plano IL¹⁹ ($\phi = 0$), o campo observado no *far field* por um hidrofone no ponto ‘Q’ na figura, cuja reta que liga o ponto ‘Q’ à posição central entre as duas fontes faz um ângulo θ com a vertical, terá um *notch* que é dado pela expressão:

¹⁹A extrapolação para outros valores de ϕ é uma questão algébrica, não envolvendo outros conceitos, mas não será tratada neste trabalho. Quando for o caso, será explicitado o valor de ϕ . Os programas de modelagem de fonte têm algoritmos diretos para este cálculo.

3. Fonte Sísmica Marítima

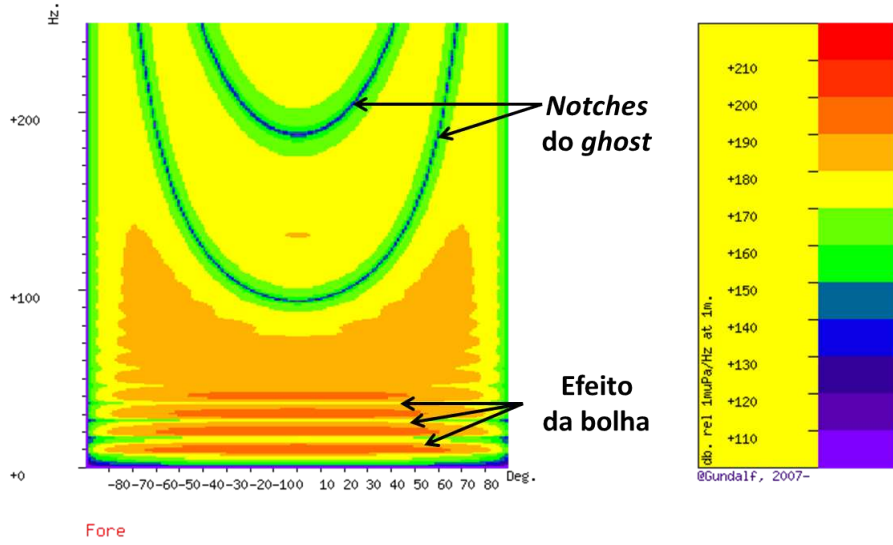


Figura 3.22: Mesmas características da fonte que na Figura 3.21 mas com a inclusão *ghost*.

$$f_{n,a} = \frac{(2n + 1) v}{4x \sin\theta} , \quad (3.13)$$

em que $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, v é a velocidade da onda acústica na água, e o subíndice a indica que o *notch* adveio do fenômeno da diretividade do arranjo de duas fontes, inerente à distribuição de fontes no mesmo. Para o caso de 3 fontes separadas horizontalmente de x (que quivale a $2x$ da Figura 3.23), não é difícil encontrar que as frequências de *notch* são dadas por:

$$f_{n,a1} = \frac{(3n + 1) v}{3x \sin\theta} \quad (3.14a)$$

$$f_{n,a2} = \frac{(3n + 2) v}{3x \sin\theta} , \quad (3.14b)$$

em que $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. Veja que agora para cada valor de n tem-se duas frequências de *notch*, como será visto nas discussões que seguem as Figuras 3.25 e 3.26. Estes casos são particulares e a extensão para um arranjo com mais fontes depende da geometria. Analisando-se as equações 3.13 e 3.14 percebe-se que a extensão da frequência $f_{n,a}$ para m *air guns* espaçados de x é dada por:

3. Fonte Sísmica Marítima

$$f_{n,ai} = \frac{(mn + i) v}{mx \sin \theta}, \quad (3.15)$$

com $i = 1, \dots, (m - 1)$ e $n = 0, 1, 2, \dots$

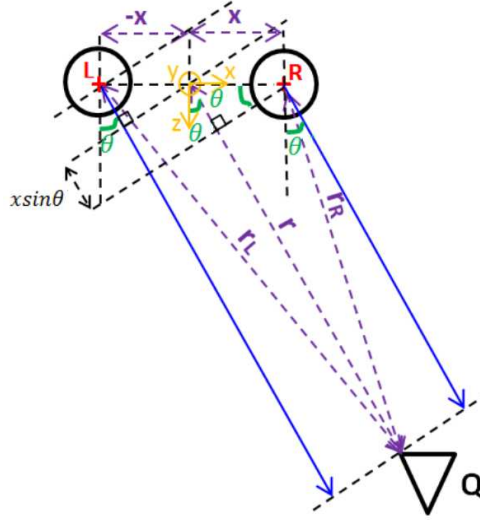


Figura 3.23: Ilustração de como se dá a diretividade de uma fonte composta por dois elementos [40].

As equações 3.13, 3.14 e 3.15 diferem da equação 3.3 pelo fato de a separação entre as fontes ser na horizontal e não vertical como o era entre o pulso primário e o *ghost*, o que leva à dependência com $\sin \theta$ em vez de $\cos \theta$; além disso, por não haver a reversão de polaridade, como ocorre com o *ghost*, a dependência é do tipo $(mn + i)$ e não com n , o que faz com que a diretividade não produza *notch* em 0 Hz.

Dois pontos merecem destaque: primeiro é que todas as equações para a frequência de *notch* apresentam dependência inversa com a distância entre as fontes. Ou seja, para um dado θ , quanto mais próximas as fontes, maiores serão as frequências de *notch*, e assim maiores serão as frequências²⁰ onde ocorrem as interferências construtivas e destrutivas. Logo, o efeito da diretividade será sensível somente em altas frequências. Neste regime, porém, teremos a interação entre os *air guns*, como será visto na Seção 3.5. No caso limite de separação entre todos os *air guns* $x \rightarrow 0$, temos uma única fonte, com simetria esférica e $f_{n,a} \rightarrow \infty$ e, a não ser pelo *ghost*, não teremos a diretividade,

²⁰Lembre-se que entre duas frequências de *notch* consecutivas há uma frequência onde ocorre interferência construtiva, conservando a energia.

3. Fonte Sísmica Marítima

como visto na figura 3.21. Em contrapartida, quanto mais afastadas as fontes, menores serão as frequências de *notch*, e mais atuante será a diretividade. Neste regime, ocorrerá menos interação. Perceba que os dois fenômenos, diretividade e interação, são complementares, sempre trabalhando para a conservação da energia. Os termos ‘maiores’, ‘menores’, ‘mais’ e ‘menos’ são relativos às distâncias envolvidas no arranjo e às frequências que se deseja analisar.

O segundo ponto a ser destacado é a dependência angular das equações 3.3 e 3.13-3.15. Para $\theta = 0$, não se observará o efeito da diretividade do arranjo (ou este efeito será perceptível quando $f \rightarrow \infty$). Neste caso, apenas o *notch* devido ao *ghost* estará presente, como dado pela equação 3.3. Quando $\theta \rightarrow \pm 90^\circ$ tem-se os *notches* devidos ao arranjo, como previsto pelas equações 3.13-3.15; já em relação ao *ghost*, $t_f \rightarrow 0$ e $f_n \rightarrow \infty$ na equação 3.3 e a senóide que representa a resposta impulsiva se aproximará de 0, indicando que os sinais do pulso primário e do *ghost* se cancelarão, como esperado. Estes efeitos são ilustrados nas Figuras 3.25 e 3.26, que mostram a diretividade do arranjo da Figura 3.24.

Antes de analisar os padrões de diretividade, é válido notar que existem duas distâncias básicas neste arranjo: (i) a separação entre subarranjos, 8 m, e (ii) a separação entre os *air guns* dentro de um subarranjo, 2 ou 3 m. Para todos os efeitos, no *far field* podemos considerar um subarranjo como sendo uma fonte.

Na Figura 3.25, é mostrado o padrão de diretividade no plano IL. A profundidade do arranjo é de 8 m, o que explica as duas regiões curvas de baixas amplitudes associadas ao *ghost* que, para $\theta = 0^\circ$, as duas primeiras frequências de *notch* situam-se em $f_{n1} = 93,75$ Hz e $f_{n2} = 187,5$ Hz, como indicado na figura. Percebe-se que as distâncias que separam os *air guns* no plano IL, 2 ou 3 m, são pequenas o suficiente para que não seja notado um *forte* padrão de diretividade devido ao arranjo, apesar de existir uma região de baixa amplitude para ângulos negativos, próximo de 80 Hz para $\theta \approx -90^\circ$, como indicado na figura, que é um efeito mais *suave* do padrão de diretividade criado pelos *air guns* nos 7 *gun positions* do subarranjo em questão²¹. Vê-se

²¹Como a separação entre *air guns* não é constante dentro de um subarranjo, variando entre 2 e 3 m, não é possível aplicar a fórmula 3.15, mas é possível entender o porquê do *notch* aparecer nesta região.

3. Fonte Sísmica Marítima

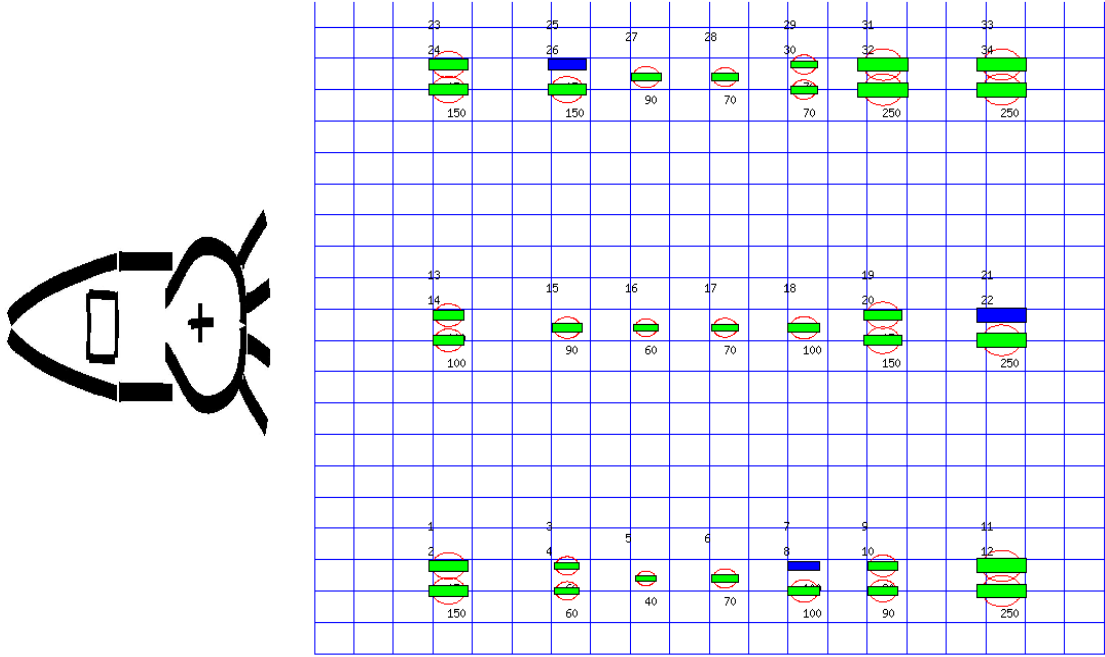


Figura 3.24: Ilustração de um arranjo da empresa PGS. Os retângulos indicam os *air guns*, onde verde é um *air gun* ativo e azul indica que este está desligado. Os círculos vermelhos indicam o raio máximo aproximado da bolha. Os números acima de cada *air gun* são apenas índices de identificação e os valores embaixo são os volumes, em cu.in. O volume total é de 4.130 cu.in. A malha é de 1 m x 1 m.

ainda que as amplitudes não são simétricas em relação ao eixo vertical $\theta = 0^\circ$, o que reflete o fato do arranjo não ser simétrico em relação ao eixo IL, como pode ser visto na Figura 3.24. É observado, para $\theta = -90^\circ$, que a amplitude para todas as frequências é desprezível (cor violeta), o que é atribuído ao *ghost*, como já discutido no parágrafo anterior. O mesmo deveria ocorrer para $\theta = 90^\circ$ e não é visto na figura, o que é uma limitação do *software*.

A Figura 3.26 mostra o padrão no plano XL, $\phi = 90^\circ$, onde a palavra “Port” indica o lado esquerdo do navio. Veja que o efeito do *ghost*, indicado na figura, é o mesmo que no plano IL, como era de se esperar. As duas regiões de baixa amplitude são atribuídas ao padrão de diretividade do arranjo, conforme visto na figura. Como a separação entre subarranjos é de 8 m, usando a equação 3.14 para $\theta = 90^\circ$ e $n = 0$, obtém-se as frequências $f_{n,a1} = 62,5$ Hz e $f_{n,a2} = 125$ Hz, como indicado na figura. É percebido também que não há *notch* para $\theta = 0^\circ$, pois verticalmente abaixo das fontes os pulsos de cada subarranjo chegam em fase no *far field*, não ocorrendo, portanto,

3. Fonte Sísmica Marítima

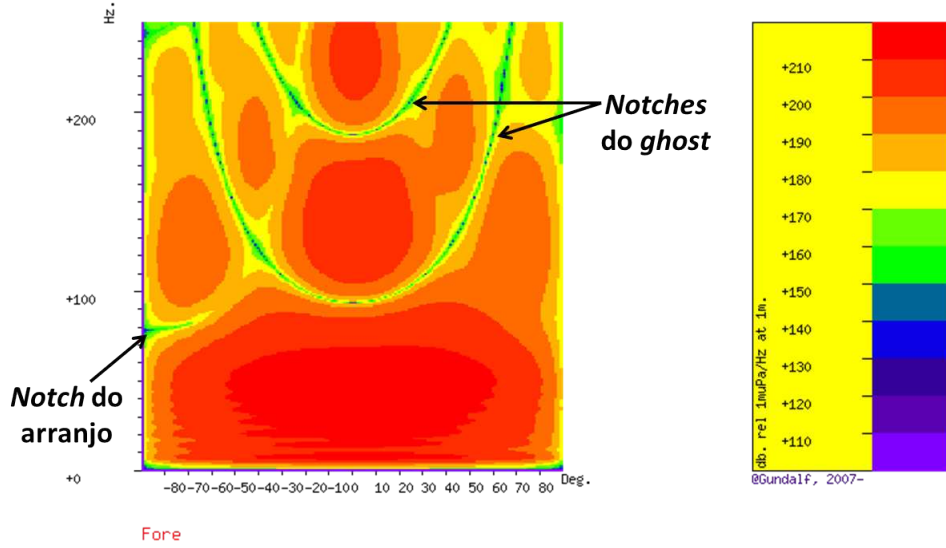


Figura 3.25: Espectro de amplitude para o arranjo da Figura 3.24, mostrando o padrão de diretividade do arranjo. O plano azimutal escolhido foi o IL.

interferência destrutiva.

Tal como o *notch* associado ao *ghost*, também o *notch* devido ao arranjo prejudica o dado sísmico. No entanto, tem-se chamado pouco a atenção deste *notch* na comunidade geofísica. Um dos fatores para isto pode ser atribuído à grande maioria dos processamentos de dados sísmicos serem realizados apenas com a assinatura *far field* com $\theta = 90^\circ$. Isto, por sua vez, pode ser atribuído aos métodos não convencionais ou mesmo privados que certas empresas detêm de calcular o *far field* para todos os ângulos. A patente US 4476550²² de A. Ziolkowski e P. Stoffa intitulada “*Determination of far field signatures, for instance of seismic sources*” não está mais protegida, o que pode ser um ponto positivo para a obtenção da assinatura *far field*, tiro a tiro, para todos os ângulos. Talvez a pouca oferta de assinaturas *far field* para ângulos diversos seja atribuída ao pouco conhecimento e importância que as empresas de petróleo dão a este aspecto. Por fim, os levantamentos convencionais têm uma natureza *narrow azimuth*, que contempla poucos azimutes. A crescente disponibilização de tecnologias não convencionais que adquirem dados com uma maior riqueza azimutal, como Coil e Dual Coil (WesternGeco ©), *wide azimuth*, levantamentos com receptores no fundo

²²Os detalhes técnicos desta patente, brevemente comentados na Seção 3.5, podem ser obtidos na referência [36].

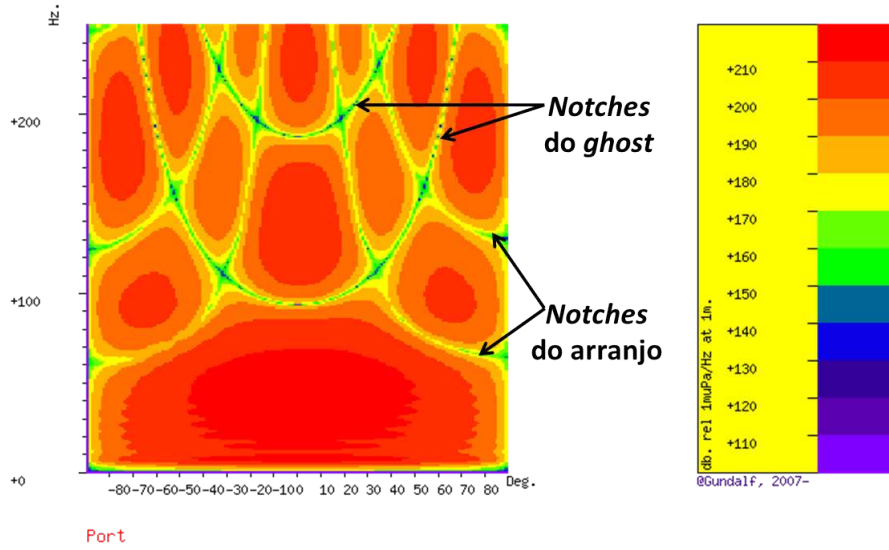


Figura 3.26: O mesmo que na Figura 3.25, mas para o plano XL.

marinho, podem escancarar a necessidade do melhor conhecimento do pulso sísmico para o processamento de dados e mesmo a interpretação. Este trabalho também visa alertar a comunidade geofísica para este fato.

De qualquer forma, a solução que será proposta neste trabalho, apresentada no Capítulo 5, minimiza o efeito do *notch* do arranjo, o que é um potencial ganho para o dado sísmico e todo o processo que descende e/ou depende dele.

3.5 Interação entre *air guns*

Até a década de 80, os arranjos utilizados possuíam *air guns* cujas separações²³ entre si eram tais que a assinatura no *far field* poderia ser calculada pela soma das assinaturas individuais dos *air guns* no arranjo. Este arranjo recebia o nome de *arranjo linear*. A partir de então, começaram a empregar arranjos com *air guns* mais próximos. Se o comprimento de onda de interesse sísmico é da ordem de grandeza ou menor que as distâncias envolvidas nestes arranjos²⁴, o pulso emitido por cada *air gun* no arranjo sente o efeito dos pulsos dos outros *air guns* e, então, diz-se que o arranjo é interagente (*interacting arrays*). Um arranjo pode interagir mais ou menos, a depender

²³As dimensões de um arranjo chegavam a mais de 100 m.

²⁴Note que para $f = 100$ Hz e usando $v = 1.500$ m/s tem-se que $\lambda = 15$ m, que é da ordem das dimensões do arranjo mostradas na Figura 3.17.

3. Fonte Sísmica Marítima

da separação entre seus *air guns* [50]. Esta interação é chamada de interação de primeira ordem, ou interação linear, pois os *air guns* estão separados numa distância $\gtrsim 2$ m. Abaixo desta distância, a interação é não linear, podendo ocorrer o fenômeno da coalescência [30], como será visto na Seção 3.5.1.

Num arranjo que interage, a pressão hidrostática ambiente no entorno de um dado *air gun* que o compõe não é mais constante e varia devido à detonação dos outros *air guns* no arranjo. Este efeito ganha mais importância pois a assinatura de um *air gun* não é pontual (por exemplo, atendo-se à Figura 3.13(a), até cessar o efeito do *ghost* da primeira bolha é decorrido aproximadamente entre 130 e 150 ms, o que representa, no mar, uma distância entre 195 e 225 m, o que excede em muito as dimensões usuais de um arranjo). Desta forma, as características da bolha emitida por um *air gun* agora não é mais modulada pela pressão hidrostática, como vimos na Seção 3.1.1. O trabalho da referência [36] detalha o efeito da interação entre *air guns* e propõe uma solução para calcular assinatura *far field* de cada tiro dado em campo. Para tanto, os autores do trabalho não empregam um hidrofone no *far field*, mas sim registram o *near field* em cada *gun position* e a partir destes registros calculam assinaturas auxiliares não físicas (chamadas de *notionals*), que podem ser somadas linearmente para a obtenção do *far field*, tal como ocorrem com as assinaturas de cada *air gun* no caso de um arranjo não interagente.

Como comentado na Seção 3.4, os efeitos da diretividade de um arranjo e da interação entre os *air guns* que o compõem, são complementares, sendo mais ou menos efetivas a depender das distâncias entre os elementos do arranjo. Ambas atuam no sentido de conservar a energia. Na regime da interação linear, a pressão ambiente no entorno de um *air gun* pode ser maior ou menor do que a pressão hidrostática, mas na média, a pressão será maior [33]. Isto significa que para manter a mesma pressão emitida pelo *air gun* (*driving pressure*, p_d) quando este é detonado num ambiente sem interação, é necessário que mais energia seja injetada pelo *air gun*, o que requeriria uma maior pressão do compressor e/ou volume do *air gun*, o que nem sempre ou quase nunca é disponível. Pelo que já foi visto neste Capítulo, um arranjo tem separações entre subarranjos (que geralmente é entre 6 e 10 m) e entre os *air guns* dentro de um

3. Fonte Sísmica Marítima

subarranjo (que é entre 2 e 3 m). Como será visto no Capítulo 5, a proposta de fonte apresentada neste trabalho remove o efeito da interação entre subarranjos, permitindo que mais energia seja entregue à bolha de um determinado *air gun*. Entretanto, vale notar que a amplitude é apenas fracamente reduzida ($< 10\%$) por conta da interação, seja no regime onde esta é linear seja no regime não linear, como aponta os experimentos do trabalho da referência [50].

3.5.1 *Clusters de air guns*

A partir do final da década de 80, os arranjos, além de diminuir suas dimensões, passaram a ser formados por *clusters* de *air guns*, onde a separação (podendo ser horizontal ou vertical) entre os *air guns* numa dada posição num subarranjo era da ordem ou menor que 1 m, no regime da interação não linear. A Figura 3.27 mostra duas configurações de *clusters*, com dois e três *air guns*.



Figura 3.27: (a) *Cluster* composto por 2 *air guns* (2-gun cluster) [48]. (b) *Cluster* composto por 3 *air guns* (3-gun cluster) [49].

Quando dois ou mais *air guns* são detonados muito próximos ($\lesssim 0,5$ m), as bolhas podem estar em contato físico e parcialmente coalescerem, tornando-se uma única bolha. Um resultado da coalescência das bolhas é que a bolha resultante passa a oscilar com um período igual ao que seria obtido por um único *air gun* com volume igual ao volume total dos *air guns* no *cluster*. Este fenômeno recebe o nome de *frequency locking*. O trabalho da referência [37] mostra que tal fenômeno também ocorre mesmo quando não existe a coalescência, o que ocorre quando a separação é entre 0,8 e 1,0 m, que são as distâncias comumente usadas num *cluster*.

3. Fonte Sísmica Marítima

Algumas suposições podem ser feitas para mostrar porque um *cluster* é superior a um *air gun* de mesmo volume total. Em termos gerais, para efeitos de explicação, podemos considerar que a interação não afeta a amplitude dos *air guns* em um *cluster*, como já comentado. Dado um volume total disponível V , podemos considerar um *cluster* de n *air guns* cada um com volume V/n . Ao aplicar a equação 3.12, tem-se que a amplitude do pulso primário emitido pelo *cluster* será:

$$A_{cluster} = C_2 n \left(\frac{V}{n} \right)^{1/3}, \quad (3.16)$$

ao passo que a amplitude do pulso primário do único *air gun* será dado pela equação 3.12:

$$A_{1\ air\ gun} = C_2 V^{1/3}. \quad (3.17)$$

Assim, dividindo a mesma quantidade de ar em um *cluster* de n *air guns*, é possível aumentar a amplitude do pulso primário por um fator de $n^{2/3}$. Apesar deste fato, muitas empresas de aquisição ainda não apresentam arranjos de fontes com *clusters*, podendo isto ser atribuído a questões operacionais e de estabilidade dos *air guns* em proximidade.

Com isto em mente, a Figura 3.28 mostra três modelagens no *far field*: (i) um único *air gun* de 125 cu.in. foi modelado e seu resultado multiplicado por 2, imitando o que seria obtido no caso de 2 *air guns* de 125 cu.in. não interagentes (curva azul); (ii) *cluster* composto por 2 *air guns* de 125 cu.in. separados por 1 m (curva marrom); (iii) um único *air gun* de volume 250 cu.in (curva verde). Percebe-se, comparando os casos (i) e (ii), que a amplitude do pulso primário pouco diminuiu, mas no entanto o período da bolha do *cluster* é maior e igual ao do único *air gun* de mesmo volume total, caso (iii). Atendo-se aos casos (ii) e (iii), percebe-se que a amplitude do pulso primário é maior no *cluster* e o pulso da bolha é menor também no *cluster*, indicando que neste caso tanto o pico a pico ($P-P$) e a razão pico-bolha (PBR) são maiores no caso do *cluster*, o que mostra mais uma vantagem do seu uso.

A Figura 3.29 mostra medidas no *near field* para um *cluster* de 3 *air guns* de

3. Fonte Sísmica Marítima

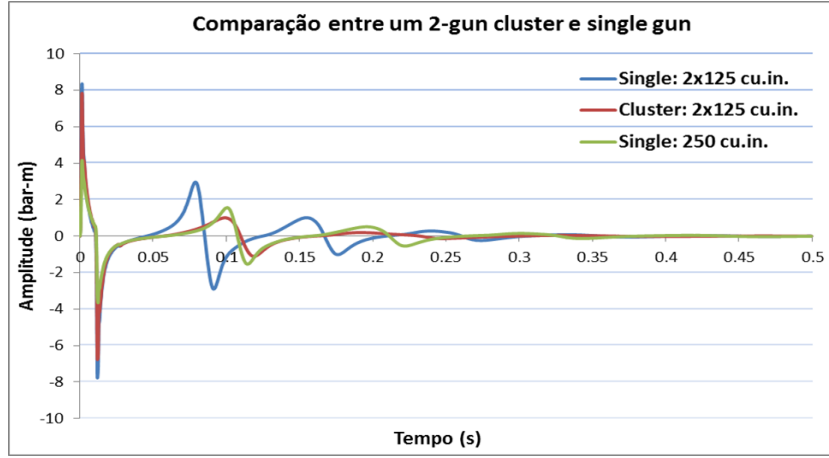


Figura 3.28: Assinatura modelada no *far field* para três casos: (i) um único *air gun* de 125 cu.in. foi modelado e seu resultado foi multiplicado por 2, imitando o que seria obtido no caso de 2 *air guns* de 125 cu.in. não interagentes (curva azul); (ii) *cluster* composto por 2 *air guns* de 125 cu.in. separados por 1 m (curva marrom); (iii) um único *air gun* de volume 250 cu.in. (curva verde). Em todos os casos a pressão foi 2.000 psi e a profundidade de 8 m.

200 cu.in cada e para um único *air gun* de 600 cu.in. Como esperado, o período de ambos é igual, mas o fato do pulso primário no *cluster* ter maior amplitude temporal faz com que o espectro de amplitudes seja maior em todas as frequências quando comparado ao de um único *air gun*, como mostra a parte de baixo da figura. Um fato interessante estudado no trabalho da referência [51] é a extensão do conceito de *cluster* para *hypercluster*, em que os autores usam o fenômeno de *frequency locking* para todo um subarranjo e não só em determinadas posições do subarranjo. Assim, a bolha resultante tem o mesmo período de um super *air gun* de volume igual ao total do subarranjo, o que torna a frequência característica f_c menor, disponibilizando mais energia nas baixas frequências. Isto poderia ser obtido por um único grande *air gun* de volume igual ao total do subarranjo, no entanto acarretaria problemas nas frequências médias, devido às grandes amplitudes das bolhas secundárias (não atenuadas por se tratar de um único *air gun* de grande volume), o que causaria uma espécie de *notch* no espectro de amplitudes, além de questões operacionais relativas a um *air gun* de volume muito alto.

Apesar de todas os aspectos e considerações apresentados neste capítulo, fontes marítimas compostas por *air guns* ainda são muito usadas, devendo-se isto principalmente às suas características de repetibilidade entre os tiros e à sua estabilidade

3. Fonte Sísmica Marítima

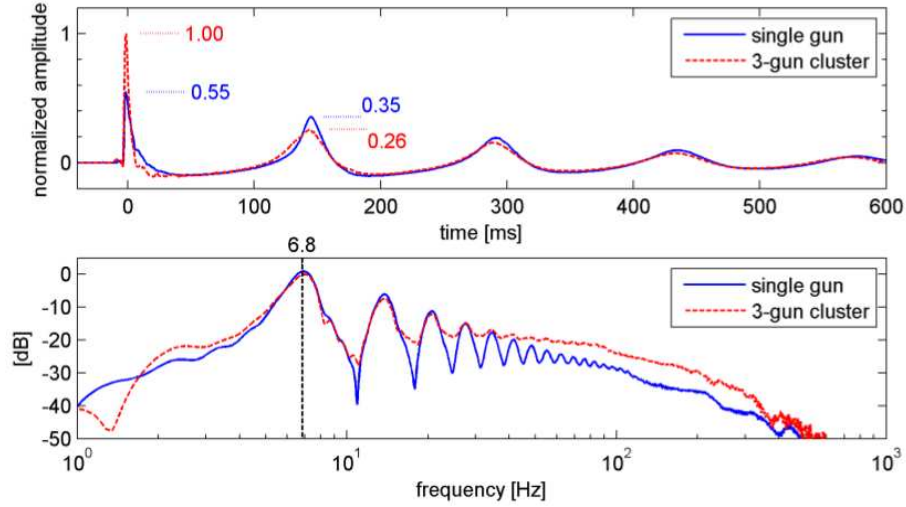


Figura 3.29: Medidas de assinatura no *near field* de um *air gun* de 600 cu.in. e um *cluster* de 3 *air guns* de 200 cu.in cada. Ambos foram detonados com 2.000 psi e a 6 m de profundidade. Note que a escala do eixo de frequência está em logaritmo. Os eixos verticais indicam as amplitudes normalizadas [51].

operacional. Pesquisas estão em andamento no que concerne a outros tipos de fonte, como vibradores marinhos, que possam emitir baixas frequências com maiores amplitudes que o *air gun* o faz. Desafios operacionais ainda têm que ser superados e propostas de fontes com *air guns* ainda são a solução mais prática.

Capítulo 4

Conceitos de Fontes Dispersas e Fontes Multinível

Este Capítulo visa à introdução dos conceitos de fontes dispersas (*Dispersed Source Arrays* - DSA) e fontes multinível (*Multi Level Source* - MLS). O primeiro tema foi introduzido na comunidade geofísica por A. J. Berkhout em 2012 [10], e almeja uma robotização da aquisição sísmica, com fontes sísmicas de diferentes características. O segundo tema é uma das soluções apresentadas para o problema dos *notches* do *ghost*¹, onde cada subarranjo é disposto em mais de uma profundidade ou nível, e não mais todos numa mesma profundidade [52].

4.1 Fontes dispersas

Para introduzir o conceito de fontes dispersas é interessante falar sobre como é feita a aquisição sísmica tradicional e compará-la com a aquisição com fontes *blended* ou misturadas (*blended acquisition*). No *survey design* de uma aquisição convencional, é predefinido o intervalo entre dois disparos sucessivos (intervalo de ponto de tiro - IPT) de tal forma que um novo disparo só poderá ser efetuado após o tiro anterior ter sido registrado, definindo assim o chamado tempo de registro (*recording length*), impondo assim uma duração total em tempo para a aquisição² (*survey time*). Isto

¹Estas soluções não atenuam o primeiro *notch* em 0 Hz ($n = 0$ na equação 3.3), mas sim do segundo em diante.

²Em linhas gerais, este tempo seria o número de disparos vezes o tempo de um único registro

4. Conceitos de Fontes Dispersas e Fontes Multinível

é um limitante operacional para a aquisição sísmica. Note que neste caso apenas um navio fonte é necessário para realizar a aquisição. Numa aquisição *blended*, várias fontes ou *source unit* - SU - (neste caso o termo *fontes* refere-se a mais de um navio fonte atuando em conjunto numa dada aquisição) detonam com atrasos relativos entre si, sem preocupação em respeitar o tempo de registro, que no caso de uma aquisição *blended* perde o seu significado. Desta forma, uma aquisição *blended* pode ser tal que realize muito mais disparos durante o mesmo tempo total da aquisição (foco na qualidade da imagem sísmica³), ou que respeite os pontos de tiro predefinidos e economize tempo (foco na duração da aquisição). Estas situações são ilustradas na Figura 4.1.

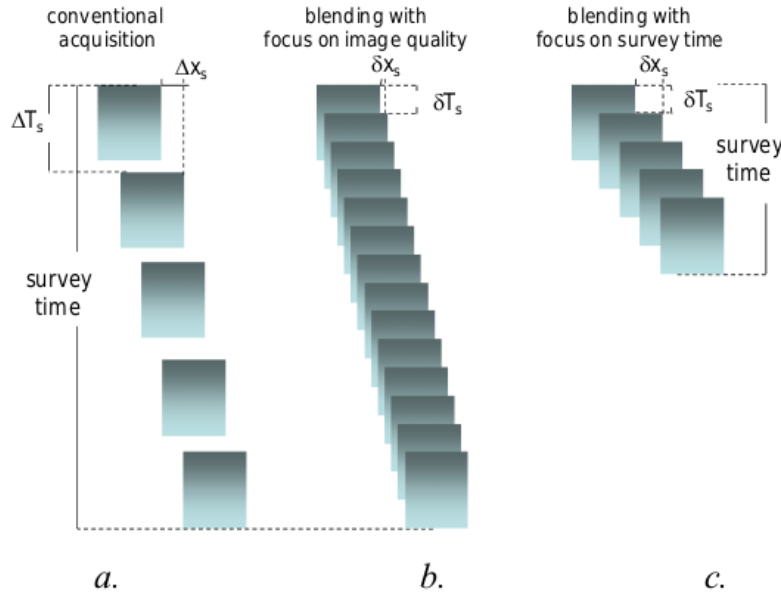


Figura 4.1: Ilustração indicando como se dá a aquisição convencional - sem *blending*! - (à esquerda); aquisição *blended* com foco na qualidade (ao centro), pois a duração do levantamento (*survey time*) é a mesma, mas aumentou-se o número de tiros (mais energia emitida e registrada); aquisição *blended* com foco na duração da aquisição (à direita), pois mantém-se o número de tiros e reduz-se a duração da aquisição. Modificado de [53].

No entanto, as fontes usadas numa aquisição *blended* eram idênticas⁴, no que pode ser chamado de *blending homogêneo*. No caso marítimo, pode-se pensar num mesmo arranjo de fontes usado nos diferentes navios. No entanto, em 2012 A. J.

³Uma prerrogativa para uma boa imagem sísmica é que o objetivo sísmico seja devidamente *iluminado*, com o sentido de *iluminação* acústica, pelo campo de ondas gerado.

⁴A título de informação vale ressaltar que aquisições deste tipo estão ganhando cada vez mais força, devido à compreensão adquirida principalmente no que se refere às técnicas de processamento.

4. Conceitos de Fontes Dispersas e Fontes Multinível

Berkhout lança o conceito de *blending não homogêneo*, significando que numa aquisição deste tipo cada fonte teria suas próprias características. A principal alegação era de que as fontes tradicionais, seja em terra ou mar, não são eficientes em emitir todo o espectro de frequências de forma satisfatória; pode-se pensar que um arranjo de *air guns*, ao priorizar por exemplo a região das baixas frequência (escolhendo-se uma dada profundidade), não irá emitir satisfatoriamente as médias a altas frequências; um vibrador terrestre que é desenvolvido para emitir altas frequências não emite as baixas com a mesma eficiência. Há, então, ponderações tanto do ponto de vista da emissão do campo de ondas quanto do ponto de vista de engenharia, pois um *air gun* e um vibrador terrestre têm características de frequência determinadas.

Desta forma, comparando-se com uma aquisição convencional, por que não configurar uma aquisição *blended* com diferentes SU's, cada qual com suas características? Em vez de usar *uma fonte coerente*⁵ e *local*⁶, *broadband*⁷ e *complexa*⁸ por que não usar *diversas fontes incoerentes espalhadas* com características de *banda limitada* ou *narrowband* e *menos complexas*? Arranjos de fontes neste segundo cenário seriam chamados de *dispersed source arrays* - DSA. A exigência que se é feita para as fontes dispersas é que o campo de ondas resultante em subsuperfície tenha as características espectrais desejadas.

Cada SU pode estar a uma profundidade diferente, escolhida a partir da banda de frequência que esta deve emitir. Para tanto, estima-se a profundidade d_i de tal forma que a frequência do 2º *notch* do *ghost* (usando-se $\theta = 0^\circ$ e $n = 1$ na equação 3.3) coincida com o dobro da *frequência central* f_m que a SU está comprometida, ou seja:

$$d_i = \frac{v}{4f_m} . \quad (4.1)$$

De fato, esta ideia de multibandas espaçadas é emprestada dos sistemas de áudio

⁵Todos os *air guns* num arranjo detonam simultaneamente.

⁶Na aquisição convencional, apenas um arranjo é usado como fonte de ondas.

⁷Aqui o termo *broadband* refere-se ao fato de a única fonte ser a responsável por emitir todo o espectro de frequência, não referindo-se, portanto, como feito até agora, à qualidade deste espectro.

⁸Tanto do ponto de vista da emissão do campo de ondas - relembre os aspectos associados a um arranjo, como diretividade e interação - como da engenharia - os *air guns* emitem toda a banda útil de frequências, o que pode não ser o mais indicado, além de ainda haver complicações referentes à manutenção e estabilidade de um arranjo.

4. Conceitos de Fontes Dispersas e Fontes Multinível

moderno *multiple-driver*, como ilustra a Figura 4.2. Os sistemas de áudio antigos eram compostos por apenas uma fonte que emitia todo o conteúdo de frequência, modernizando-se para diferentes bandas localizadas e depois para diferentes bandas distribuídas, cumprindo a exigência de distribuir o som de acordo com as características de frequências.



Figura 4.2: Ilustração da aplicação do conceito de “multibandas” de frequência no sistema de áudio moderno [54].

Um grande impulso a esta ideia é o fato do crescente número de receptores disponíveis que, segundo a lei de Moore para a aquisição sísmica, é multiplicado por 10 a cada 10 anos. Isto aumentaria consideravelmente a energia refletida registrada, melhorando a qualidade da imagem e/ou inversão sísmica. Neste cenário, com grande disponibilidade também de navios fonte e vibradores terrestres, é lançado o conceito de robotização da aquisição [55]. A Figura 4.3 ilustra vários navios não tripulados com suas particulares características de fonte *narrowband*, cada um rebocando um cabo de receptores. Com a experiência atual, é difícil imaginar um cenário como este!

Uma aquisição *blended* traz à tona, também, questões e esforços no processamento dos dados que, tal como a aquisição, passa a ser não convencional. Para tanto, pode-se requerer que os registros de campo sejam separados após a aquisição, processo conhecido como *deblending*, e a partir daí o dado separado seguiria o fluxo convencional de processamento. Há também a possibilidade de não separar os registros para obter as propriedades físicas do meio. No entanto, se se deseja separar os campos, é necessário que haja um certo grau de ortogonalidade⁹ entre as SU's usadas. Os autores da referência [56] alegam que para que a separação dos tiros *blended* seja efetiva, a separação

⁹Este termo deve ser entendido aqui não no sentido estrito, mas sim indicando dissimilaridade entre as diferentes SU's.

4. Conceitos de Fontes Dispersas e Fontes Multinível



Figura 4.3: Alguns navios fonte não tripulados rebocando cada um uma fonte *narrowband* e um cabo, no conceito de fontes dispersas - DSA, cumprindo espaço e temporalmente os requisitos necessários para corretamente iluminar a subsuperfície. A amostragem espacial das fontes e as profundidades destas dependem da característica de frequência que se deseja com cada fonte [55].

espacial e temporal entre as fontes pode render bons resultados. Na proposta DSA, um ingrediente que aumenta a ortogonalidade é o fato de cada SU estar comprometida com uma banda de frequência. Mas, como considerado na referência [53], é menos complexo separar campo de ondas que foram registrados do que interpolar informações para locais que estas não foram registradas, como é o caso para se evitar o problema do *alias* espacial como visto na Seção 2.3.2. Este é ainda um campo de pesquisa em aberto e cada área geológica, com suas particularidades, deve ser estudada à parte para se entender a melhor forma da separação dos campos de onda.

4.1.1 Modelagem usando fontes dispersas

A título de ilustração, a Figura 4.4 mostra 4 bandas de frequência¹⁰ representadas por cores, *ultralow* (2-6 Hz), *low* (5-15 Hz), *mid* (10-30 Hz) e *high frequencies* (20-60 Hz). A soma de todas estas bandas resulta na curva preta pontilhada, representando o espectro de amplitudes total emitido pelo conjunto de 4 SU's. À direita na figura temos o pulso de fase zero que equivale ao espectro da curva pontilhada, que se

¹⁰Na modelagem geralmente trabalha-se com fontes sintéticas, ou seja, com pulsos sísmicos com forma matemática determinada e que não possuem relação alguma com o pulso gerado pela fonte real, como visto no Capítulo 3. É usada o mesmo pulso para todos os ângulos e o efeito diretivo é devido exclusivamente ao *ghost*.

4. Conceitos de Fontes Dispersas e Fontes Multinível

aproxima do pulso ideal (impulso) para o método sísmico. A Figura 4.5 mostra a ação *isolada* destas bandas de frequência num modelo geológico sintético com uma camada plana de velocidade e densidade constantes, não informados, e registrados numa profundidade também constante e não informada, gerando o sismograma sintético (curvas $x - t$) equivalente a cada banda.

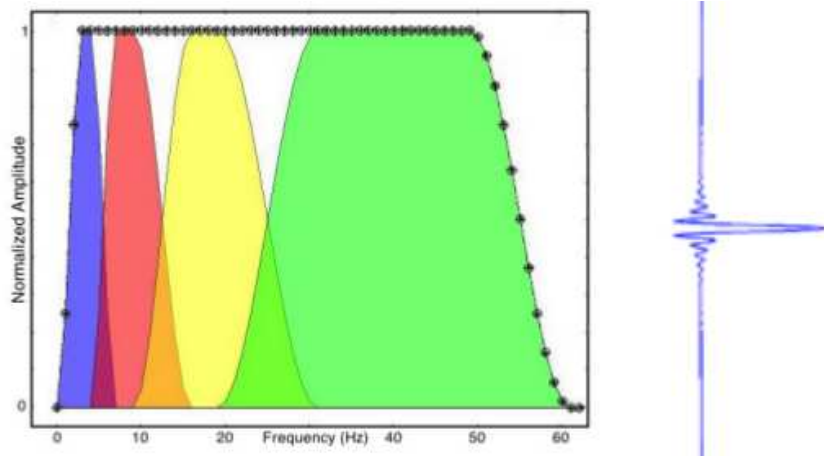


Figura 4.4: Esquerda: ilustração de 4 bandas de frequência (*ultralow, low, mid, high frequencies*), representadas por quatro cores. A soma destas 4 bandas resulta na curva delineada pelos pontos [57]. Direita: pulso de fase zero equivalente ao espectro da curva pontilhada à direita [58]. Esta seria a forma do pulso ideal de qualquer aquisição sísmica!

Para testar estas ideias, a referência [10] também apresenta resultados de uma modelagem sintética com todas as SU's atuando em conjunto. Para tanto, valeu-se de um modelo simples com velocidade de 1.500 m/s e densidade constante não informada. Fez-se disparos para 3 tipos de fontes, com as bandas 5-15 Hz (*low* - L), 10-30 Hz (*mid* - M) e 25-75 Hz (*high frequencies* - H). Utilizando-se a equação 2.9, mas agora considerando Δx como a separação entre tiros¹¹, para estimar os IPT's, e usando a f_{max} de cada uma das 3 bandas, encontra-se uma relação 1:2:5 (L:M:H) entre os IPT's das SU's, otimizando, assim, seus valores para cada SU de acordo com sua banda. Desta forma, para cada tiro da fonte de baixa frequência, precisa-se de 2 para a fonte de média e de 5 para a fonte de altas frequências, o que pode ser entendido através dos conceitos de amostragem vistos na Seção 2.3. Vê-se então que ao se usar uma única

¹¹Em aquisições convencionais, o IPT é constante para todos os tiros. Isto é um limitante à frequência corretamente amostrada quando se usa, por exemplo, o domínio dos receptores, em que os traços são espaçados pelo IPT.

4. Conceitos de Fontes Dispersas e Fontes Multinível

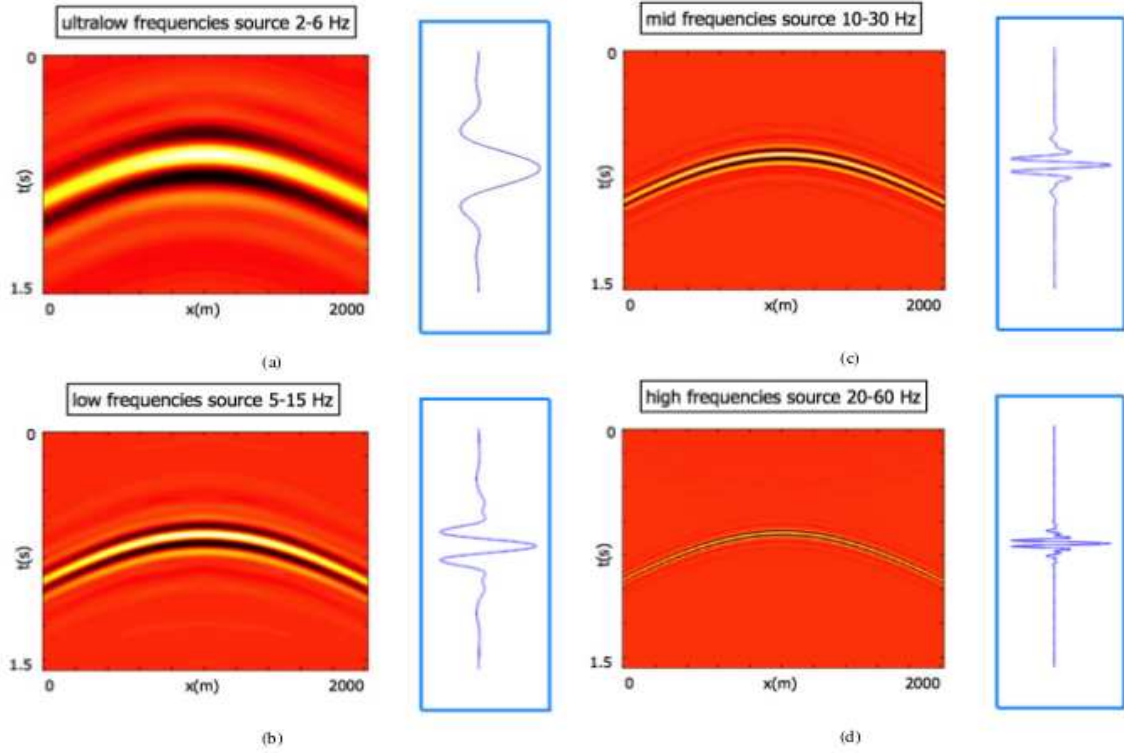


Figura 4.5: Comparação dos pulsos sísmicos (direita de cada figura) que representam as bandas de frequência escolhidas, Figura 4.4 com os respectivos sismogramas sintéticos gerados num meio homogêneo devido à propagação destes pulsos (esquerda) [57].

fonte *broadband* não há otimização da energia emitida, pois o IPT é único, o que é mais uma vantagem do método DSA perante a aquisição convencional.

Ao longo de uma linha de 6 km foram disparados, de forma incoerente, 96 tiros: 12, 24 e 60, seguindo a relação 1:2:5 (L:M:H). O campo de ondas resultante dos disparos, $P_j^+(z_m, z_0)$, foi medido a uma profundidade $z_m = 1.000$ m. A figura 4.6 mostra o resultado do sismograma sintético obtido numa tal configuração quando todas as fontes são disparadas à $z_0 = 7,5$ m de profundidade, o que implica uma frequência de *notch* $f_n = 100$ Hz, devido ao *ghost*¹². Por meio da inspeção visual do sismograma é possível associar os registros à banda de frequências que o originou. Um traço numa posição k , $P_{kj}^+(z_m, z_0)$, é mostrado à direita. Embaixo à esquerda vê-se o espectro de amplitudes médio do campo incidente $P_j^+(z_m, z_0)$. Nota-se uma deficiência das baixas-médias frequências, justamente em decorrência de a profundidade escolhida ter sido a

¹²Apenas *notches* atribuídos ao *ghost* estão presentes em modelagens, devido ao caráter isotrópico da emissão da fontes.

4. Conceitos de Fontes Dispersas e Fontes Multinível

mesma para todas as SU's.

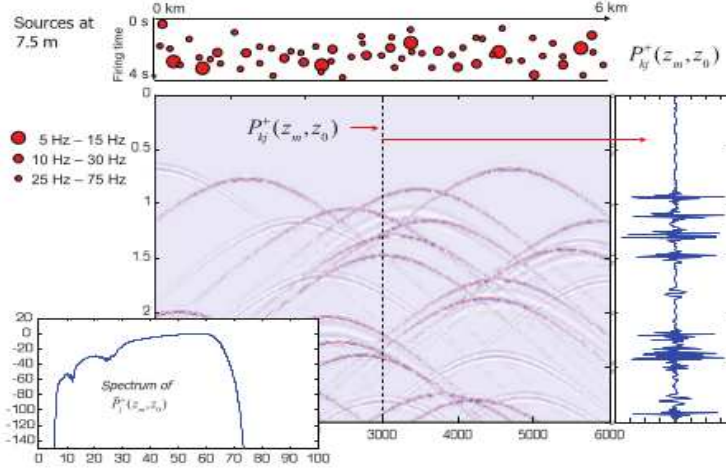


Figura 4.6: A figura central mostra o campo de onda registrado à 1.000 m de profundidade num modelo sintético. Foi escolhido 3 bandas de frequência (5-15, 10-30 e 25-75 Hz) para os pulsos, cada uma representada por uma bola vermelha de raio diferente. A profundidade de cada fonte é 7,5 m. À direita é mostrado um traço, $P_{kj}^+(z_m, z_0)$, e embaixo à esquerda o espectro de amplitudes médio do campo incidente $P_j^+(z_m, z_0)$. Modificado de [10].

Uma segunda modelagem foi feita, mostrada na Figura 4.7. No entanto a profundidade de cada banda foi escolhida seguindo-se a equação 4.1, obtendo-se 37,5, 18,75 e 7,5 m para as bandas *low*, *mid* e *high* respectivamente. Como visto, desta forma o *notch* do *ghost*, para cada banda, será em 20, 40 e 100 Hz. Analisando-se o espectro de amplitudes médio do campo incidente $P_j^+(z_m, z_0)$, percebe-se que não há a perda na região de baixa-médias frequências como ocorrido no caso anterior, mostrando que as fontes dispersas podem usar o *ghost* a seu favor. Apesar de nenhuma das fontes produzir a banda de frequência desejada, o espectro de amplitudes total do campo incidente no objetivo à profundidade z_m satisfaz tal requisito.

Uma aquisição baseada no método DSA pode, então, vir a ser uma solução às aquisições tradicionais, com ganhos do ponto de vista da otimização da energia emitida, com o campo de onda sendo gerado pelas múltiplas SU's, que fornecem, em seu conjunto, as características espectrais. De “local, *broadband* e complexa” pode-se obter soluções “não locais, *narrowband* e menos complexas”, por meio do *blending* não homogêneo e incoerente. É importante comentar que até o presente momento, até onde se sabe, nenhuma aquisição sísmica foi feita usando este conceito.

4. Conceitos de Fontes Dispersas e Fontes Multinível

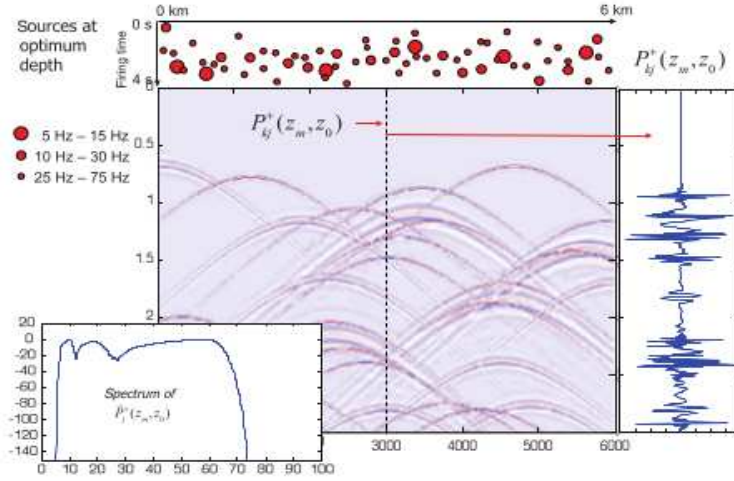


Figura 4.7: O mesmo que na Figura 4.6 mas com cada fonte na profundidade que otimiza a emissão do pulso. Modificado de [10].

4.2 Fontes multinível

Nesta Seção será introduzido o conceito de fontes multinível ou *multi level source* - MLS. A motivação para o uso de fontes marítimas cujos subarranjos situam-se em diferentes profundidades reside na atenuação do efeito *ghost*, principalmente nas baixas e altas frequências. O trabalho pioneiro em MLS é o de Cambois *et al.*, indicado na referência [59], de 2009. Além de propor o uso desta técnica, o trabalho também apresenta os resultados de uma aquisição teste mostrando sua eficiência. Abaixo serão descritos os conceitos por trás das fontes MLS.

Como visto na Seção 3.2, a reflexão na superfície ar-água, do campo de ondas emitido por uma fonte marítima gera no espectro amplitudes do dado sísmico regiões de baixa frequências, os *notches* associados ao *ghost*. Considerando um arranjo composto por três subarranjos, como é de costume nas aquisições, pode-se dispor cada subarranjo a uma profundidade (ou nível) específica. Suponha que num instante t_1 qualquer apenas subarranjo 1, o mais raso, à profundidade z_1 , seja detonado. Considere ainda que o subarranjo 2 esteja a uma profundidade z_2 tal que $z_2 > z_1$, e que este seja detonado no instante t_2 em que o campo de onda descendente do subarranjo 1 atinja o nível 2, ou seja, $t_2 = t_1 + (z_2 - z_1)/v$, onde v é a velocidade da onda acústica na água. Se o mesmo for feito para o subarranjo 3 ao nível z_3 , tal que $z_3 > z_2$, tem-se que seu disparo será

4. Conceitos de Fontes Dispersas e Fontes Multinível

em $t_3 = t_2 + (z_3 - z_2)/v$. Repare que os instantes de tempo foram escolhidos de forma a gerar um campo descendente construtivo. No entanto o mesmo não ocorre com o campo de onda refletido na superfície água-ar ou *ghost*. Isto pode ser melhor entendido ao analisarmos a Figura 4.8. Nela são mostrados 3 subarranjos em perfil, ilustrando o campo de ondas a eles associados em quatro instantes. Na parte de cima tem-se um arranjo convencional e embaixo um arranjo multinível. As curvas cheias indicam o campo descendente e a pontilhada o campo do *ghost*. Veja que no caso convencional o *ghost* de cada subarranjo se reforça, o que não ocorre no MLS. Entretanto, o padrão de diretividade é alterado consideravelmente no MLS em relação ao convencional, como indica o último instante do caso MLS.

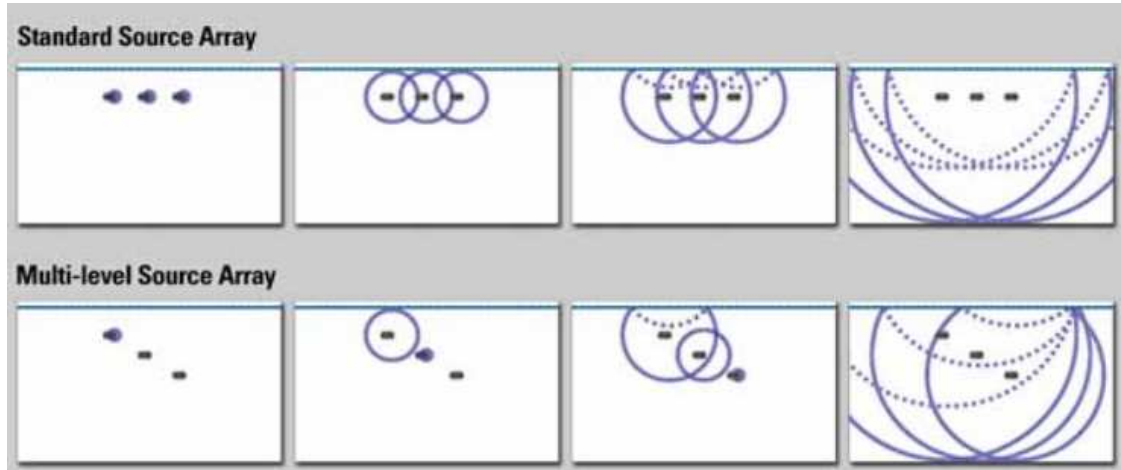


Figura 4.8: Ilustração de quatro instantes da detonação de um arranjo de *air guns* (tempo cresce para a direita). Em cima é visto um arranjo convencional, onde os 3 subarranjos atiram simultaneamente, gerando construtivamente o campo de onda descendente assim como o *ghost*. Embaixo é visto o mesmo mas para o caso de um arranjo em 3 níveis de profundidade - MLS. Devido ao atraso relativo na detonação dos arranjos, é possível gerar um campo de ondas descendente construtivo, mas agora os subarranjos têm *ghosts* atrasados entre si que não se reforçam [59].

A Figura 4.9 mostra como se comportam o sistema *ghost* nestas situações. À esquerda é ilustrado a resposta impulsiva do sistema, para o caso convencional em azul e o caso MLS em vermelho. O pulso primário está indicado à direita e as reflexões *ghost* à esquerda. No caso convencional, como já visto, todos os subarranjos detonam ao mesmo tempo e seus *ghosts* se somam, o que não ocorre com o MLS onde cada subarranjo dispara num dado instante, e por isso seus *ghosts* estão defasados. À direita

4. Conceitos de Fontes Dispersas e Fontes Multinível

são mostradas a resposta em frequência para uma fonte convencional à 7,5 m e uma MLS à 7,5 m, 15,0 m e 22,5 m. É possível ver claramente a atenuação do efeito *ghost* nas baixas frequências (1° *notch*) e altas (2° *notch* em diante), e a contrapartida redução nas frequências intermediárias¹³.

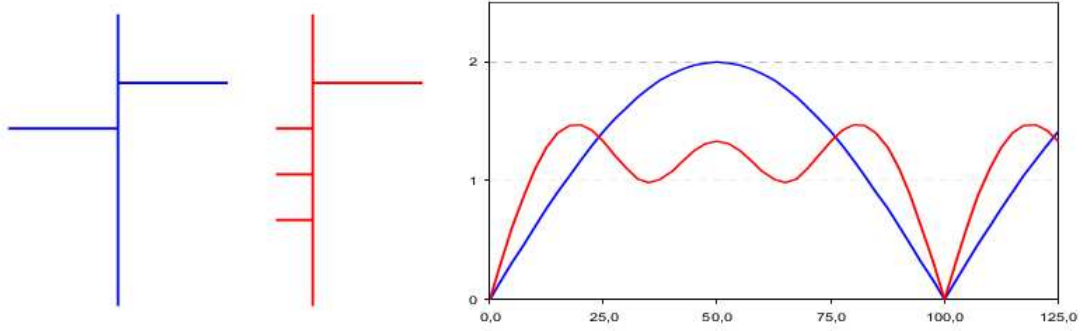


Figura 4.9: Esquerda: ilustração da resposta impulsiva do sistema *ghost* de ambas as configurações da figura 4.8 (arranjo convencional à 7,5 m e MLS à 7,5 m, 15,0 m e 22,5 m). Direita: resposta em frequência dos sistemas *ghost* [59].

A partir de agora será visto um estudo mais detalhado do conceito de fontes multinível, baseado no trabalho da referência [52], com algumas ilustrações da referência [60], dos mesmos autores. A Figura 4.10 ilustra 3 diferentes configurações, (a), (b) e (c), para os níveis de 3 subarranjos espaçados lateralmente de d , e a situação convencional em (d). Veja que eles estão a uma profundidade h , estando os subarranjos, no caso MLS, separados verticalmente por Δh_1 e Δh_2 .

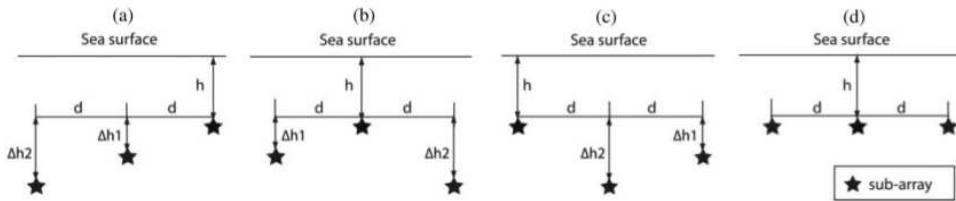


Figura 4.10: Possíveis configurações para uma fonte de 3 níveis (a, b e c) e uma fonte horizontal (d) [52].

Para avaliar a efetividade da atenuação do efeito do *ghost*, os autores propuseram um parâmetro para avaliar a performance de uma fonte MLS quando comparada com o caso ideal, sem *ghost*, o que é feito usando-se o coeficiente de reflexão água-ar igual a

¹³É importante relembrar que o *ghost* provoca interferência construtiva nas frequências entre dois *notches* sucessivos e sua atenuação leva a atenuação destas frequências.

4. Conceitos de Fontes Dispersas e Fontes Multinível

zero. Para tanto, é calculado o pulso $p(t)$ ($\mathcal{F}\{p(t)\} = P(\omega)$) no *far field*, com $\theta = 0^\circ$, para os casos ideal e MLS. O fator de performance P_{SE} é dado pelo erro quadrado (*squared error* - SE) entre os campos:

$$P_{SE} = \sum_{\omega} (P_{ideal}(\omega) - P_{MLS}(\omega))^2, \quad (4.2)$$

onde $\omega = 2\pi f$ indica que o fator de performance é calculado no domínio da frequência. Para efeitos de comparação usa-se também o fator normalizado $P_{NSE} = NSE = P_{SE}/\max(P_{SE})$. Logo, quanto menor o valor de NSE , mais a MLS escolhida cumpre o seu papel, que é o de atenuar o *ghost*.

Desejando-se saber a profundidade ideal para os níveis, o resultado apresentado na Figura 4.11 mostra o valor de NSE em função da profundidade do 2º nível para quando o 1º está à 6 m de profundidade (esquerda) e à 8 m (direita). Por conveniência, o 2º nível está sempre mais profundo que o 1º. Veja que quando o 2º nível coincide com o 1º, $NSE = 1$, como era de se esperar, pois não há atenuação do *ghost*. Nestes exemplos, a melhor profundidade para o 2º nível é 9 m, quando o 1º está à 6 m, e 10,5 m quando o 1º está à 8 m, conforme indicado na figura.

Mas outra pergunta surge: qual o número ideal de níveis? Para tanto, os autores calcularam o NSE em função do número de níveis, para 3 valores de h (os valores de Δh_i não foram informados). Os resultados são mostrados no gráfico à esquerda da Figura 4.12. Como indicado pelos autores do trabalho, acima de 3 a 4 níveis, não há uma redução significativa do NSE que justifique utilizar mais níveis. Cada subarranjo ocupa um nível, o que indica que n níveis implica em n subarranjos, a capacidade do navio é um limitante neste quesito, e 3 níveis (1 para cada subarranjo) é o adequado para a capacidade das frotas de navios sísmicos atuais, se se deseja manter a configuração *flip-flop*.

À direita da Figura 4.12 é mostrado uma tabela com os valores ótimos em metros (obtidos de forma análoga àqueles da Figura 4.11) para as profundidades de até 6 níveis, para quando o primeiro nível está entre 4 e 10 m. Estes valores serão usados para testar a proposta apresentada no Capítulo 5.

Para finalizar, é apresentado também um estudo acerca da influência do volume

4. Conceitos de Fontes Dispersas e Fontes Multinível

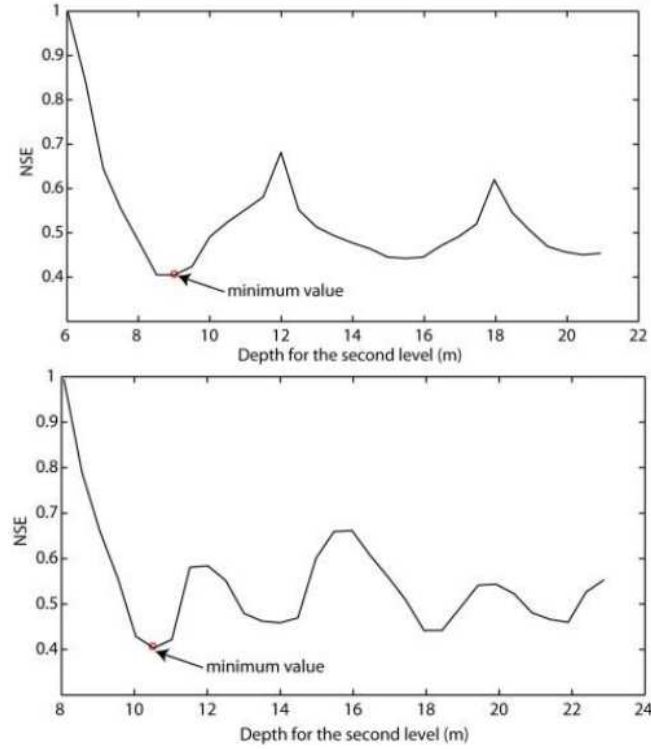


Figura 4.11: Gráficos indicando qual a melhor profundidade para o segundo nível, estando o primeiro nível na profundidade de 6 m (em cima) e de 8 m (embaixo) [60].

dos *air guns* no *NSE*. Tomou-se a profundidade ideal para 2 níveis, 6 e 9 m de acordo com a tabela da Figura 4.12. Dois casos foram estudados: quando o volume do *air gun* do nível de 6 m é 500 cu.in e quando é 1.000 cu.in. Variou-se então o volume do 2º nível e calculou-se o valor do *NSE* para ambos os casos. Os resultados são mostrados na Figura 4.13. Um fato interessante a se notar é que em ambos os casos o volume do 2º *air gun*, o mais profundo, foi consideravelmente maior do que o primeiro. Este tema será retomado quando se analisar a profundidade dos arranjos para a proposta de fonte apresentada no Capítulo 5.

É importante também comentar algumas desvantagens do MLS. Como já discutido, tal método se baseia na detonação dos subarranjos em diferentes instantes de tempo, que são calculados através da diferença Δh_i entre os níveis e a velocidade da onda acústica na água. As características que determinam a velocidade (principalmente pressão hidrostática e temperatura) não necessariamente são constantes, podendo variar aproximadamente entre 1.490 e 1.540 m/s. Somado a isto, temos também o efeito

4. Conceitos de Fontes Dispersas e Fontes Multinível

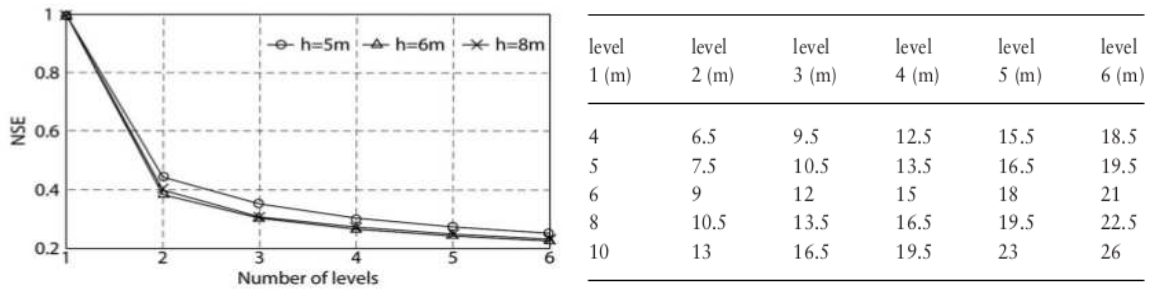


Figura 4.12: Esquerda: número de níveis, de acordo com o NSE, para 3 profundidades. Direita: tabela com as profundidades ótimas para os diferentes níveis [52].

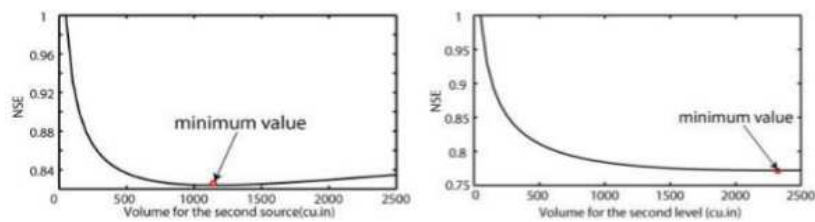


Figura 4.13: Curvas do NSE para dois *air guns* à 6 m e 9 m, variando-se o volume do segundo (9 m) *air gun*, sabendo-se que o volume do primeiro (6 m) é de 500 cu.in. (esquerda) e 1.000 cu.in. (direita). No caso ótimo (menor NSE), nota-se que o *air gun* mais profundo tem sempre maior volume [60].

das ondas do mar (*swell*) que pode provocar alterações consideráveis nas profundidades relativas dos subarranjos, principalmente devido ao fato deste fenômeno ter sua intensidade relacionada à profundidade: quanto menor a profundidade, maior o efeito das ondas. Estes fatores podem ser empecilhos para o cálculo exato do instante de detonação dos subarranjos. Outro ponto a se comentar é em relação à diretividade de uma fonte MLS. Como a diretividade não é só função da configuração espacial (estudada no Seção 3.4), mas também da temporal¹⁴ entre os subarranjos e deve ser estudada, através de modelagens, para conhecer seu efeito preciso. No entanto, não é encontrado uma homogeneidade ou mesmo atenuação dos *notches* do arranjo para configurações MLS [61].

¹⁴Até o momento tem-se estudado a diretividade apenas como um fenômeno espacial, pois supõe-se que o arranjo de fontes é coerente, com todos os *air guns* detonando ao mesmo tempo.

Capítulo 5

Proposta de Fonte Dispersa e Resultados

Analisando-se os conceitos de DSA, vem em mente a pergunta: por que esperar um futuro certamente não tão próximo para o advento da robotização das aquisições em vez de usar o que se tem disponível correntemente no mercado da sísmica e empregar estes conceitos? Em vez de se usarem vários navios, o que é custoso¹, por que não usar apenas um navio e considerar cada subarranjo como sendo uma fonte dispersa ou SU?

5.1 Proposta e Método

A proposta deste trabalho é aliar o conceito de fontes dispersas e o aparato operacional atual dos navios de aquisição sísmica. Tal como as fontes multinível, na proposta apresentada aqui cada subarranjo estaria a uma determinada profundidade. A principal diferença está nos instantes de detonação. Enquanto no caso MLS a detonação é tal que o campo de onda descendente emitido por cada subarranjo interfere construtivamente, nesta proposta não há este compromisso e, como visto na Seção 4.1 sobre fontes dispersas, cada SU dispara de forma *incoerente*. No entanto, é mandatório apenas que um subarranjo dispare apenas após o anterior ter emitido seu campo de onda, o que é da ordem de dezenas de milissegundos. Mais sobre a questão da determinação dos IPT's poderá ser encontrado na discussão dos resultados.

¹A diária de um navio que tenha apenas fonte (sem *streamers*) está na casa dos US\$ 100.000.

5. Proposta de Fonte Dispersa e Resultados

Para testar a proposta foi escolhida uma fonte sísmica já estabelecida no mercado². O arranjo escolhido está ilustrado na Figura 5.1, estabelecido pela empresa PGS. Para usar cada subarranjo como SU, era preciso escolher uma profundidade para cada deles. Isto foi feito valendo-se dos estudos de fontes multinível, e os valores de profundidades usados são aqueles da tabela da Figura 4.12. Perceba que aqui dois aspectos podem estar aliados: (i) atenuação do *notch* do *ghost* devido à detonação dos subarranjos em diferentes profundidades, tal qual no caso MLS e (ii) usar as características de frequências relativas à detonação em diferentes profundidades, onde fontes mais profundas possuem amplitudes maiores nas baixas frequências, como pode ser notado pela Figura 3.13(b). A fonte dispersa apresentada aqui faz jus ao termo *broadband*, pois atenua o efeito do *ghost* além de priorizar a emissão nas baixas frequências, que são hoje um dos grandes desafios da sísmica. Esta fonte será chamada, doravante, de *Fonte Dispersa Broadband* - FDB. Deve-se salientar que apesar de cada subarranjo não emitir as características de frequência desejada, o efeito combinado dos 3 subarranjos, formando a FDB, o fazem.

Outro fato a ser mencionado é o fato de que cada subarranjo, na fonte apresentada acima, possui um volume diferente. Neste quesito dois pontos merecem destaque: (i) relembrando o exposto na Seção 3.1.2 de que quanto maior o volume V , maior será o período T da bolha e por conseguinte menor a frequência fundamental f_c , teremos aí mais conteúdo de baixa frequência. Assim, pensando-se na emissão de baixas frequências, se há 3 níveis para 3 subarranjos de volumes diferentes, é preferível que os níveis mais profundos sejam ocupados por subarranjos de volumes *maiores*; (ii) se extrapolarmos o resultado apresentado na figura 4.13 de *air guns* para subarranjos, teremos que para uma melhor atenuação do *ghost*, maior deve ser o volume do subarranjo mais profundo. Logo, pensando-se na atenuação do *ghost*, é preferível posicionar os subarranjos de maior volume em maiores profundidades. Interessante notar que mais uma vez as características relacionadas à emissão de baixas frequências aliam-se às aquelas relacionadas à atenuação do *ghost*, que por sua vez realçará mais as baixas frequências.

Por fim, mas não menos importante, antes de passar para os resultados, é vá-

²Vale lembrar que a tarefa de determinar um arranjo é complicada e exige muitas modelagens e testes de campo.

5. Proposta de Fonte Dispersa e Resultados

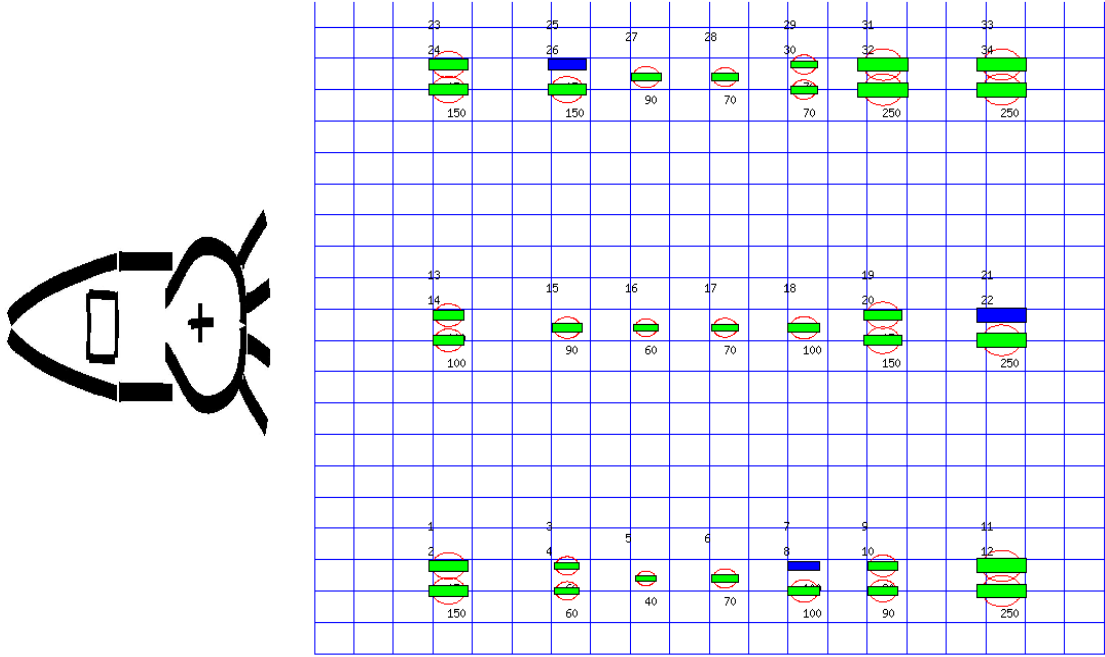


Figura 5.1: Ilustração de um arranjo da empresa PGS. Os retângulos indicam os *air guns*, onde verde é um *air gun* ativo e azul indica que este está desligado. Os círculos vermelhos indicam o raio máximo aproximado da bolha. Os números acima de cada *air gun* são apenas índices de identificação e os valores embaixo são os volumes, em cu.in. O volume total é de 4.130 cu.in. A malha é de 1 m x 1 m.

lido comentar sobre a diretividade e interação. Como os subarranjos são detonados em instantes diferentes, não há interação entre eles se o atraso entre as detonações for da ordem ou maior que algumas centenas de milissegundos, o que é bastante factível. Usando-se os conceitos da Seção 3.5, quando não há interação entre os subarranjos, mais energia na forma de ondas acústicas é disponibilizada pelos subarranjos, que apresentam ainda interação entre os *air guns* que o compõem. Em relação à diretividade, é de se esperar que não haja um padrão muito forte principalmente no plano XL, já que, como visto, as separações entre os subarranjos detonados de forma coerente são os responsáveis pelos *notches* do arranjo.

As modelagens³ para a FDB foram feitas como indicam as ilustrações na Figura 5.2, com cada subarranjo agindo como uma SU independente. Os termos ‘sb1’, ‘sb2’ e ‘sb3’ referem-se aos subarranjos 1, 2 e 3 respectivamente. Os valores à esquerda indicam o volume de cada subarranjo. Era preciso comparar a proposta com soluções já

³Foi escolhido analisar os espectros no *far field*, com $\theta = 0$, como é o padrão em sismica.

5. Proposta de Fonte Dispersa e Resultados

disponíveis no mercado. Destarte, decidiu-se pela escolha da mesma fonte apresentada na Figura 5.1, mas disparando da forma convencional. Era, ainda, necessário escolher a profundidade do arranjo. Para tal, fez-se uso das informações compiladas na Figura 5.3. Escolheu-se duas profundidades para a fonte para modelar a forma convencional: 6 e 8 m. Apesar de a profundidade 8 m ter sido usada em apenas 1% das aquisições da Petrobras entre 2000 e 2016, como mostra a Figura 5.3, decidiu-se por este valor por uma questão simples: quanto maior a profundidade, maior o conteúdo de baixas frequências, como indica a Figura 3.12, e assim pode-se ter uma comparação menos tendenciosa, já que a FDB proposta tem, dentre outros, o objetivo de realçar esta faixa de frequências. Outra fonte usada para fins comparativos foi a MLS. Como esta também é uma solução *broadband* por atenuar o efeito do *ghost*, foi decidido modelar esta fonte usando-se as mesmas profundidades dos subarranjos da FDB proposta.

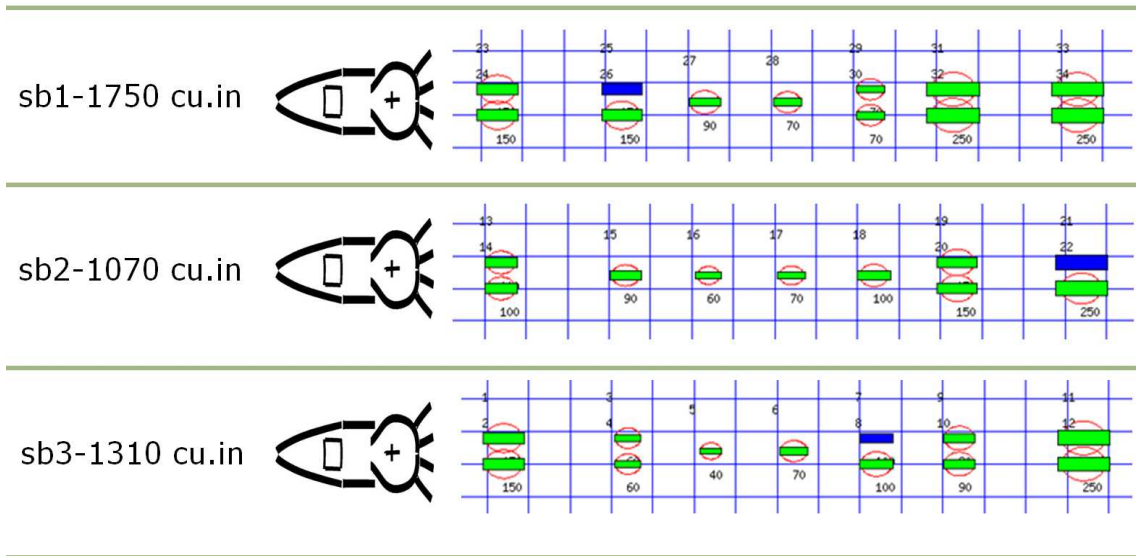


Figura 5.2: Ilustração dos 3 subarranjos, que agora detonam independentemente, valendo-se do conceito de fontes dispersas. À esquerda vê-se a referência aos subarranjos com seu respectivo volume.

5.2 Resultados das Modelagens

Os resultados das modelagens serão apresentados em duas partes. Primeiro serão mostrados os resultados das modelagens do espectro de amplitude, para as fontes

5. Proposta de Fonte Dispersa e Resultados

Profundidade_das_fontes	#	%	Área (km ²)	%
	139	100%	263916,26	100%
5,00	2	1%	1003,1	0%
6,00	45	32%	78362,1	15%
6,50	20	14%	34394,9	7%
7,00	49	35%	120165,7	23%
7,50	20	14%	26507,2	5%
8,00	3	2%	3483,1	1%

Estatísticas de Profundidade das fontes	
média ponderada por #:	6,67
Desvio Padrão:	1,08
Valor Mínimo:	5,00
Valor Máximo:	8,00

Fonte: Tabela de Estatísticas – E&P-EXP/GEO/FAQM/CSD

Figura 5.3: Tabela com informações históricas dos dados sísmicos da Petrobras de 2000 à 2016. Estas informações contemplam dados adquiridos pela Petrobras, por outras empresas parceiras nos blocos e dados comprados.

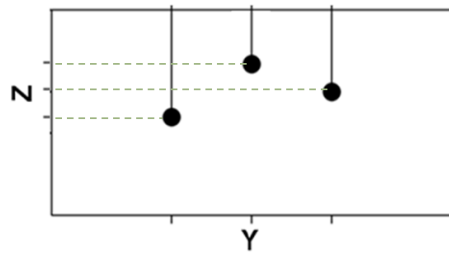
convencional, MLS e FDB, e por fim serão apresentados aqueles referentes ao padrão de diretividade para as mesmas fontes.

5.2.1 Espectro de amplitude das fontes modeladas

A Figura 5.4 sumariza as configurações usadas para modelar as fontes. À esquerda vê-se a disposição dos subarranjos para os casos MLS e FDB, com cada subarranjo a uma profundidade. À direita estão indicadas as 4 configurações modeladas para os casos FDB e MLS. Usando as considerações sobre os volumes (maior volume deve ser mais profundo) e os valores de profundidade indicados na figura 4.12, as 4 configurações podem ser assim descritas: #1 com os subarranjos 1 à 9 m (sb1-9m) e 3 à 6 m (sb3-6m), visando testar o caso mais simples de 2 níveis; #2 com o subarranjo 2 à 6 m para comparação com o subarranjo 3 à 6 m; #3 com os subarranjos 1 à 12 m (sb1-12m), 2 à 6 m (sb2-6m) e 3 à 9 m (sb3-9m) e #4 com os subarranjos 1 à 13,5 m (sb1-13,5m), 2 à 8 m (sb2-8m) e 3 à 10,5 m (sb3-10,5m). Ademais, para o caso convencional foi modelada a fonte à 6 e 8 m de profundidade.

Os resultados para a configuração #1 podem ser vistos na Figura 5.5. Em cima à esquerda pode ser visto os subarranjos 1 a 9 m (vermelho) e 3 a 6 m de profundidade (azul), mostrando a complementaridade entre seus *ghosts*. Note também

5. Proposta de Fonte Dispersa e Resultados



Config.	sb1	sb2	sb3
#1	9 m	-	6 m
#2	-	6 m	-
#3	12 m	6 m	9 m
#4	13,5 m	8 m	10,5 m

Figura 5.4: Esquerda: ilustração em perfil da disposição dos 3 subarranjos (sb1, sb2 e sb3 da esquerda para a direita.). Direita: diferentes configurações para a fonte dispersa, que serão comparadas com os casos convencionais e multinível.

o ganho promovido nas baixas frequências devido à profundidade e volume maiores do subarranjo 1. Como estes dois subarranjos não interagem, o caso disperso é obtido diretamente pela soma dos espectros dos dois subarranjos.

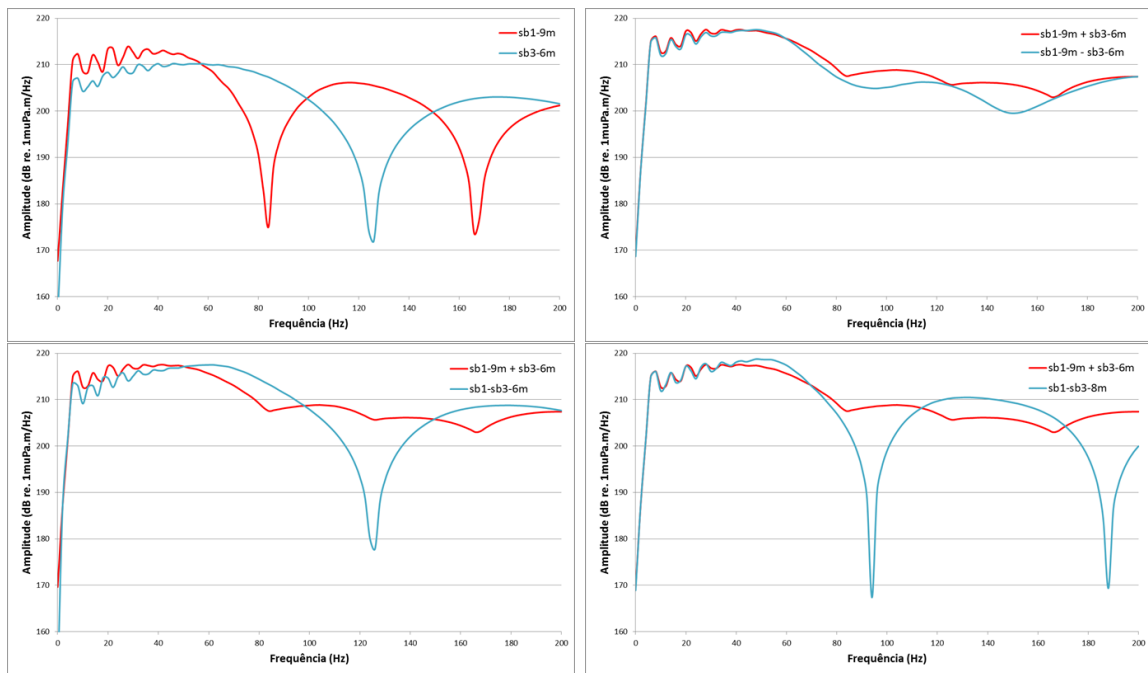


Figura 5.5: Em cima: esquerda: espectro de amplitude dos subarranjos 1 à 9 m (vermelho - 'sb1-9m') e 3 à 6 m de profundidade (azul - 'sb3-6m'); direita: espectro dos subarranjos 1 e 3 dispersos a 9 e 6 m (vermelho - 'sb1-9m + sb3-6m') e multinível (azul - 'sb1-9m - sb3-6m') com os mesmos subarranjos às mesmas profundidades do caso disperso. Embaixo: comparação entre a fonte dispersa (vermelho) e a fonte convencional (azul) à 6 m ('sb1-sb3-6m'), esquerda, e 8 m ('sb1-sb3-8m'), direita.

O resultado da fonte dispersa pode ser visto em cima à direita, 'sb1-9m + sb3-6m' (vermelho). A modelagem MLS com os mesmos subarranjos nas mesmas

5. Proposta de Fonte Dispersa e Resultados

profundidades, ‘sb1-9m - sb3-6m’, foi feita detonando-se o subarranjo 3 (mais raso!) seguido do subarranjo 1 com 2 ms de atraso, conforme visto na Seção 4.2 e mostrado na Figura 4.8. Este tempo de atraso é encontrado dividindo-se a separação entre eles, 3 m, pela velocidade do som na água, 1.500 m/s. Embaixo pode ser visto a comparação entre as fontes dispersas (vermelho) e convencionais à 6 m, esquerda (azul), e à 8 m, direita (azul).

Antes de introduzir o 3º subarranjo nas modelagens, uma comparação foi feita para se avaliar a questão de maiores volumes serem mais eficazes. Na Figura 5.6 é mostrada a comparação entre os subarranjos 2 (azul) e 3 (vermelho) ambos à 6 m de profundidade. Percebe-se que para quase todo o espectro o subarranjo de maior volume apresenta maiores amplitudes, devendo ser este fato creditado à maior energia disponibilizada para este arranjo⁴. O efeito nas baixas frequências de se usar um maior volume pode apenas ser suavemente percebido pela menor frequência fundamental f_c , devendo-se isto ao fato das diferenças entre os volumes ser pequena para que um maior efeito seja notado. Não é possível aqui e esta não foi a intenção desta modelagem, verificar a eficiência de se usar um maior volume para atenuar o *ghost*.

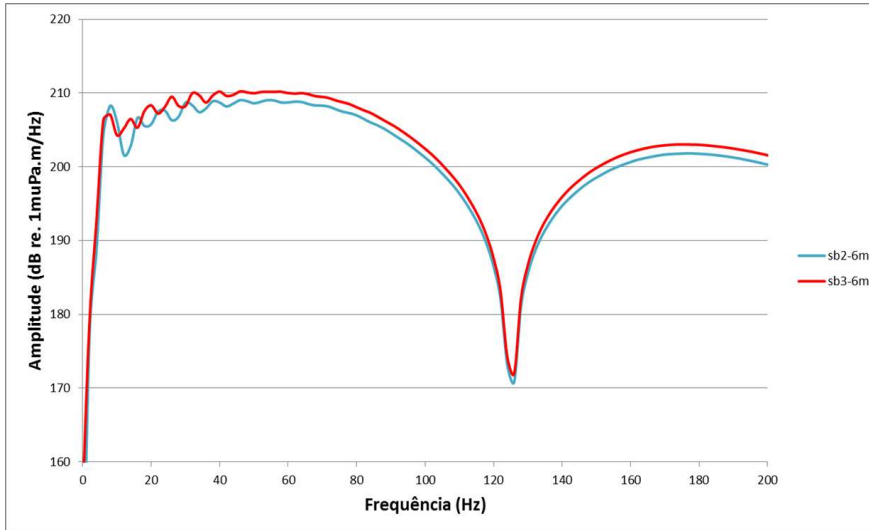


Figura 5.6: Comparação entre os subarranjos 2 (azul) e 3 (vermelho) à 6 m de profundidade.

As próximas duas figuras, 5.7 e 5.8, mostram os resultados para os 3 subarranjos,

⁴Podemos usar a energia disponível por um *air gun*, VP e estender para a energia disponibilizada por um subarranjo como sendo $V_{eff}P$, onde V_{eff} é um volume efetivo que quantifica as perdas devido à interação entre os *air guns* dentro do subarranjo.

5. Proposta de Fonte Dispersa e Resultados

seja no caso FDB, MLS e convencional, para as profundidades 12-6-9 m e 13,5-8-10,5 m de profundidade para os subarranjos 1, 2 e 3 respectivamente. O mesmo esquema de comparação usado acima para dois subarranjos foi utilizado. Em cima à esquerda estão os 3 subarranjos disparados separadamente, mostrando a complementaridade entre os *ghosts*; à direita é uma comparação direta entre os casos FDB e MLS, sendo usado para este caso o atraso entre os instantes de detonação dos subarranjos. Embaixo, uma comparação entre os casos FDB e convencional à 6 m (esquerda) e 8 m (direita).

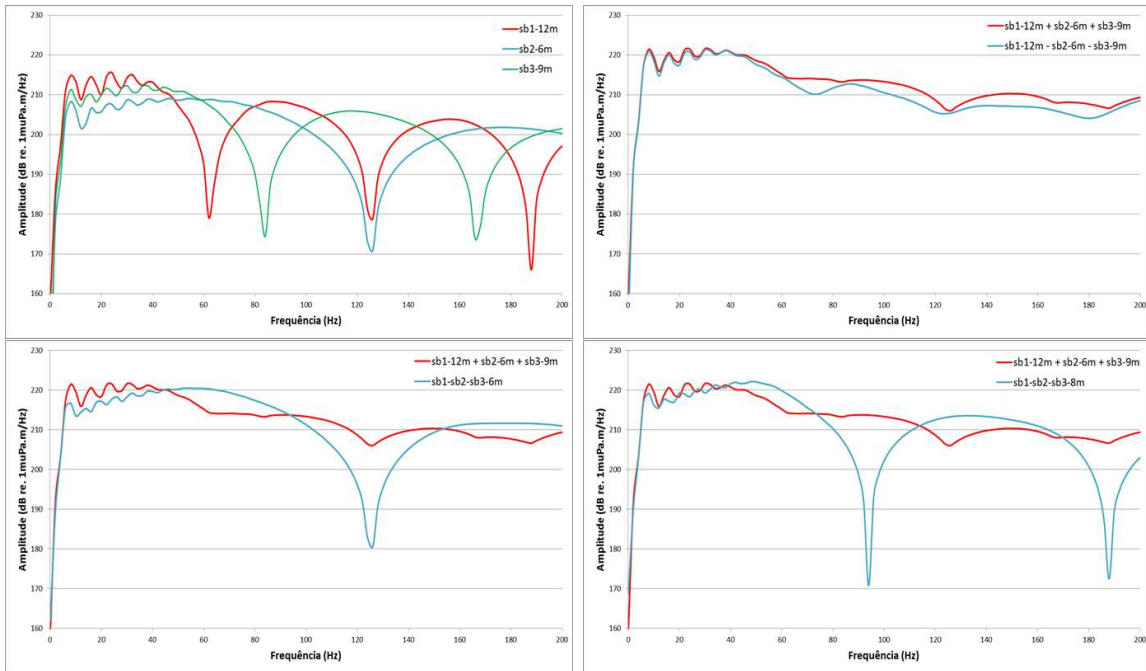


Figura 5.7: Em cima: esquerda: espectro de amplitude dos subarranjos 1 à 12 m (vermelho - 'sb1-12m'), 2 à 6 m (azul - 'sb2-6m') e 3 à 9 m de profundidade (verde - 'sb3-9m'); direita: espectro dos subarranjos 1, 2 e 3 dispersos à 12, 6 e 9 m (vermelho - 'sb1-12m + sb2-6m + sb3-9m') e multinível (azul - 'sb1-12m - sb2-6m - sb3-9m') com os mesmos subarranjos às mesmas profundidades do caso disperso. Embaixo: comparação entre a fonte dispersa (vermelho) e a fonte convencional (azul) à 6 m ('sb1-sb2-sb3-6m'), esquerda, e 8 m ('sb1-sb2-sb3-8m'), direita.

5. Proposta de Fonte Dispersa e Resultados

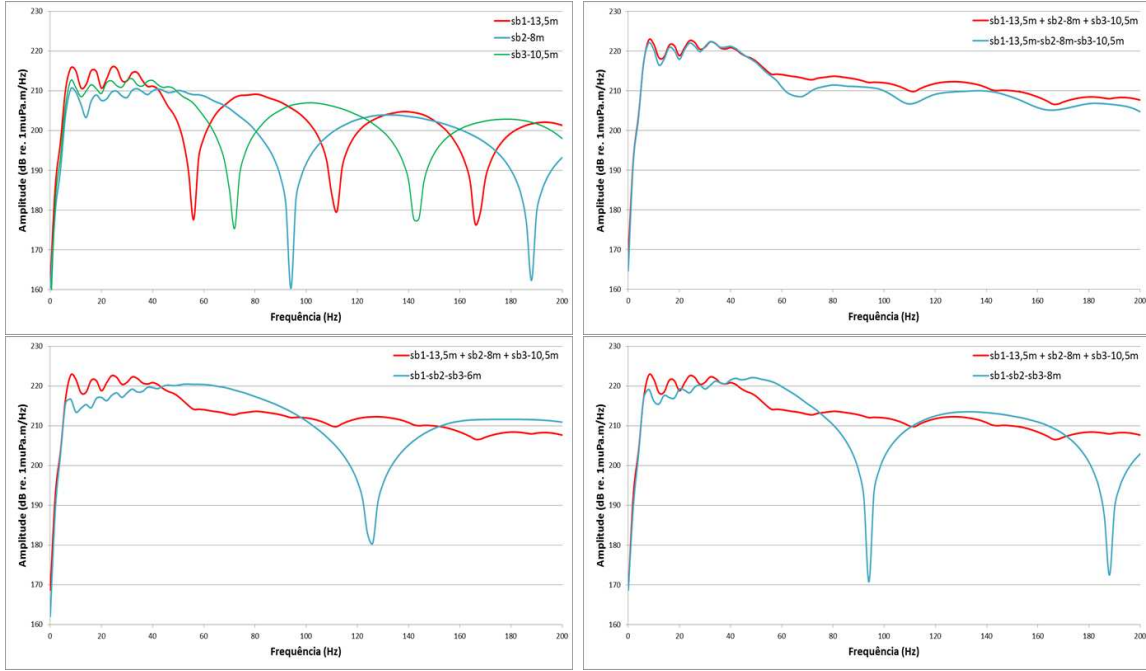


Figura 5.8: Em cima: esquerda: espectro de amplitude dos subarranjos 1 à 13,5 m (vermelho - ‘sb1-13,5m’), 2 à 8 m (azul - ‘sb2-8m’) e 3 à 10,5 m de profundidade (verde - ‘sb3-10,5m’); direita: espectro dos subarranjos 1, 2 e 3 dispersos à 13,5, 8 e 10,5 m (vermelho - ‘sb1-13,5m + sb2-8m + sb3-10,5m’) e multinível (azul - ‘sb1-13,5m - sb2-8m - sb3-10,5m’) com os mesmos subarranjos às mesmas profundidades do caso disperso. Embaixo: comparação entre a fonte dispersa (vermelho) e a fonte convencional (azul) à 6 m (‘sb1-sb2-sb3-6m’), esquerda, e 8 m (‘sb1-sb2-sb3-8m’), direita.

5.2.2 Padrões de diretividade das fontes

Agora serão apresentados os resultados de diretividade. Para tal, escolheu-se as profundidades 12-6-9 m para os subarranjos 1, 2 e 3, respectivamente, tanto para o caso FDB quanto MLS. Para a fonte convencional escolheu-se a profundidade de 8 m. Os resultados apresentados referem-se à diretividade dos planos IL e XL, mas convém comentar que a diretividade para outros azimutes é um misto entre estes dois casos.

A Figura 5.9 abaixo mostra os padrões de diretividade do plano IL (esquerda) e XL (direita). Note que estes são os mesmos padrões apresentados na Seção 3.4. Como reparado naquela ocasião, o *ghost* do pulso primário e a distribuição geométrica entre os *air guns* do arranjo são os responsáveis pelas regiões de baixa amplitude na figura abaixo.

5. Proposta de Fonte Dispersa e Resultados

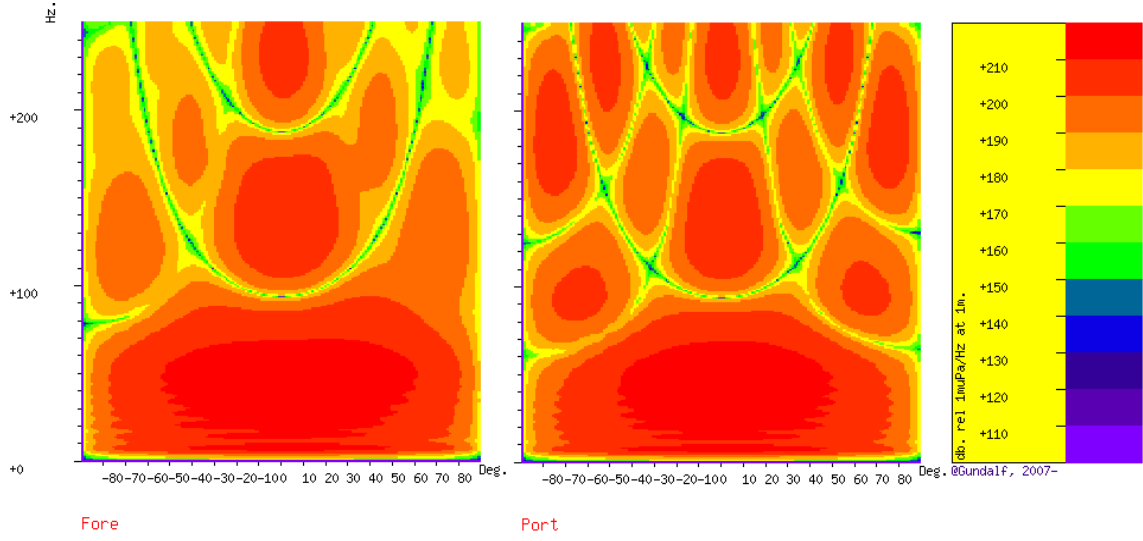


Figura 5.9: Padrão de diretividade do plano IL (esquerda) e XL (direita) para a fonte convencional à 8 m de profundidade. Estes são os mesmos padrões das Figuras 3.25 e 3.26.

O resultado apresentado na Figura 5.10 mostra a diretividade do caso MLS. Note que há, conforme exposto na Seção 4.2, a atenuação do efeito do *ghost*, pois não há uma região marcadamente coerente de baixa amplitude, seja no plano IL seja no XL.

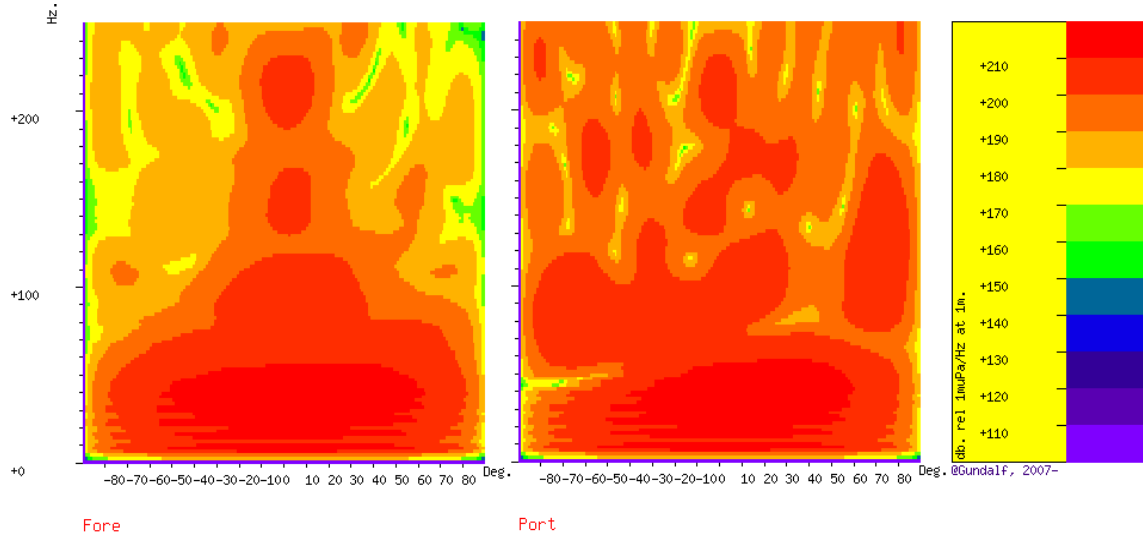


Figura 5.10: Padrão de diretividade do plano IL (esquerda) e XL (direita) para a fonte fonte multinível 12-6-9 m de profundidade.

Por fim, a Figura 5.11 apresenta o padrão de diretividade para a fonte proposta. Como comentado no início deste Capítulo, o fato de os subarranjos serem detonados

5. Proposta de Fonte Dispersa e Resultados

separadamente, torna o padrão de diretividade mais “isotrópico”, e a característica de os seus subarranjos também estarem em profundidades diferentes faz, devido à consequente atenuação do *ghost*, com que a proposta FDB seja mais homogênea (espectro com menos variações ao longo de um mesmo ângulo).

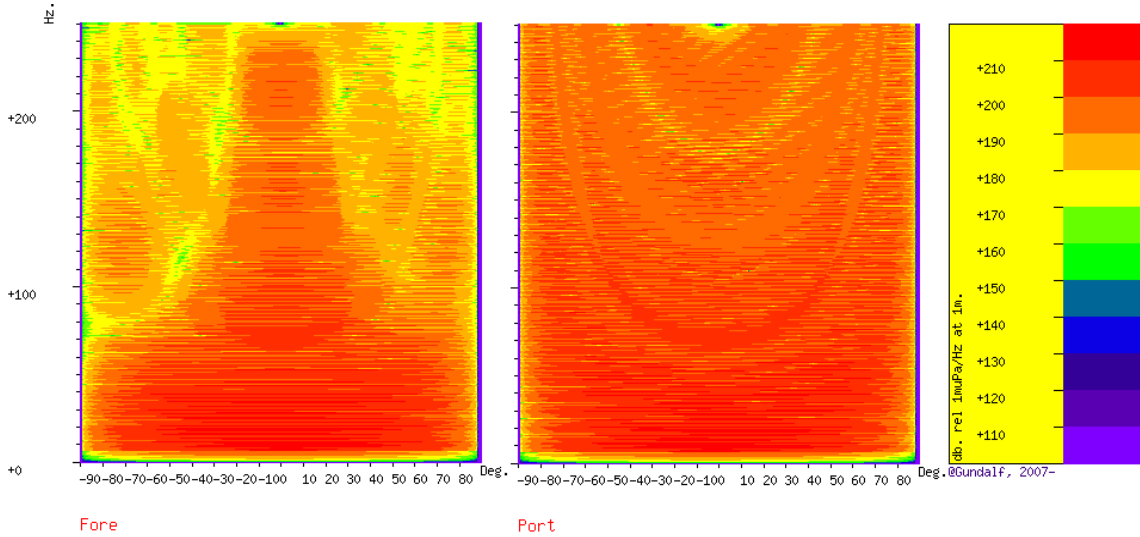


Figura 5.11: Padrão de diretividade do plano IL (esquerda) e XL (direita) para a fonte dispersa 12-6-9 m de profundidade.

5.3 Discussão dos resultados

Nesta Seção serão discutidos primeiro os principais resultados referentes aos espectros de amplitude das fontes e posteriormente os relativos à diretividade, sempre fazendo comentários que realcem as diferenças entre as fontes e principalmente os campos de melhoria que podem ser explorados pela proposta apresentada.

É inegável, a partir da análise das Figuras 5.7 e 5.8, a melhoria nas altas frequências proporcionada pela fonte FDB em detrimento à MLS. Como toda a configuração do arranjo (profundidade, geometria e volume) são iguais para ambos os casos, tal ganho é atribuído aos critérios de detonação entre ambos. No caso FDB, não há interação entre os subarranjos, o que disponibiliza mais energia se comparado ao MLS, onde o subarranjo 2, por exemplo, dispara exatamente quando o campo de onda do subarranjo 3, mais raso, atinge seu nível. É possível ver também a atenuação do *ghost* no caso FDB, comparável ao MLS e muito superior à fonte convencional.

5. Proposta de Fonte Dispersa e Resultados

Em se tratando de baixas frequências, a solução FDB apresenta resultado similar à MLS, mas é indiscutivelmente superior ao caso convencional, estando este à profundidade de 6 ou 8 m. Para ilustrar este fato, é mostrado à esquerda da Figura 5.12 uma comparação entre o caso FDB 13,5-8-10,5 m e convencional à 8 m, com o eixo da frequência em escala logarítmica para acentuar as baixas frequências. O ganho encontrado entre 6 e 20 Hz foi de 2,6 dB, o que em termos lineares representa 35% de ganho nesta faixa.

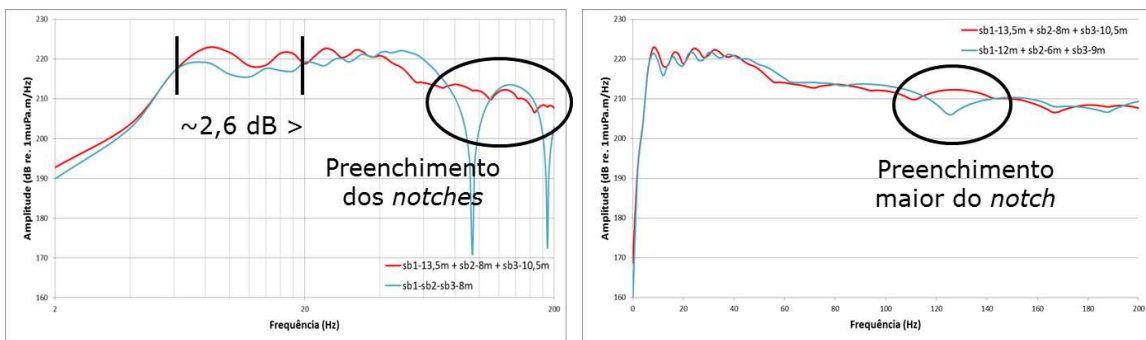


Figura 5.12: À esquerda tem-se uma comparação entre a fonte dispersa apresentada na Figura 5.8 com a fonte convencional à 8 m de profundidade. O eixo da frequência está em escala logarítmica para elucidar a região de baixas frequências. Percebe-se também o preenchimento das regiões com *notches*. À direita é mostrada a comparação entre as duas fontes dispersas apresentadas nas Figuras 5.7 e 5.8, destacando-se o ligeiro ganho nas baixas frequências.

Como já mencionado, a FDB preenche consideravelmente as regiões com *notches*, mas deve-se salientar que na região intermediária dos dois primeiros *notches*, 40 a 70 Hz, a FDB possui amplitudes menores que a fonte convencional, o que já era esperado, pois isto se deve à interferência construtiva nesta faixa proporcionada pelo *ghost*, que no caso FDB é atenuado. Entretanto, o efeito de preencher o *notch* às custas de atenuar tal faixa intermediária é completamente aceitável no processamento sísmico, principalmente na deconvolução do pulso sísmico, pois as regiões com *notches* possuem, muitas vezes, amplitudes menores do que o ruído ambiental, que tem espectro considerado branco. Isto provoca, na deconvolução, a amplificação do ruído (se este não foi devidamente atenuado em etapas anteriores), prejudicando o dado sísmico. A região entre 40 e 70 Hz mesmo possuindo uma amplitude menor no caso FDB, tal redução não é preocupante no que se refere à deconvolução. À direita da Figura 5.12

5. Proposta de Fonte Dispersa e Resultados

é mostrada a comparação entre as duas modelagens FDB, onde pode ser apreendido que o caso com subarranjos mais profundos (13,5-8-10,5 m) atenua mais o *notch*, como indicado. Note que este caso, mesmo que timidamente, também apresenta maiores amplitudes nas baixas frequências, sendo isto atribuído certamente à maior profundidade de seus subarranjos. Desta forma, foi possível comprovar o asseverado na Seção 5.1, de que profundidades maiores para os maiores volumes é a melhor escolha para acentuar as baixas frequências e atenuar o *ghost*, o que por sua vez também acentua as baixas frequências.

Analisando os casos FDB e MLS, é possível encontrar vantagens operacionais no primeiro. Como dito ao final da Seção 4.2, há questões inerentes à operação, como variação da velocidade da onda na água e efeito do *swell* alterando a profundidade dos subarranjos, que dificultam a correta emissão construtiva do pulso primário. Isto pode acarretar, em dados reais, na diminuição do pulso primário bem como à ineficiente atenuação do *ghost*, além de perturbar a questão da diretividade da fonte. No caso FDB, apesar de os mesmos efeitos estarem presentes e atuarem da mesma forma no que se refere à atenuação do *ghost*, não há imposição aos instantes de detonação, pois cada subarranjo age como uma SU. Isto também não provoca alterações significativas no padrão de diretividade da FDB. Logo, o caso FDB mostra-se mais estável operacionalmente. Além disso, para sua implementação, apenas pequenas alterações nos *softwares* à bordo do navio que controlam a detonação dos subarranjos é necessária, tal qual no caso MLS. Portanto não está sendo proposta uma solução que requeira outros desenvolvimentos do ponto de vista de engenharia (os subarranjos são os mesmos de uma aquisição convencional) nem do ponto de vista dos *softwares* que controlam a operação.

As oscilações que aparecem nas frequências mais baixas (note isto nas frequências menores que 40 Hz para os espectros das fontes dispersas na Figura 5.12) são devidas ao efeito da bolha residual. Como visto na Seção 3.3, os diferentes volumes são usados de tal forma que o *ghost* de suas bolhas atenuem os picos diretos das bolhas de outros *air guns* de maior volume. Os arranjos, tal como o usado para avaliar a proposta deste trabalho, são desenvolvidos de forma que todos os subarranjos estejam

5. Proposta de Fonte Dispersa e Resultados

à mesma profundidade, e os volumes são escolhidos de forma tal que atenuem ao máximo o efeito da bolha. Ao mudarmos as profundidades, estamos alterando o período T da bolha de cada *air gun*, o que faz com que a bolha do arranjo não seja mais atenuada devidamente. Veja no gráfico da esquerda na Figura 5.12 como as oscilações no espectro da fonte convencional (azul) são mais suaves que da fonte dispersa (vermelho). Aí está mais um campo a ser explorado.

Quando foram estudados os conceitos de fontes dispersas na Seção 4.1, foi usado o teorema da amostragem para se definir qual o IPT para cada SU a depender, principalmente, da frequência máxima de sua respectiva banda. No caso da FDB proposta, os subarranjos não emitem numa banda específica e apesar dos dois primeiros *notches* de cada subarranjo delimitarem uma banda, há ainda amplitude considerável para maiores frequências. Mas é possível, na etapa do *Survey Design*, estimar a máxima frequência esperada a ser registrada numa aquisição e a partir daí definir-se *cut offs* para o espectro de cada subarranjo, e assim otimizar IPT's, acarretando em economia de tempo. Este é apenas um exercício proposto, que não foi investigado mas pode resultar em ganhos à aquisição.

Os resultados encontrados para os padrões de diretividade são, sem dúvida, muito relevantes. A solução convencional sofre dos efeitos dos *notches* do *ghost* e do arranjo. A solução MLS, apesar de atenuar o *ghost*, deixa muito a desejar em relação ao caráter anisotrópico da fonte. É claro que outras configurações MLS podem amenizar este efeito, mas decidiu-se compará-la aqui com as mesmas profundidades dos subarranjos da fonte FDB. Mesmo se uma configuração MLS for empregada visando minimizar a anisotropia do espectro, esta solução não será superior à FDB, visto que esta atua com seus subarranjos de forma independente, ao contrário da MLS. No plano IL ainda há fortes traços da diretividade para a fonte FDB, devido à separação entre os *air guns* dentro do subarranjo. Mas mesmo neste plano o espectro varia menos (i) ao longo de um mesmo ângulo do que a solução convencional (devido à atenuação do *ghost*) e (ii) para diferentes ângulos do que a solução MLS (devido à diferença na detonação).

Vale ressaltar que não há no mercado ou mesmo trabalho científico que propo-

5. Proposta de Fonte Dispersa e Resultados

nha uma solução tal como a apresentada neste trabalho que minimize os efeitos da diretividade. Como comentado na Seção 3.4, a patente do método mais prático de se calcular o *far field* para todos os ângulos já não está mais protegida e outras empresas estão começando, paulatinamente, a entregar a assinatura da fonte para cada disparo da fonte⁵. No entanto, o processamento sísmico que faça uso de uma assinatura para vários ângulos de cada disparo certamente será muito custoso em termos financeiros e de tempo. Esta solução pode minimizar este aspecto, já que o espectro varia menos com o ângulo polar.

⁵Vale notar que devido às condições do mar, as configurações do arranjo não se mantêm sempre entre um e outro disparo e por conseguinte as assinaturas são diferentes entre tais tiros.

Capítulo 6

Conclusões e Perspectivas

A fonte proposta, baseada no conceito de fontes dispersas apresentado por A. J. Berkhout [10], usa os subarranjos como fontes individuais (SU's). Cada subarranjo trabalha independentemente com seu volume profundidade. A proposta FDB confirmou a expectativa de acentuar as baixas frequências, além de atenuar consideravelmente os *notches* relativos ao *ghost*. Para a sua configuração valeu-se de trabalhos e constatações acerca do volume e profundidade dos subarranjos. Para a aplicação desta proposta não é necessário nenhuma outra exigência operacional que não a disponível atualmente. Apenas mudanças pequenas no sistema de controle de disparo dos *air guns* é necessário.

O padrão de diretividade da fonte dispersa mostrou-se muito superior às soluções disponíveis hoje no mercado de aquisição sísmica: convencional (todos os subarranjos à mesma profundidade detonam simultaneamente) e MLS. Esta melhoria pode proporcionar uma significativa melhoria na deconvolução da assinatura da fonte, por esta apresentar um comportamento que varie menos com o ângulo. Daí descendem também melhorias na interpretação do dado sísmico, que faz uso de atributos que variam com o ângulo, como o AVO (*Amplitude versus Offset*), o DHI mais usado na locação de poços de petróleo.

Há ainda que se avançar na técnica de separação dos campos de onda (*deblending*) quando se desejar seguir o fluxo de processamento convencional. Isto vem ganhando espaço pouco a pouco, pois há outras vantagens operacionais e técnicas, não

6. Conclusões e Perspectivas

discutidas aqui, em se fazer aquisições com muitos navios, mesmo quando todos estes possuam fontes convencionais. No entanto, é possível processar o dado sem a separação do campo de ondas.

Apesar das conclusões apontadas pelos resultados apresentados, há muito trabalho a ser feito como desdobramento natural da fonte proposta. Um passo imediato pode ser avaliar esta fonte em um modelo geológico real, complexo, onde, por exemplo, os ângulos de reflexão sejam suficientes para se avaliar o caráter diretivo. Modelos sintéticos podem ser usados para se estudar o impacto das baixas frequências obtidas, para reforçar os resultados encontrados.

É possível modelar cenários com diferentes volumes totais para os subarranjos, visando observar como isto impacta na emissão das baixas frequências (aqui está sendo priorizada as baixas frequências, mas isto não é regra!). Como este trabalho baseou-se num arranjo já estabelecido pelo mercado, que como vimos é desenvolvido para uma profundidade constante para todos os subarranjos, acredita-se que mais pode ser feito neste sentido. A modelagem com diferentes combinações de volume a fim de atenuar mais o efeito da bolha na FDB é uma outra área a ser explorada, pois um espectro mais plano nesta faixa pode ser obtido.

Sempre que se alteram os volumes dos *air guns* de um dado arranjo é necessário estudos de estabilidade da fonte, o que pode ser feito tentando reproduzir as adversidades encontradas no mar. É preciso modelar como a assinatura da fonte se comporta quando um ou outro *air gun* deixa de funcionar. Isto ocorre corriqueiramente em campo e, se a fonte desfalcada daquele(s) *air gun(s)* defeituoso(s) ainda assim respeitar certos critérios predefinidos (como razão pico a pico e pico-bolha não ser menor que um valor limite), a aquisição continua normalmente. Estas combinações do que é ou não permitido são sensíveis aos volumes do arranjo.

Acredita-se que mais ainda pode ser feito em relação às baixas frequências. É possível estudar configurações com *clusters* e avaliar seu impacto nas baixas frequências, pois como indica o estudo da referência [62], o período da bolha em um *cluster* depende da disposição geométrica dos seus *air guns* e, como já visto, período maior implica em frequência característica menor, o que fornece mais baixa frequência. Uma

6. Conclusões e Perspectivas

extensão do conceito de *cluster* para *hypercluster*, significando agora que o subarranjo age como uma enorme bolha, como visto rapidamente na Seção 3.27 e discutido na referência [51], também tem espaço para agregar valor às baixas frequências. Neste caso, há que se estudar também as implicações de uma tal configuração no restante do espectro.

Em relação à questão ambiental, é necessário estudos para se verificar o impacto ambiental de uma FDB como proposta neste trabalho. Sabe-se que o espectro emitido por um *air gun* atinge a casa dos kHz, o que afeta a fauna marinha. Já que a fonte dispersa detona seus subarranjos separadamente, é como se distribuíssemos a energia de um único arranjo em 3 parcelas, diminuindo assim em cerca de 9 dB a amplitude do pulso primário. Isto seria menos danoso para a vida marinha? Há que se investigar cuidadosamente este fato, pois a obtenção de licenças ambientais para a atividade sísmica numa dada região é impactada diretamente pelo dano causado pela fonte sísmica.

Apêndice A

Questões Econômicas sobre o Mercado de Petróleo

O objetivo deste Apêndice é fornecer uma noção do atual cenário econômico em Exploração & Produção (E&P) de petróleo bem como sua projeção para os próximos anos, enfatizando a questão da redução do preço do barril desde julho de 2014. A breve análise partirá de um contexto macro e terminará com a previsão das despesas no método sísmico, o que é de maior interesse a este trabalho. É pretendido repassar apenas um caráter informativo sobre os termos e características do mercado econômico.

É notório o caráter indispensável da energia à sociedade e esforços e recursos são empregados neste sentido. De acordo com o relatório da Consultora Deloitte [63], de abril de 2015, como mostra a Figura A.1(a), a capitalização de mercado do setor energético (E&R - *Energy & Resources*¹), dentre toda a área industrial mundial excluindo-se a indústria financeira, passou de 23% no período entre 2004 e 2008, para 47% no período entre 2009 e 2013, batendo até mesmo a indústria manufatureira, que ficou com 40% no último período. Estes são números muito representativos, que mostram como a indústria mundial percebe, ou tenta perceber, as necessidades sociais em todos os aspectos. E aí vemos o setor energético ganhar um grande destaque.

Restringindo-se ao setor de petróleo (O&G), que sozinho abarcou 27% do mon-

¹E&R = O&G (*Oil & Gas*) + P&U (*Power & Utilities*). O&G representa toda a indústria petrolífera; P&U, por sua vez, refere-se à toda a cadeia de geração, transmissão e distribuição das diferentes matrizes energéticas que não a petrolífera.

A. Questões Econômicas sobre o Mercado de Petróleo

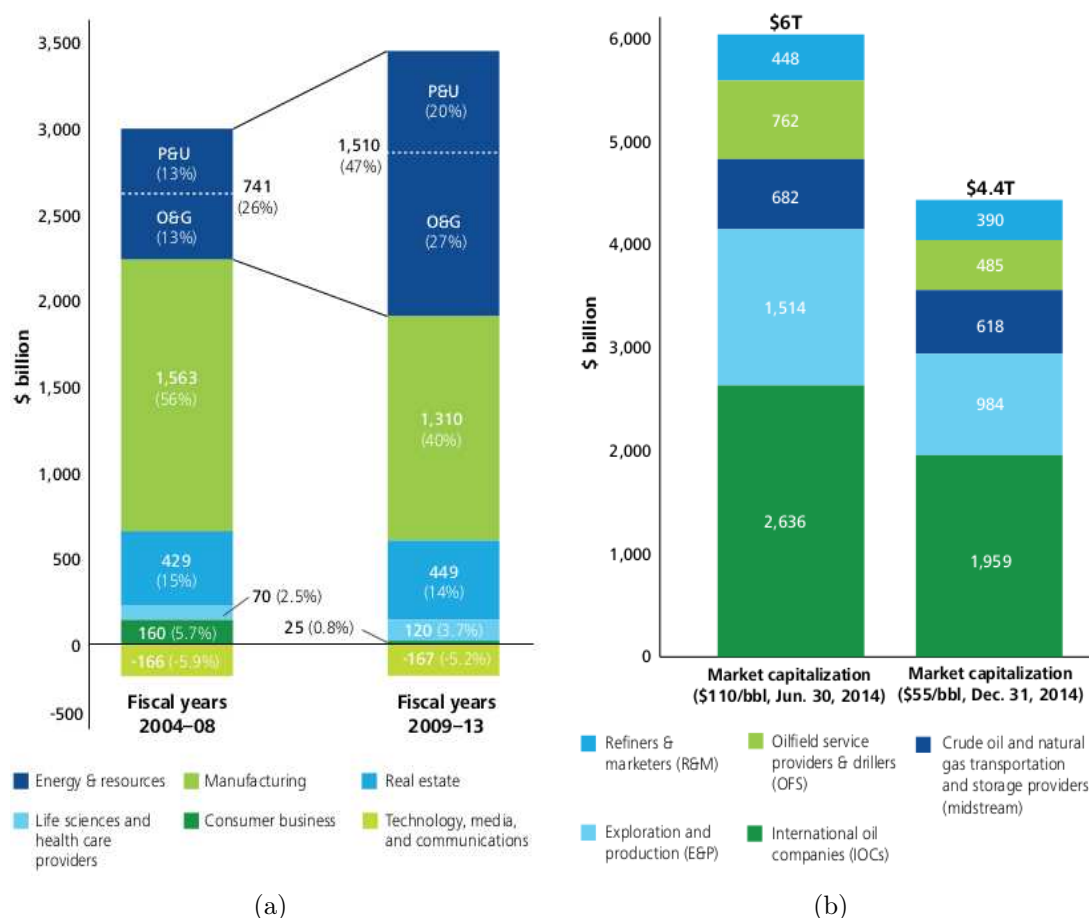


Figura A.1: Apesar do aumento no investimento no setor energético nos últimos anos, o cenário financeiro do mercado petrolífero aponta para a redução de investimentos [63]. (a) Aumento do capital industrial (excluindo-se o capital financeiro); (b) capitalização dos diferentes segmentos de O&G antes e após o declínio no preço do petróleo.

tante, não se pode fechar os olhos para a atual redução do preço do barril do petróleo², que passou da casa dos US\$ 110 por barril³ em junho de 2014 para oscilar em torno de US\$ 33 em fevereiro de 2016. Isto, claro fez com que toda a indústria do petróleo repensasse seus investimentos no setor. A Figura A.1(b) ilustra uma redução na capitalização do mercado de O&G de US\$ 1,6 trilhões (quase 27%) entre junho e dezembro de 2014 (quando o preço do barril ainda era de US\$ 55). Como a indústria ainda está no meio desta avalanche, não existem medidas definitivas, mas o corte de gastos é o sinal e remédio imediato. No entanto, muitos compromissos assumidos em E&P são

²Principal indexador que mede a saúde financeira do setor petrolífero.

³Estes valores se referem ao barril de petróleo tipo *Brent*, tipo de petróleo comercializado nos mercados europeu e asiático e negociado na Bolsa de Londres.

A. Questões Econômicas sobre o Mercado de Petróleo

passíveis de punições pela falta de investimento, o que é controlado por Governos e Agências Reguladoras.

Ainda sobre investimentos na área de energia, a IEA (*International Energy Agency*) divulgou em seu relatório anual de 2011, o rateio entre as diferentes matrizes energéticas, no investimento acumulado entre 2011 e 2035 (vale lembrar que na época desta previsão, o preço do petróleo ainda se mantinha em patamares elevados em comparação ao atual). Na Figura A.2 é possível ver o setor de O&G somar um montante que representa mais de 50% do investimento na malha energética. Cabe destacar que o setor *Upstream* é uma designação comum no mercado, e compreende toda a cadeia que antecede ao refino do petróleo, indo desde sua exploração, produção, desenvolvimento da produção e transporte para beneficiamento. É também chamada de Exploração & Produção (E&P). De fato o setor de E&P é o que absorve os maiores investimentos na indústria de O&G, como pode ser verificado pela previsão de investimento acumulado de mais de US\$ 15 trilhões, algo próximo de 80% de todo o investimento em O&G.

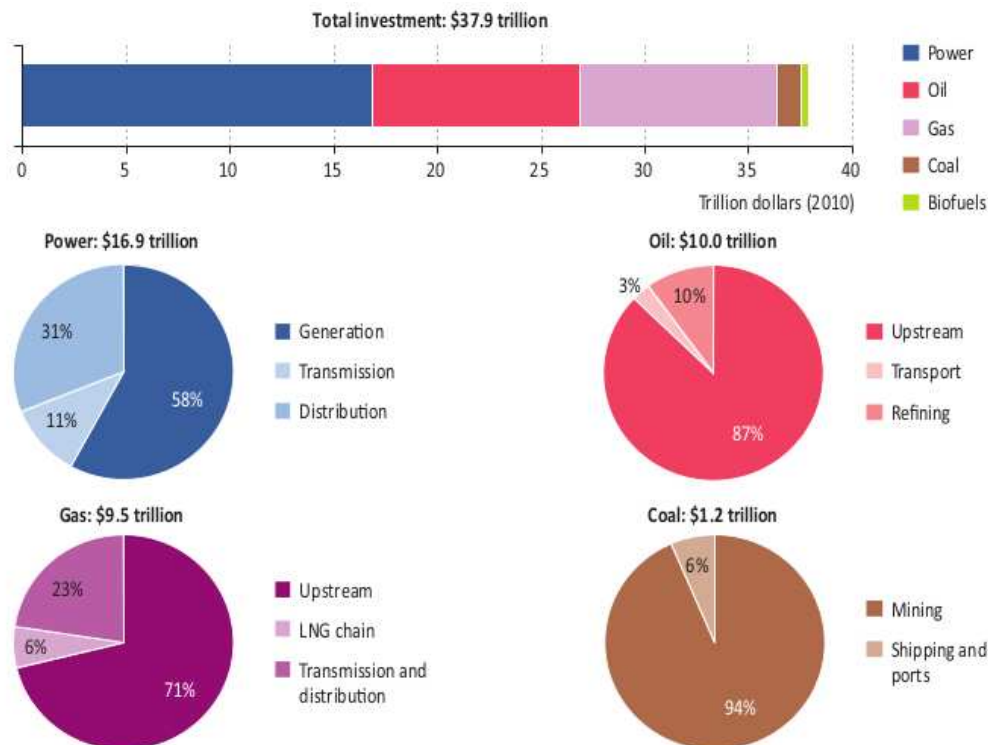


Figura A.2: Investimento acumulado, de 2011 à 2035, em infraestrutura de fornecimento de energia, por combustível (em valores de 2010) [64].

A. Questões Econômicas sobre o Mercado de Petróleo

O setor de E&P vem num crescente de investimentos em todo o mundo, como denotado na Figura A.3, num relatório de 2013 do banco Barclays. Como o mercado está cada vez mais demandante e o petróleo armazenado em reservatórios com estruturas mais simples de serem descobertos já em declínio, a saída é buscar novas fronteiras exploratórias, e o primeiro passo para tal é o planejamento da aquisição de dados sísmicos como subsídios nas locações dos poços de petróleo.

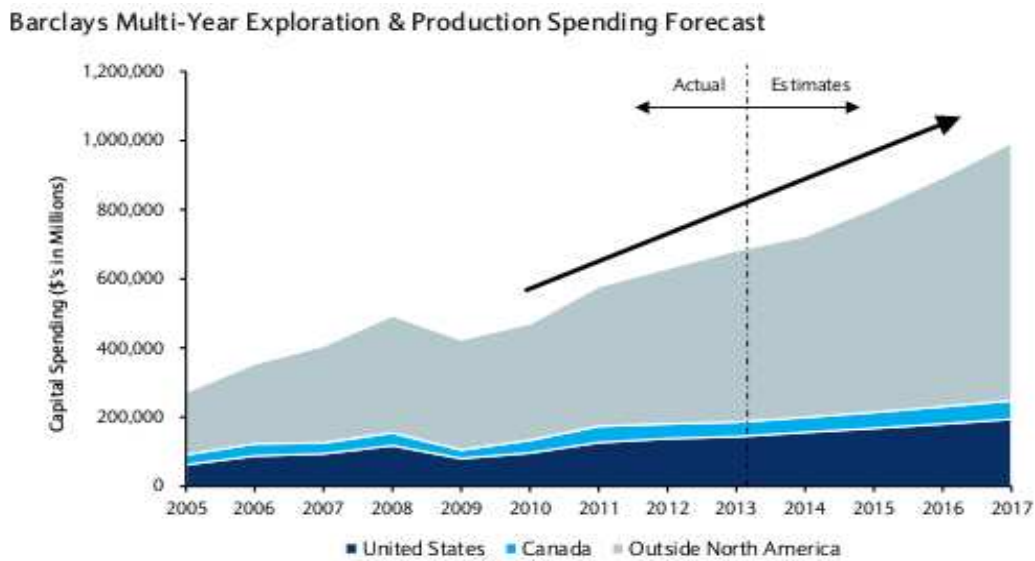


Figura A.3: Previsão de gastos em E&P [65].

Neste cenário de novas fronteiras exploratórias, o Brasil situa-se na vanguarda dos maiores investimentos, como pode ser visto na figura A.4. Países como Brasil, Austrália e Canadá lideram o *rank* que mede as razões em investimentos de bens de capital (CAPEX, *CApital EXpenditure*) e dividendos divididos pelo OCF (*Operational Cash Flow*, receita das empresas excluindo-se os custos com bens de capital). Esta é uma medida, em linhas gerais, da quantidade de investimento pela quantidade receita e mede o grau de investimento.

Relacionando as informações obtidas até aqui, a Figura A.5 apresenta os gastos com operações sísmicas em terra e mar entre 2004 e 2012 (com estimativa para 2013). É possível ver que as despesas combinadas de terra e mar mais que triplicaram em menos de 10 anos, entre 2004 e 2012. Se nos fixarmos apenas na sísmica marítima, as despesas praticamente quadruplicaram. Motivos que podem explicar tal alavancagem

A. Questões Econômicas sobre o Mercado de Petróleo

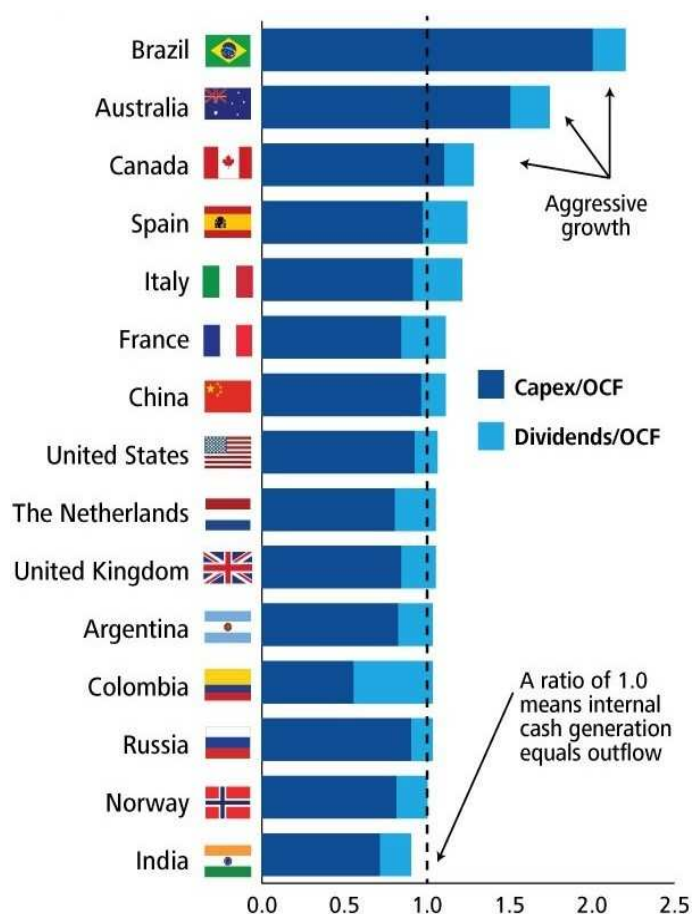


Figura A.4: Investimentos em diferentes países na cadeia de E&P [63].

podem ser a necessidade de descobertas de novos campos e monitoramento dos já existentes, complexidade cada vez maior das aquisições, para atenderem a maiores desafios operacionais e tecnológicos, além das inúmeras técnicas tanto do ponto de vista geofísico quanto do ponto de vista de engenharia, que possibilitaram grandes avanços na qualidade dos dados sísmicos.

Mesmo com um cenário atual adverso principalmente por conta da baixa no preço do barril tanto quanto por instabilidades geopolíticas, como a gerada pela Guerra na Síria e tensões correlatas, a exploração de petróleo não dá indícios de que irá mudar de rumos nem ter sua malha energética substituída por outra fonte. A saída mais provável é de que as empresas passarão por profundas mudanças que visarão se adaptarem ao cenário de menos investimentos. Isto, pelo lado positivo, forçará com que novas saídas tecnológicas sejam estudadas e desenvolvidas a fim de otimizar os esforços.

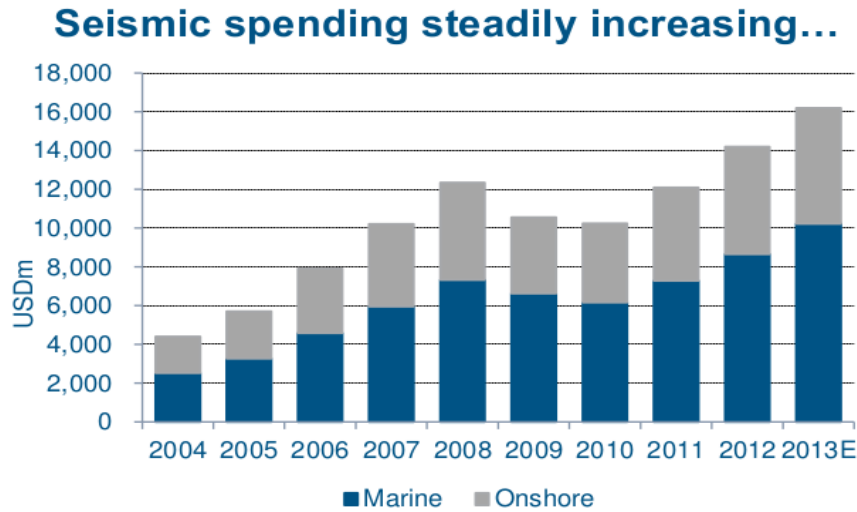


Figura A.5: Gastos com sísmica, mostrando acentuado crescimento desde 2004 [66].

A.1 Energias Renováveis

Para não deixar passar em branco a emergência das energias renováveis, abaixo, na Figura A.6, é mostrado a diversificação na matriz energética de combustíveis líquidos. É de se destacar o incipiente surgimento das energias renováveis, como os biocombustíveis, a partir dos anos 2000. É salutar os esforços neste sentido, o que pode gerar alternativas ao consumo da matriz petrolífera fóssil, gerando ganhos em desenvolvimento tecnológico, econômico, ambiental, dentre outros. No entanto, é possível ver que não há uma tendência de substituição da matriz atual, não renovável e fóssil, por uma matriz renovável. Isto muito se deve à vasta aplicação da matriz fóssil, que se estende à indústria têxtil, de polímeros, lubrificantes, asfáltica, fertilizantes, etc.

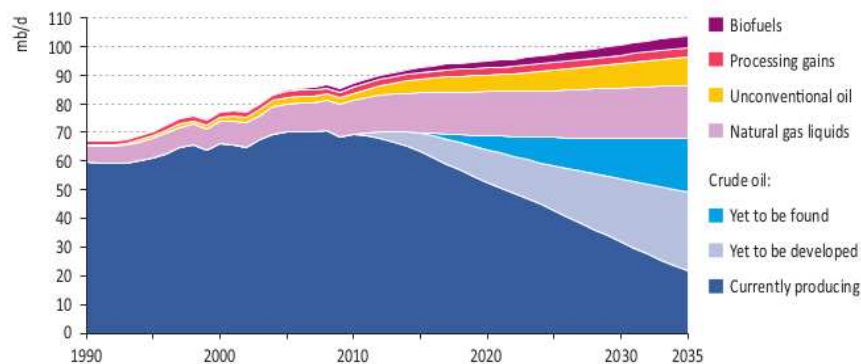


Figura A.6: Fornecimento de combustível líquido [64].

Referências Bibliográficas

- [1] Heinrich Soffel, “*Johann von Lamont: A Pioneer in Geomagnetism*”, Eos, Transactions, American Geophysical Union **87** (25), 247 (2006).
- [2] W. M. Telford, L. P. Geldart and R. E. Sheriff, “*Applied Geophysics*”, 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge (1990).
- [3] P. Kearey, M. Brooks and I. Hill, “*An Introduction to Geophysical Exploration*”, 3rd Edition, Blackwell Science Ltd (2002).
- [4] B. Dragoset and J. Gabitzsch, “*Introduction to this special section: Low-frequency seismic*”, The Leading Edge **26** (1), 34-35 (2007).
- [5] D. F. Halliday, “*Source-side deghosting: A comparison of approaches*”, 83rd Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 67-71 (2013).
- [6] D. H. Carlson, A. Long, W. Söllner, H. Tabti, R. Tengerhahn and N. Lunde, “*Increased resolution and penetration from a towed dual-sensor streamer*”, First Break **25** (12), 71-77 (2007).
- [7] N. Moldoveanu, L. Combee, M. Egan, W. Abriel and G. Hampson, “*Over/under towed-streamer acquisition: A method to extend the seismic bandwidth to both higher and lower frequencies*”, 76th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 10-15 (2006).
- [8] R. Soubaras and Y. Lafet, “*Variable-deph streamer acquisition - Broadband data for imaging and inversion*”, 81st Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 4349-4353 (2011).

Referências Bibliográficas

- [9] F. ten Kroode, S. Bergler, C. Corsten, J. W. de Maag, F. Strijbos and H. Tijhof, “*Broadband seismic data - The importance of low frequencies*”, *Geophysics* **78** (2), WA3-WA14 (2013).
- [10] A. J. Berkhout, “*Blended Acquisition with dispersed source arrays*”, *Geophysics* **77** (4), A19-A23 (2012).
- [11] F. A. Apolonio, D. H. T. Franco and F. N. Fagundes, “*A Note on Directional Wavelet Transform: Distributional Boundary Values and Analytic Wavefront Sets*”, *Int. J. Math. and Math. Sc.* **2012** 758694, 11 pp. (2012).
- [12] G. T. Schuster, “*Basics of Seismic Wave Theory*”, University of Utah (2007), http://utam.gg.utah.edu/tomo06/06_seg/basicseisbook.pdf.
- [13] B. J. Merchant, “*MEMS Applications in Seismology*”, Sandia National Laboratories (2009), http://www.iris.edu/hq/instrumentation_meeting/files/pdfs/MEMS_Seismology.pdf.
- [14] M. A. Gallotti Guimarães, “*Ocean bottom nodes*”, Geonunes, <http://www.subseauk.com/documents/presentations/geonunes%20-%20%20marcos%20a.%20gallotti.pdf>.
- [15] J. D. Robertson, “*Reservoir management using 3-D seismic data*”, *Geophysics* **41** (07), 25-31 (1989).
- [16] A. R. Romanelli Rosa, “*Análise do Sinal Sísmico*”, SBGf, Rio de Janeiro (2010).
- [17] Figura disponível em http://www.rigzone.com/training/insight.asp?insight_id=303&c_id=18.
- [18] Figura disponível em <http://www.oilinuganda.org/features/environment/uganda-pioneers-3d-seismic-surveys.html>.
- [19] T. Elboth, “*Noise in Marine Seismic Data*”, PhD Thesis, Norway (2010), http://www.folk.uio.no/thomae/phdThesis/Elboth_phdthesis.pdf.

Referências Bibliográficas

- [20] R. Portugal, “*Introdução ao Método da Sísmica de Reflexão*”, DGRN-IG-UNICAMP (2004).
- [21] Ö. Yilmaz, “*Seismic Data Analysis*”, Society of Exploration Geophysics, 2nd Edition (2001).
- [22] S. Chopra and K. Marfurt, “*Causes and Appearance of Noise in Seismic Data Volumes*”, AAPG (2014), <http://www.aapg.org/publications/news/explorer/column/articleid/12428/causes-and-appearance-of-noise-in-seismic-data-volumes>.
- [23] Figura disponível em http://www.beg.utexas.edu/agi/mod04/m04_kb02.htm.
- [24] Figura disponível em http://www.ukm.my/rahim/Seismic%20Refraction%20Surveying_files/image046.jpg.
- [25] V. Červený, “*Seismic Ray Theory*”, Cambridge University Press (2001).
- [26] S. H. Gray, “*Spatial sampling, migration aliasing, and migrated amplitudes*”, Geophysics **78** (3), S157-S164 (2013).
- [27] J. Virieux and S. Operto, “*An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics*”, Geophysics **74** (6), WCC127-WCC152 (2009).
- [28] J. C. Dourado, “*Sísmica de Reflexão Parte I*”, Unesp (2007), <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/DIDATICOS/DOURADO/8-reflex%C3%A3o1.pdf>.
- [29] N. W. Driscoll and G. D. Karner, “*Deconvolving water-gun seismic data*”, Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results **121** (1991).
- [30] W. H. Dragoset, “*Air-gun array specs: A tutorial*”, The Leading Edge **9** (1), 24-32 (1990).
- [31] M. Landro, L. Amundsen and D. Barker, “*High-frequency signals from air-gun arrays*”, Geophysics **76** (4), Q19-Q27 (2011).

Referências Bibliográficas

- [32] A. Ziolkowski and G. Metselaar, “*The pressure wavefield of an airgun array*”, 54th Annual Meeting, Society of Exploration Meeting, Expanded Abstracts, 274-276 (1984).
- [33] G. Parkes and L. Hatton, “*The marine seismic source*”, Kluwer The Language of Science (1986).
- [34] M. A. Gallotti Guimarães, “*Fonte sísmica marítima*”, Documento Interno da Petrobras, Aquisição Marítima.
- [35] T. M. Krail, “*Airguns: Theory and operation of the marine seismic source*”, Course Notes for GEO-391, University of Texas at Austin (2010).
- [36] A. Ziolkowski, G. Parkes, L. Hatton and T. Haugland, “*The signature of an air gun array: Computation from near-field measurements including interactions*”, *Geophysics* **47** (10), 1413-1421 (1982).
- [37] R. M. Laws, L. Hatton and M. Haartsen, “*Computer modelling of clustered air-guns*”, *First Break* **8** (9), 331-338 (1990).
- [38] Figura disponível em <http://www.geoexpro.com/articles/2010/01/marine-seismic-sources-part-i>.
- [39] M. Farouki, A. S. Long, G. Parkes and S. Hegna, “*Broadband towed marine seismic acquisition via total system de-ghosting*”, 9th Biennial International Conference & Exposition on Petroleum Geophysics, 101-105 (2012).
- [40] O. C. Agudo, “*Seismic source deghosting: Application to the Delta 3 source array*”, Master of Science Thesis, Delft University of Technology, ETH Zürich, RWTH Aachen University (2014).
- [41] G. Parkes and S. Hegna, “*An acquisition system that extracts the earth response from seismic data*”, *First Break* **29** (12), 81-87 (2011).
- [42] Absorção do som na água disponível em <http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/seaabsorption/>

Referências Bibliográficas

- [43] J. Caldwell and W. Dragoset “*A brief overview of seismic air-gun arrays*”, The Leading Edge **19** (8), 898-902 (2000).
- [44] S. Vaage, K. Haugland and T. Utheim, “*Signatures from single airguns*”, Geophysical Prospecting **31**, 87-97 (1983).
- [45] B. Dragoset, “*Introduction to air guns and air-gun arrays*”, The Leading Edge **19** (8), 892-897 (2000).
- [46] E&P-EXP/GEOF/AQM, “*Aquisição sísmica marítima*”, Documento Interno da Petrobras.
- [47] Figura disponível em http://oceansjsu.com/105d/exped_3D/12.html.
- [48] Figura disponível em http://www.bolt-technology.com/pages/products_longlife.htm.
- [49] Figura disponível em <http://www.sercel.com/products/Pages/g-gun.aspx>.
- [50] S. Vaage, B. Ursin and K. Haugland, “*Interaction between airguns*”, Geophysical Prospecting **32** (4), 676-689 (1984).
- [51] J. F. Hopperstad, R. Laws and E. Kragh, “*Hypercluster of airguns - more low frequencies for the same quantity of air*”, 74th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2012, Expanded Abstracts, Z011 (2012).
- [52] H. Shen, T. Elboth, G. Tian, J. Warszawski and D. Lilja, “*Theoretical study on multi-level source*”, Geophysical Prospecting **62** (6), 1337-1352 (2014).
- [53] A. J. Berkhout, G. Blacquièrre and E. Verschuur, “*From simultaneous shooting to blended acquisition*”, SEG Las Vegas 2008 Annual Meeting, Expanded Abstracts (2008).
- [54] G. Berkhout, “*Decentralized blended acquisition*”, SEG Houston 2013 Annual Meeting, Expanded Abstracts (2013).
- [55] G. Blacquièrre and G. Berkhout, “*Robotization in seismic acquisition*”, SEG Houston 2013 Annual Meeting, Expanded Abstracts (2013).

Referências Bibliográficas

- [56] G. Hampson, J. Stefani and F. Herkenhoff, “*Acquisition using simultaneous sources*”, The Leading Edge **27** (7), 918-923 (2008).
- [57] M. Caporal, G. Blacqui re and A. J. Berkhout, “*Seismic acquisition with dispersed source arrays: first results*”, SEG New Orleans Annual Meeting, Expanded Abstracts (2015).
- [58] M. Caporal and G. Blacqui re, “*Multi-level blending by using the Dispersed Source Arrays (DSA) concept*”, Delphi consortium meeting (2015).
- [59] G. Cambois, A. Long, G. Parkes, T. Lundsten, A. Mattsson and E. Fromyr, “*Multi-level airgun array - a simple and effective way to enhance the low frequency content of marine seismic*”, 74th EAGE Conference & Exhibition, Expanded Abstracts, S001 (2009).
- [60] H. Shen, T. Elboth, G. Tian, J. Warszawski and D. Lilja, “*Theoretical study on multi-level source*”, SEG Technical Program Expanded Abstracts, Annual Meeting, 61-66 (2013).
- [61] R. Telling, S. E. Denny, S. Grion and G. Williams, “*Evaluation of a marine broadband slanted source*”, Second EAGE/SBGf Workshop, Expanded Abstracts, Tu B03 (2014).
- [62] D. Barker and M. Landro, “*Estimation of bubble time period for air-gun clusters using potential isosurfaces*”, Geophysics **78** (4), P1-P7 (2013).
- [63] J. England, G. Bean and A. Mittal, “*Following the capital trail in oil and gas*”, Deloitte Center for Energy Solution, Deloitte University Press (2015), <http://dupress.com/articles/capital-investment-in-oil-and-gas-sector/>.
- [64] Relatório T cnico, “*World Energy Outlook 2011*”, Office of the Chief Economist, International Energy Agency - IEA (2011), https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2011_WEB.pdf.

Referências Bibliográficas

- [65] Relatório Técnico, “*Global 2014 E&P Spending Outlook*”, Barclays Research (2013), <http://www.pennenergy.com/content/dam/Pennenergy/online-articles/2013/December/Global%202014%20EP%20Spending%20Outlook.pdf>.
- [66] R. Hobbs and K. Johansen, “*Pareto Oil & Offshore Conference*”, TGS (2013), http://www.tgs.com/uploadedFiles/CorporateWebsite/Modules/Investor_Related/Company_Presentation/Pareto-Oil-and-Offshore-Conference-2013.pdf.