

DECOMPOSIÇÃO ACÚSTICA ROBUSTA NO PROCESSAMENTO  
SÍSMICO DE FUNDO OCEÂNICO

RAONÍ DE CARVALHO COSTA ALVES

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE LABORATÓRIO  
DE ENGENHARIA E EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO

MACAÉ - RJ  
JULHO - 2021

# DECOMPOSIÇÃO ACÚSTICA ROBUSTA NO PROCESSAMENTO SÍSMICO DE FUNDO OCEÂNICO

RAONÍ DE CARVALHO COSTA ALVES

Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Reservatório e de Exploração.

Orientador: Prof. Sérgio Adriano Moura Oliveira, DSc.

MACAÉ - RJ  
JULHO - 2021

**FICHA CATALOGRÁFICA PREPARADA PELA BIBLIOTECA DO LENEP**

622.1592  
A474d  
2021

Alves, Raoní de Carvalho Costa

Decomposição acústica robusta no processamento sísmico de fundo oceânico / Raoní de Carvalho Costa Alves. --- Macaé: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo, 2021.

xiii, 77 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reservatório e de Exploração)

Orientador: Sérgio Adriano Moura Oliveira.

Bibliografia: f. 53-54

1. Soma PZ 2. Wiener-Levinson 3. IRLS 4. Fantasma 5. *Peg-leg* I. Título.

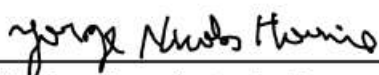
# DECOMPOSIÇÃO ACÚSTICA ROBUSTA NO PROCESSAMENTO SÍSMICO DE FUNDO OCEÂNICO

RAONÍ DE CARVALHO COSTA ALVES

Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Reservatório e de Exploração.

Aprovada em 20 de julho de 2021.

Comissão examinadora:



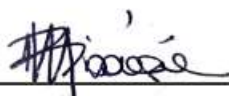
---

Jorge Nicolas Hounie (D.Sc., Engenharia de Reservatório e de Exploração) - PETROBRAS



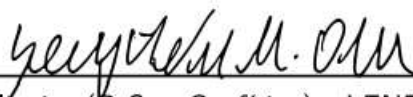
---

Fernando Sérgio de Moraes, (Ph.D, Geofísica) - LENEP/CCT/UENF



---

Roseane Marchezi Misságia, (D.Sc., Engenharia de Reservatório e de Exploração) -  
LENEP/CCT/UENF



---

Sérgio Adriano Moura Oliveira (D.Sc., Geofísica) - LENEP/CCT/UENF (Orientador)



*Este trabalho é dedicado aos geocientistas em geral,  
os quais se dedicam em decifrar a Terra mediante modelos plausíveis.*

# Agradecimentos

PETROBRAS por conceder a oportunidade de desenvolver este trabalho junto ao Programa de Pós-Graduação do LENEP/UENF.

Ao corpo técnico da Secretaria e da Coordenação do Programa de Pós-Graduação do LENEP/UENF pelo suporte burocrático.

A ANP, pela disponibilização dos dados para estudo na universidade.

Professor D.Sc. Sérgio Adriano Moura Oliveira, pela orientação.

Ao professor Ph.D Fernando Sérgio de Moraes, à professora D.Sc. Roseane Marchezi Misságia e o consultor D.Sc. Jorge Nicolas Hounie por aceitarem o convite de participação da banca de defesa, pela revisão da dissertação, pelo prestígio e apreciação.

Aos integrantes da banca do projeto, professor D.Sc. Marco Antonio Rodrigues de Ceia e o D.Sc. Irineu de Azevedo Lima Neto.

Aos colegas que contribuíram com o desenvolvimento do trabalho, em especial Adriano de Pinho Lima, Anderson Franco e Marcella Rapinni Braga, fornecendo insumos, sugestões e *feedbacks*.

*“O que faço é uma gota no meio do oceano;  
todavia sem ela, o oceano seria menor.”  
(Anjezë Gonxhe Bojaxhiu)*

# Resumo

O processamento da onda compressional, a partir das componentes acústicas de dados sísmicos de fundo oceânico, é executado mediante a decomposição do campo de ondas compressional em suas componentes ascendente e descendente, permitindo o tratamento das múltiplas de primeira ordem, compostas pela sobreposição entre o fantasma e a *peg-leg* do receptor. A separação destes campos pode ser efetuada através de somas adaptativas entre as componentes do hidrofone e do geofone, normalmente desenvolvidas sob o senso dos mínimos quadrados. Este método de separação do campo de onda é conhecido como soma PZ, uma vez que consiste numa operação entre a pressão e a componente vertical da velocidade de partícula. Contudo, devido a diferentes aspectos entre os registros daqueles sensores, situações que violam as premissas dos mínimos quadrados podem ocorrer, sendo contornadas por uma abordagem mais robusta como o filtro de norma  $L_1$  estimado pelo método IRLS (*Iterative Reweighted Least Square*). A robustez do filtro foi comprovada em somas adaptativas para atenuação de múltiplas modeladas em dados sintéticos e dados reais do tipo *streamer*, motivando a substituição do filtro de mínimos quadrados pelo de norma  $L_1$  na formulação da soma PZ. Essa abordagem foi comparada com a decomposição acústica utilizando os mínimos quadrados, em um dado OBC na área de Jubarte, na bacia do Espírito Santo, apresentando melhorias nos resultados quando a janela de estimativa do filtro continha múltiplas, suficientes para recomendar o método como opção robusta durante o processamento sísmico de fundo marinho.

**Palavras-chave:** Soma PZ. Wiener-Levinson. IRLS. Fantasma. *Peg-leg*.

# Abstract

The processing of compressional waves from the acoustic components of ocean bottom seismic data is performed decomposing the compressional wavefield on its upgoing and downgoing components, treating the first order multiples, composed by the overlap between the receiver ghost and peg-leg. The separation of these wavefields is achieved through the adaptive summation of the hydrophone and geophone components, usually on a least square sense. This method of separation is known as PZ summation, because it involves an operation between pressure and vertical particle velocity measurements. However, due to the difference in response of the pressure and velocity sensors, the premises assumed on the least square summation can be violated, degrading the results. To overcome these difficulties, a more robust sum can be achieved using the L1 norm criterion for the adaptive sum, estimated with the IRLS (Iterative Reweighted Least Square) method. The robustness of the L1 norm sum was demonstrated with applications on the adaptive sum to attenuate multiples on synthetic and real streamer data. The L1 norm sum was applied on the PZ summation of OBC data from the Jubarte Area, showing improvements when compared with the least square summation when the window estimation for the filter contained multiples, thus recommending the method as a robust option for the PZ summation of ocean bottom seismic data.

**Keywords:** PZ Summation. Wiener-Levinson. IRLS. Ghost. Peg-leg.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Família de receptor comum . . . . .	4
Figura 2 – Campos de onda registrados no fundo do mar. . . . .	6
Figura 3 – Campos unidimensionais ascendente e descendente. . . . .	7
Figura 4 – Fantasmas no hidrofone e no geofone. . . . .	10
Figura 5 – Espectros do hidrofone e do geofone com fantasmas. . . . .	11
Figura 6 – Geometria do fantasma. . . . .	12
Figura 7 – Assíntota da norma $L_1$ . . . . .	14
Figura 8 – Soma adaptativa com ruído não-gaussiano. . . . .	15
Figura 9 – Parâmetros de aquisição <i>streamer</i> . . . . .	16
Figura 10 – Correção de NMO no CMP deconvolvido. . . . .	17
Figura 11 – Famílias CMP de entrada para soma adaptativa. . . . .	18
Figura 12 – Famílias CMP resultantes da soma adaptativa. . . . .	18
Figura 13 – Diferenças entre a entrada e as saídas das somas adaptativas. . . . .	19
Figura 14 – Empilhamentos dos CMP originais e modelo RADON com artefatos. . . . .	19
Figura 15 – Empilhamentos dos resultados das somas adaptativas. . . . .	20
Figura 16 – Famílias CMP de entrada para soma adaptativa sem artefatos. . . . .	21
Figura 17 – Famílias CMP resultantes das somas adaptativas sem artefatos. . . . .	21
Figura 18 – Diferenças entre a entrada e as saídas das somas adaptativas. . . . .	22
Figura 19 – Empilhamentos dos CMP originais e modelo RADON sem artefatos. . . . .	22
Figura 20 – Empilhamento dos resultados das somas adaptativas sem artefatos. . . . .	23
Figura 21 – Convergência IRLS. . . . .	25
Figura 22 – Fluxograma de processamento. . . . .	27
Figura 23 – Linha de receptores. . . . .	29
Figura 24 – Signature no hidrofone. . . . .	30
Figura 25 – Signature no acelerômetro. . . . .	30
Figura 26 – Pulsos resultantes do <i>signature</i> . . . . .	31
Figura 27 – Corta-baixa e anti-alias no hidrofone. . . . .	32
Figura 28 – Integração do acelerômetro. . . . .	33
Figura 29 – Janela longa para estimativa dos filtros. . . . .	35
Figura 30 – Resultados do <i>crossghosting</i> . . . . .	36
Figura 31 – Estimativa de filtro para <i>degghosting</i> com janela longa. . . . .	37
Figura 32 – Estimativa de filtro Wiener-Levinson para <i>degghosting</i> com janela longa. . . . .	37
Figura 33 – Estimativa de filtro IRLS para <i>degghosting</i> com janela longa. . . . .	38
Figura 34 – Detalhe sobre seções empilhadas. . . . .	38
Figura 35 – Janela curta para estimativa dos filtros. . . . .	39
Figura 36 – Estimativa de filtro para <i>degghosting</i> com janela curta. . . . .	40

Figura 37 – Estimativa de filtro Wiener-Levinson para <i>deghosting</i> com janela curta. . .	40
Figura 38 – Estimativa de filtro IRLS para <i>deghosting</i> com janela longa. . . . .	41
Figura 39 – Receptor Comum de hidrofone e acelerômetro. . . . .	42
Figura 40 – Receptores resultantes do <i>deghosting</i> . . . . .	43
Figura 41 – Empilhamentos resultantes do <i>deghosting</i> . . . . .	44
Figura 42 – Detalhe dos empilhamentos resultantes do <i>deghosting</i> . . . . .	45
Figura 43 – <i>Deghosting</i> com Wiener-Levinson de janela longa. . . . .	46
Figura 44 – <i>Deghosting</i> com IRLS de janela longa. . . . .	47
Figura 45 – Receptores resultantes do <i>deghosting</i> com janela curta. . . . .	47
Figura 46 – Empilhamentos resultantes do <i>deghosting</i> de janela curta. . . . .	48
Figura 47 – <i>Deghosting</i> com Wiener-Levinson de janela curta. . . . .	48
Figura 48 – <i>Deghosting</i> com IRLS de janela curta. . . . .	49
Figura 49 – <i>Depeglegging</i> no receptor. . . . .	49
Figura 50 – <i>Depeglegging</i> no receptor empilhado. . . . .	49
Figura 51 – Evolução do dado. . . . .	50
Figura 52 – Geometria de Fundo Marinho . . . . .	55
Figura 53 – Absissa do Refletor . . . . .	56
Figura 54 – Classificação das múltiplas por superfície. . . . .	68
Figura 55 – Classificação das múltiplas por período. . . . .	69
Figura 56 – Sub-classificação das múltiplas. . . . .	70
Figura 57 – Fantasmas de fonte e receptor. . . . .	70
Figura 58 – Fantasma e <i>peg-leg</i> do receptor. . . . .	71

# Lista de abreviaturas e siglas

CMP	<i>Common Mid Point</i>
IRLS	<i>Interactive Reweighted Least Square</i>
NMO	<i>Normal Moveout</i>
OBC	<i>Ocean Bottom Cable</i>
OBN	<i>Ocean Bottom Nodes</i>
SRME	<i>Surface-Related Multiple Elimination</i>



# Lista de símbolos

$\cos$	função cosseno
$*$	convolução: operação de filtragem linear
$\otimes$	correlação
$\nabla$	operador nabla
$\frac{\partial}{\partial \cdot}$	operador de diferenciação parcial em relação uma variável arbitrária
$\mathbb{N}$	conjunto dos números naturais
$\mathbb{Z}$	conjunto dos números inteiros
$\mathbb{R}^n$	conjunto dos números reais de $n$ dimensões
$\mathbb{R}^*$	conjunto dos números reais de sem o 0.
$\mathbb{R}_+$	conjunto dos números reais positivos
$\forall$	para todos os valores de uma certa variável
<b>for</b>	início de ciclo iterativo ( <i>loop</i> )
<b>end</b>	final de ciclo iterativo ( <i>loop</i> )

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAIS TEÓRICOS</b>	<b>4</b>
2.1	Processamento sísmico de fundo oceânico	4
2.2	Múltiplas em sísmica de fundo oceânico	6
2.3	Decomposição em campos Ascendente e Descendente	8
2.3.1	Tratamento da <i>peg-leg</i>	12
2.4	Robustez da Minimização da Norma $L_1$	13
2.4.1	Soma adaptativa em Dado Sintético	14
<b>3</b>	<b>SOMA ADAPTATIVA ROBUSTA EM DADO <i>STREAMER</i></b>	<b>16</b>
3.1	Descrição do Dado	16
3.2	Comparação entre os filtros IRLS e Wiener-Levinson	17
<b>4</b>	<b>SOMA PZ ROBUSTA</b>	<b>24</b>
4.1	Atenuação robusta do fantasma	24
4.2	Atenuação robusta da <i>peg-leg</i>	25
4.3	Aplicação em dados <i>OBC</i>	26
4.3.1	Pré-Condicionamento dos Dados – <i>Designature</i>	28
4.3.2	Atenuação do Fantasma – <i>Deghosting</i>	31
4.3.3	Atenuação da <i>peg-leg</i> – <i>Depeglegging</i>	33
4.3.4	Ferramentas	33
<b>4.4</b>	<b>Resultados</b>	<b>35</b>
4.4.1	<i>Deghosting</i> – Cálculo dos Filtros	35
4.4.1.1	Janela Longa	35
4.4.1.2	Janela Curta	39
4.4.2	<i>Deghosting</i> – Aplicação sobre Receptor Comum	41
4.4.2.1	Janela Longa	42
4.4.2.2	Janela Curta	44
4.4.3	Tratamento da <i>peg-leg</i>	45
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>51</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>53</b>
	<b>APÊNDICE A – GEOMETRIA DE FUNDO MARINHO</b>	<b>55</b>

<b>A.1</b>	<b>Absissa do Refletor . . . . .</b>	<b>55</b>
	<b>APÊNDICE B – SINAIS E SISTEMAS . . . . .</b>	<b>57</b>
<b>B.1</b>	<b>Convolução . . . . .</b>	<b>57</b>
<b>B.1.1</b>	<b>Caso Unidimensional 1D . . . . .</b>	<b>57</b>
<b>B.2</b>	<b>Correlação Cruzada . . . . .</b>	<b>58</b>
	<b>APÊNDICE C – RESOLUÇÃO DE SISTEMAS LINEARES . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>C.1</b>	<b>Recursão de Levinson . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>C.2</b>	<b>Sistemas triangulares . . . . .</b>	<b>60</b>
<b>C.3</b>	<b>Fatoração Cholesky . . . . .</b>	<b>61</b>
	<b>APÊNDICE D – MÉTODOS DE REGRESSÃO E ESTIMADORES . . . . .</b>	<b>62</b>
<b>D.1</b>	<b>Método dos Mínimos quadrados . . . . .</b>	<b>62</b>
<b>D.2</b>	<b>Método dos Mínimos Absolutos . . . . .</b>	<b>63</b>
<b>D.2.1</b>	<b>Método IRLS . . . . .</b>	<b>63</b>
<b>D.2.2</b>	<b>Método de Newton Discreto . . . . .</b>	<b>64</b>
	<b>APÊNDICE E – FILTRAGEM LINEAR ADAPTATIVA . . . . .</b>	<b>66</b>
<b>E.1</b>	<b>Filtro de forma convolucional . . . . .</b>	<b>66</b>
<b>E.1.1</b>	<b>Filtro de Wiener-Hopf-Levinson . . . . .</b>	<b>66</b>
<b>E.1.2</b>	<b>Filtro IRLS . . . . .</b>	<b>67</b>
	<b>APÊNDICE F – CLASSIFICAÇÃO DAS MÚLTIPLAS . . . . .</b>	<b>68</b>
	<b>ANEXO A – SUBROTINA PARA CONVOLUÇÃO . . . . .</b>	<b>72</b>
	<b>ANEXO B – SUBROTINA PARA CORRELAÇÃO . . . . .</b>	<b>73</b>
	<b>ANEXO C – SUBROTINA FORK . . . . .</b>	<b>74</b>
	<b>ANEXO D – IMPORTAÇÃO DE DADOS SU NO FORTRAN . . . . .</b>	<b>76</b>

# 1 Introdução

Em zonas de exploração petrolífera marítimas, geralmente há estruturas de produção configuradas de maneira a representar obstáculos para a aquisição sísmica convencional (*streamer*). Com o intuito de contornar estes obstáculos e aumentar o fator de recuperação de reservatórios em produção, oferecendo uma imagem sísmica de subsuperfície adequada para caracterizá-los, com cobertura menos afetada pelos obstáculos, além da otimização logística na operação de levantamento sísmico, possibilitando ampliar o intervalo de afastamentos fonte-receptor e adquirir com uma multiplicidade azimutal mais completa, bem como registrar a onda convertida com receptores multicomponentes, as aquisições multicomponentes de cabo de fundo (*OBC – Ocean Bottom Cable*) e *nodes* (*OBN – Ocean Bottom Nodes*) tem sido amplamente utilizadas pela indústria. Contudo, devido às características geométricas destas aquisições, o fluxo de processamento deve ser projetado para atendê-las adequadamente, exigindo procedimentos específicos para esse tipo de dados. Neste cenário, a decomposição do campo de onda registrado nos campos ascendente e descendente, torna-se um procedimento básico, podendo ser aplicado como procedimento inicial dentro do fluxo de processamento (VERSCHUUR *et al.*, 2003), tratando o fantasma do receptor e oferecendo insumos para atenuação das *peg-legs*, podendo ser realizada mediante a denominada soma PZ (HUGONNET *et al.*, 2011), resultado das operações com as componentes de pressão, representada pelo registro do hidrofone, e vertical da velocidade de partícula, registrada pelo geofone. Os trabalhos de Amundsen & Reitan (1995), Soubaras (1996), Beresford & Janex (1996), Verschuur *et al.* (2003), Muijs *et al.* (2004) assim como os de Muijs *et al.* (2007), Wang & Grion (2008), Edme & Singh (2009), Hugonnet *et al.* (2011), desenvolvidos ao longo de quase duas décadas, são exemplos presentes na literatura geofísica que aborda fundamentos teóricos, métodos e aplicações da decomposição em campos ascendentes e descendentes a partir dos registros de pressão e velocidade de partícula, e tratamento do fantasma e da *peg-leg* do receptor.

Verschuur *et al.* (2003) considera duas possibilidades de abordagem do problema da separação em campos ascendente e descendente: as decomposições logo acima e logo abaixo à superfície que representa o fundo do mar. Este trabalho limita-se ao caso acústico (SOUBARAS, 1996; HUGONNET *et al.*, 2011), desenvolvendo a decomposição logo acima do fundo do mar, aplicável no processamento da onda compressional cujos registros são atribuídos às componentes do hidrofone e vertical do geofone, sob uma ótica unidimensional. Os procedimentos de atenuação do fantasma se dá com a própria decomposição do dado naqueles campos, e partir disto, tem-se insumos para atenuação da *peg-leg* do receptor; esta por sua vez é atenuada a partir da aplicação do filtro preditivo obtido mediante os campos ascendente e descendente extraídos da decomposição acústica, uma vez que o campo

descendente pode ser considerado uma versão atrasada do campo ascendente (EDME; SINGH, 2009).

Soubaras (1996), Hugonnet *et al.* (2011) desenvolveram o método de tratamento do fantasma e da *peg-leg* do receptor, sob a ótica dos mínimos quadrados. No entanto, durante o processamento de múltiplas residuais em *gathers* migrados, Guitton & Verschuur (2004) demonstram que o método IRLS – *Interactive Reweighted Least Square* – (SCALES; GERSZTENKORN, 1988), baseado na minimização da norma  $L_1$ , se comporta melhor diante de situações que violam as premissas dos mínimos quadrados, durante uma soma adaptativa. Fundamentado nessas constatações, este estudo concentrou-se na avaliação do filtro adaptativo IRLS, substituindo o filtro de mínimos quadrados, durante a decomposição acústica do campo de onda registrado, constatando ligeira vantagem e robustez daquele em relação ao filtro de mínimos quadrados. Contudo, estas conclusões são garantidas quando condições espúrias são verdadeiramente presentes nos dados de entrada, o que é o caso da energia das múltiplas sobre as primárias (GUITTON; VERSCHUUR, 2004).

O texto está dividido em três capítulos, com exceção da introdução, apresentando a teoria e os experimentos, e é rematado com as considerações finais encontradas no capítulo de Conclusões. Além disso, há apêndices e anexos complementando-o para facilitar a leitura. No capítulo 2 encontramos um breve resumo teórico abordando o processamento das múltiplas em dados de fundo oceânico, definindo o ruído para esse tipo de dado e explicando como consegue-se atenuá-lo mediante a separação dos campos de onda ascendente e descendente, dada pela operação conhecida como soma PZ. Além disso, há uma introdução sobre a robustez dos estimadores que utilizam a norma  $L_1$  minimizada, em termos teóricos e fundamentada sobre um estudo prático utilizando dados sintéticos. O capítulo 3 apresenta um experimento sobre dados sísmicos reais do tipo *streamer*, corroborando com as citações que relatam a robustez da minimização da norma  $L_1$ , no qual realizou-se somas adaptativas para atenuação de múltiplas modeladas com a metodologia de RADON parabólico. Estes resultados justificaram a substituição do filtro de Wiener-Levinson pelo filtro IRLS na formulação da decomposição acústica mediante a soma PZ para tratamento dos fantasmas e *peg-leg*. Esta substituição é descrita no capítulo 4. O capítulo 4 também apresenta o experimento realizado com a metodologia robusta proposta, descrevendo as etapas de preparação do dado e o processamento realizado sobre o mesmo, assim como as ferramentas utilizadas. Os resultados do experimento são expostos e discutidos na sessão de resultados do capítulo 4. Por fim, concluiu-se que o filtro IRLS oferece resultados com qualidade superior, e embora essa superioridade se torne pequena quando se pré-condiciona adequadamente os dados de entrada, a robustez esperada foi constatada. Nos apêndices encontramos um arcabouço teórico resumido, que fundamenta o escopo da pesquisa, ajudando o leitor a compreender melhor o texto. Nos anexos foram registradas as sub-rotinas e programas FORTRAN que realizaram as operações básicas durante o processamento.

Embora a abordagem unidimensional utilizada nesta pesquisa, possa ser aplicável em famílias de receptor comum de forma satisfatória, a formulação do método pode ser generalizada para problemas multidimensionais, como publicado em Hugonnet *et al.* (2011), com intuito de desenvolver um tratamento para os ruídos mencionados que ofereça resultados que contemplem a obliquidade dos eventos sísmicos nas famílias de receptor comum.

## 2 Referenciais Teóricos

### 2.1 Processamento sísmico de fundo oceânico

Considerando dados sísmicos multicomponentes, com sensores distribuídos sobre o assoalho oceânico e fontes próximas à superfície livre, de maneira que a lâmina d'água seja extensa o suficiente para caracterizar uma assimetria geométrica significativa em relação à vertical (Figura 1), nota-se que a onda direta é registrada no mesmo tempo que a primária do fundo do mar, tornando a aplicabilidade da organização em famílias de ponto médio comum, uma aproximação inadequada, aceitável apenas em casos de afastamentos longos e refletores muito mais profundos que o fundo do mar. Estas observações, nos leva a acatar as famílias de receptor comum como um aproximação mais adequada para tratamento das reflexões de primeira chegada, no âmbito do processamento sísmico de fundo marinho.

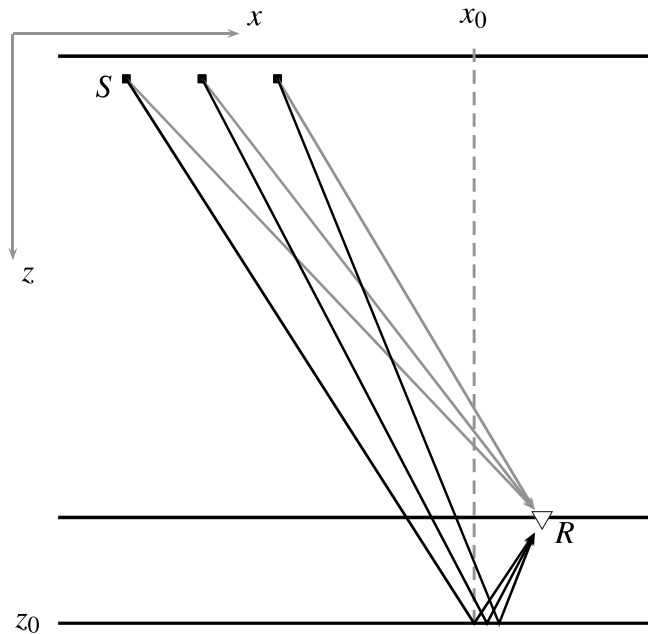


Figura 1 – Formação de uma família de receptor comum em uma aquisição com sensores de fundo marinho: fonte  $S$  localizada aproximadamente sobre a superfície livre (topo da água); receptor  $R$  localizado sobre o assoalho oceânico (base da água); refletor na profundidade  $z_0$  abaixo do fundo do mar; eixo das abscissas  $x$ ; eixo das ordenadas  $z$  (profundidade). Os raios cinzas correspondem à onda direta; os raios pretos, às reflexões primárias.

Observa-se também na Figura 1, e respeitando a lei de Snell para a reflexão, que devido à abscissa  $x_0$  do ponto refletor, abaixo do fundo do mar, ser dada por  $x_0 = [x_r(z_s - z_0) + x_s(z_r - z_0)] / (z_s + z_r - 2z_0)$ , na qual  $x_r$  e  $x_s$  são as abscissas do receptor  $R$  e da fonte  $S$  respectivamente, e  $z_r$ ,  $z_s$  e  $z_0$  as profundidades ou ordenadas do receptor  $R$ , da fonte  $S$  e do ponto refletor

abaixo do fundo mar respectivamente, os eventos apresentados em uma família de receptor comum serão referentes a pontos de reflexão que convergem para a absissa do receptor à medida em que se diminui a profundidade do refletor (apêndice A), permitindo-nos vislumbrar as estruturas geológicas da subsuperfície mediante o empilhamento de um conjunto de famílias de receptor comum sobre uma linha de receptores. Os trabalhos de Hugonnet *et al.* (2011), Wang & Grion (2008), Soubaras (1996), os quais tratam dados sísmicos multicomponentes de fundo marinho, apresentam resultados em famílias de receptor comum, para efeito de aplicação e controle de qualidade dos dados, corroborando com a premissa do uso potencial desse tipo de organização durante o processamento daquele tipo de dados.

Apresentados os aspectos geométricos dos dados sísmicos de fundo marinho, pode-se estabelecer um fluxograma básico de processamento para esse tipo de dados. Considerando que o processamento sísmico que contempla a iluminação apenas da primeira chegada pode ser dividido em algumas grandes etapas, as quais são pré-processamento, processamento ou migração, residuais, empilhamento e filtros finais ou perfumarias (ROSA, 2018), destaca-se que as peculiaridades do processamento sísmico de fundo marinho se concentrará apenas nas duas primeiras, ou seja, o pré-processamento e a migração. Após a migração, os procedimentos aplicados aos dados de fundo marinho, não empolgarão diferenças significativas em relação a dados *streamer* ou terrestres, pois considera-se que os eventos foram focados de acordo com os parâmetros elásticos adequados, que devem representar fidedignamente a geologia e as propriedades físicas de subsuperfície. Em relação à migração, a diferença se dá por conta da profundidade do receptor, que deve ser considerada dentro do algoritmo de traçado de raios ou de cálculo das tabelas de tempo de trânsito, já que não temos mais uma geometria que permita a aproximação para um percurso simétrico da onda propagada.

Diante destas considerações, pode-se afirmar que as peculiaridades mais significativas do processamento sísmico de fundo marinho se concentra na etapa de pré-processamento. Esta consiste, em suma, na preparação do dado para a migração, de maneira a atenuar os ruídos que os algoritmos de migração comuns não conseguem tratar. Concentrando-se apenas no processamento da onda compressional, sobre o qual está limitado o âmbito desta pesquisa, o dado é submetido a: atenuação de ruídos de navegação e ambientais; tratamento das assinaturas de fonte, receptor e instrumento de registro; atenuação de múltiplas a partir da separação dos campos ascendente e descendente; correções estáticas por conta da topografia do assoalho oceânico; correções de amplitude respeitando as relações decorrentes da geologia; regularização das celas da malha de processamento. Embora possa-se acrescentar ou remover algumas dessas sub-etapas de pré-processamento, o apresentado acima serve de base para orientar a construção da imagem sísmica com dados de fundo oceânico. Contudo, a separação dos campos de onda para atenuação das múltiplas merece destaque, se tornando obrigatória, uma vez que a aquisição de fundo marinho é projetada para se otimizar a atenuação destes ruídos mediante a soma de suas componentes acústicas (SOUBARAS, 1996).



## 2.2 Múltiplas em sísica de fundo oceânico

A Figura 2 mostra a projeção bidimensional de um esquema de aquisição multicomponente com sensores no fundo marinho, realçando os campos de onda ascendente e descendente, registrados sob um ângulo de incidência arbitrário, pelos receptores acústicos  $H$ , representando o hidrofone, e  $G$ , o geofone, localizados nas mesmas coordenadas sobre a interface que representa o assoalho oceânico ou base d'água. O campo ascendente é formado pelas reflexões primárias e pelas múltiplas *peg-leg* (descritas no apêndice F e em Verschuur (2006)) na subfigura à direita, enquanto o campo descendente é formado pela onda direta e os fantasmas do receptor, na subfigura à esquerda. A fonte  $S$  está localizada próxima à superfície livre, de onde são geradas as primárias e onda direta, representadas pelos raios pretos, e as múltiplas, representadas pelos raios cinzas. Esta fonte possui afastamento  $x$  do receptor multicomponente, o qual é medido sobre a projeção do par fonte-receptor sobre a superfície livre ou topo d'água.  $z$  representa a espessura da lâmina d'água.

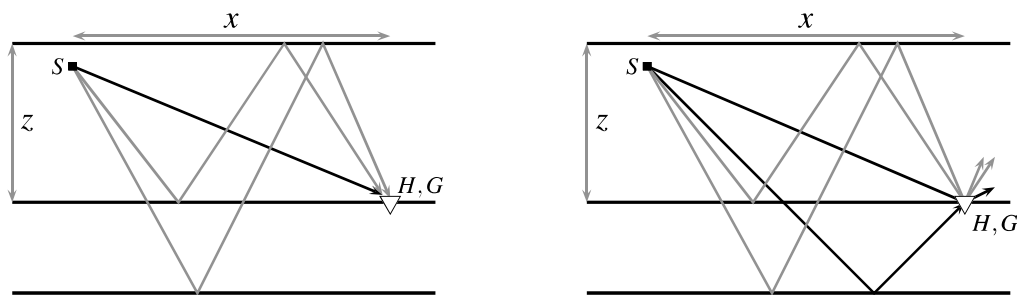


Figura 2 – Esquema ilustrando o problema físico de uma aquisição sísmica com sensores de fundo marinho (OBC ou OBN). Fonte  $S$  aproximadamente sobre o topo d'água, receptor multicomponente com hidrofone  $H$  e geofone  $G$  sobre a base d'água. À esquerda temos o campo de onda descendente formado pela onda direta (raio preto) e os fantasmas do receptor (raios cinzas); à direita temos o campo ascendente gerado pelas reflexões primárias (raios pretos) e as múltiplas *peg-leg* (raios cinzas).  $z$  é a profundidade de lâmina d'água e  $x$  o afastamento fonte-receptor (*offset*).

Prosseguindo com a ênfase no caso acústico, ou seja, no relacionamento entre a componente do hidrofone (pressão) e vertical do geofone (velocidade de partícula), e ciente que a pressão é proporcional à velocidade de partícula, justifica-se a seleção destes receptores para o estudo acústico do meio pelas seguintes considerações: devido ao hidrofone estar imerso na água, seu registro de variação de pressão é puramente de onda compressional (EDME; SINGH, 2009), e está relacionado ao processamento da onda PP (campo formado pelas frentes de onda P incidente e P refletida); considerando um refletor objetivo horizontal e profundo como alvo do imageamento sísmico, o ângulo de incidência do evento que caracteriza sua reflexão torna-se desprezível, já que diminui com a profundidade, o que permite aproximar o experimento sísmico da Figura 2 ao caso de incidência normal representado na Figura 3, concedendo à componente vertical do geofone, o registro estrito

do campo de onda compressional, uma vez que as partículas oscilam longitudinalmente à propagação do campo, permitindo a participação da componente vertical do geofone no processamento da onda PP, em conjunto com o hidrofone.

Na Figura 3 temos os campos ascendente e descendente registrados no hidrofone  $H$  e no geofone vertical  $G_z$ , para o caso de incidência vertical numa interface de refletividade  $r$ , separando água com velocidade  $v_w$  e rocha homogênea e isotrópica com velocidade  $v_r$ ;  $I_r$  e  $I_w$  são as impedâncias acústicas do material que compõe o fundo do mar, e da água, respectivamente.  $D_d$  e  $D_g$  são respectivamente os eventos descendentes referentes à onda direta e ao fantasma do receptor, os quais compõem o campo descendente;  $U_{wb}$ ,  $U_{pg}$  e  $U_p$  são respectivamente os eventos ascendentes referentes à reflexão no fundo do mar, à múltipla *peg-leg* e à reflexão primária no refletor profundo, os quais compõem o campo ascendente. Os campos pretos são considerados o sinal de interesse, enquanto os cinzas, o ruído. Embora o caso acústico se concentre na decomposição logo acima do fundo do mar, a reflexão ascendente  $U_p$  está destacada na Figura 3 para indicar que o procedimento pode ser expandido para as reflexões abaixo quando consideramos o meio acústico.

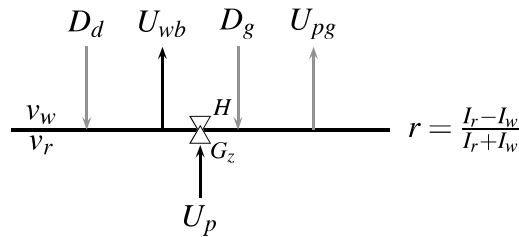


Figura 3 – Campos ascendente e descendente registrados no hidrofone  $H$  e no geofone vertical  $G_z$ , para o caso de incidência vertical numa interface de refletividade  $r$ , separando água com velocidade  $v_w$  e rocha homogênea e isotrópica com velocidade  $v_r$ ;  $I_r$  e  $I_w$  são as impedâncias acústicas do fundo do mar e da água respectivamente.  $D_d$  e  $D_g$  são respectivamente os eventos descendentes referentes à onda direta e ao fantasma do receptor, os quais compõem o campo descendente;  $U_{wb}$ ,  $U_{pg}$  e  $U_p$  são respectivamente os eventos ascendentes referentes à reflexão no fundo do mar, à múltipla *peg-leg* e à reflexão primária no refletor profundo, os quais compõem o campo ascendente. Os campos pretos são considerados o sinal de interesse, enquanto os cinzas, o ruído (adaptado de Soubaras (1996)).

Pelas Figuras 2 e 3, observa-se que o fantasma do receptor, uma vez tratando do caso de incidência vertical sobre um refletor horizontal entre dois meios acústicos, isotrópicos e homogêneos, será registrado no instante igual a três vezes o tempo da reflexão primária em relação ao início do registro, resultando em um atraso  $\Delta t = 2z/v$  em relação a primária (ROSA, 2018), onde  $z$  é a profundidade do refletor,  $v$  a velocidade de propagação da onda compressional na água, e  $\Delta t$  compreende o tempo duplo de percurso associado à reflexão na superfície livre (interface água-ar). Devido este tempo de atraso do fantasma do receptor  $\Delta t$ , as interferências destrutivas (*notches*) se distribuirão sobre bandas de frequência  $f = v/2z$ , as

quais, para espessuras de lâmina d'água comuns, se apresentam conflitantes com a banda útil do sinal primário desejado, no espectro de amplitude do dado registrado. Esta observação, nos leva a considerar a atenuação do fantasma do receptor como procedimento necessário durante o processamento, se tratando de dados sísmicos com sensores de fundo marinho (SOUBARAS, 1996).

Ainda considerando a Figura 3, além do fantasma, há o registro da reflexão *peg-leg* sobre o fundo do mar, cujo sentido de propagação é ascendente, e o tempo de registro é o mesmo do fantasma descendente. Esta sincronia faz com que a sobreposição entre o fantasma e a *peg-leg* do receptor, componha a múltipla de primeira ordem registrada com diferentes aspectos nos sensores sobre o fundo oceânico. Como os receptores estão localizados nas mesmas coordenadas, logo acima do fundo do mar, pode-se pensar em termos de uma decomposição acústica do campo de onda nas suas componentes de campo ascendente e descendente, para fundamentar e oferecer insumos ao tratamento dos fantasmas e das *peg-leg* do receptor (SOUBARAS, 1996; WANG; GRION, 2008; VERSCHUUR *et al.*, 2003; ANG *et al.*, 2010; HUGONNET *et al.*, 2011; EDMÉ; SINGH, 2009). É importante destacar que quando a separação dos registros, em suas componentes ascendente e descendente, se dá pela combinação dos campos imediatamente acima do fundo do mar, processa-se a decomposição acústica, e quando se dá pela combinação dos campos de onda logo abaixo do fundo do mar, decorre-se a decomposição elástica (VERSCHUUR *et al.*, 2003).

## 2.3 Decomposição em campos Ascendente e Descendente

Sendo  $p$  o campo de pressão, e  $\frac{\partial u_z}{\partial t}$  a velocidade de partícula, a partir da versão 2.1 da equação acústica da onda

$$-\nabla p = \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \quad (2.1)$$

pode-se deduzir a seguinte relação entre a pressão e a velocidade de partícula

$$-p = I_0 \frac{\partial u_z}{\partial t} \quad (2.2)$$

onde  $I_0 = \rho \frac{\partial z}{\partial t} = \rho v_0$  é a impedância vertical do meio no qual estão inseridos os receptores; no caso em questão da Figura 3,  $v_0 = v_w \rightarrow I_0 = I_w$  onde  $I_w$  refere-se à impedância da água.

Mediante a equação 2.2, e observando que o hidrofone é insensível ao sentido de propagação do campo (pois a pressão é uma grandeza escalar), enquanto o geofone polariza o pulso registrado de acordo com a direção e o sentido da propagação do campo (ROSA, 2018), pode-se pensar em combinar aritmeticamente essas componentes acústicas para se obter o campo decomposto. Soubaras (1996) e Edmé & Singh (2009) relacionam os registros do hidrofone  $H$  e do geofone vertical  $G$  (considerando que estes receptores captam os campos

logo acima do fundo do mar), com os campos ascendentes e descendentes para o caso acústico, de acordo com a equação 2.3 abaixo

$$\begin{aligned} H &= 2(U - D) \\ G &= \frac{2}{\rho_0}(U + D) \end{aligned} \quad (2.3)$$

onde  $U$  e  $D$  são respectivamente os campos de onda ascendente (*upgoing*) e descendente (*downgoing*).

A Figura 4, seguindo a linha apresentada em Wang *et al.* (2009), representa os registros esperados para a reflexão primária no fundo do mar e para o fantasma do receptor, no hidrofone e no geofone vertical, construídos a partir da convolução entre um pulso simétrico e os operadores dos fantasmas, modelados para ambos os sensores no domínio do tempo. A Figura 4 também mostra os eventos múltiplos resultantes da sobreposição entre o fantasma e a *peg-leg* sincrônica ao mesmo; nota-se que a oposição de polaridades entre o fantasma e a *peg-leg* reduz a magnitude do evento resultante no geofone, enquanto que aumenta no hidrofone por conta da consonância de polaridades daqueles eventos para este sensor. Os eventos múltiplos resultantes no hidrofone e no geofone ainda apresentam oposição de polaridades, provocando o cancelamento dos *notches* espectrais (Figura 5) quando realizada a soma direta destas componentes. Embora essa modelagem teórica, extraída da equação 2.3 e exposta na Figura 4, nos leve a concluir que uma soma direta entre as componentes do hidrofone e do geofone, oferece o resultado da decomposição acústica do campo de onda registrado nos campos ascendente e descendente, na prática, efeitos de acoplamentos e campos de onda diferentes sendo registrados em cada componente do receptor, além da quadratura entre os pulsos, exigem uma calibração entre as componentes de pressão e vertical da velocidade de partícula (AMUNDSEN; REITAN, 1995; SOUBARAS, 1996; VERSCHUUR *et al.*, 2003; EDME; SINGH, 2009). Estipulando que o hidrofone está localizado na água, cujo acoplamento pode ser considerado perfeito (EDME; SINGH, 2009; VERSCHUUR *et al.*, 2003), e o geofone está alojado sobre a superfície de fundo marinho, cujo acoplamento é prejudicado pela friabilidade do contato com a superfície intemperizada, as diferenças de acoplamento são notórias. Além disso, considerando uma solução harmônica da equação acústica da onda (equação 2.1), constata-se uma defasagem de  $90^\circ$  entre os pulsos da pressão e da velocidade de partícula. Diante disso, uma filtragem linear adaptativa precedendo a soma das componentes se torna uma ideia razoável, e sua efetuação é conhecida como Soma PZ (HUGONNET *et al.*, 2011), uma vez que se trata da soma adaptativa entre a componente de pressão e a vertical da velocidade de partícula. Todavia, como os *notches* do hidrofone e do geofone estão defasados entre si na frequência (Figura 5), Amundsen & Reitan (1995), Soubaras (1996) e Hugonnet *et al.* (2011) sugerem o cruzamento destes fantasmas (*crossghosting*) para sincronizar os espectros de amplitude e justificar uma filtragem linear adaptativa. O cruzamento destes fantasmas significa filtrar o hidrofone com o operador de fantasma do geofone, e o geofone, com o operador de

fantasma do hidrofone, sincronizando seus espectros e tornando a soma PZ mais eficiente. O procedimento de soma adaptativa entre hidrofone e geofone, associada ao cruzamento dos fantasmas, foi generalizado por Hugonnet *et al.* (2011), e esta descrito no seguinte sistema de equações 2.4 abaixo

$$\begin{aligned} U &= H + f_0 * G \\ D &= H - f_0 * G \end{aligned} \quad (2.4)$$

onde

$$f_0 = \operatorname{argmin} \|H' - f * G'\|_2^2 \quad (2.5)$$

e

$$\begin{aligned} H' &= g_0 * H \\ G' &= h_0 * G \end{aligned} \quad (2.6)$$

sendo  $g_0$  e  $h_0$  os operadores determinísticos dos fantasmas do geofone e do hidrofone respectivamente.

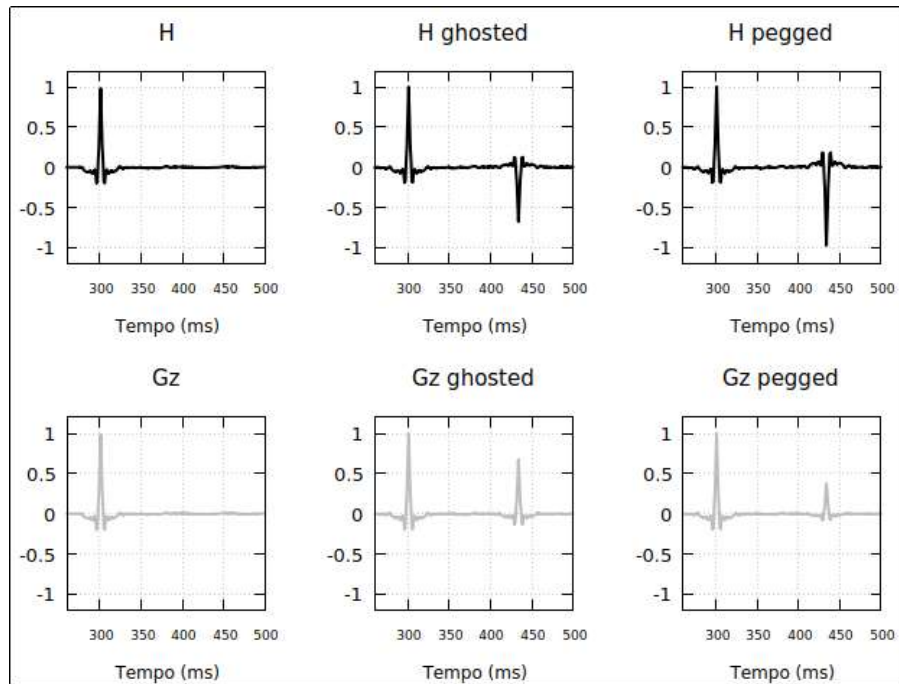


Figura 4 – Primeira linha: registro do hidrofone (traços pretos). Segunda linha: registros do geofone vertical (traços cinzas). Primeira coluna: reflexões primárias com pulso simétrico sobre o fundo do mar. Segunda coluna: resultado da convolução dos traços da primeira coluna com seus respectivos operadores de fantasmas. Terceira coluna: sobreposição das *peg-legs* (adaptado de Wang *et al.* (2009)).

Os operadores determinísticos dos fantasmas podem ser construídos, no domínio do tempo, de acordo com a metodologia descrita em Rosa (2018), a qual consiste em uma convolução com um operador contendo o produto da refletividade da superfície livre  $r \approx -1$

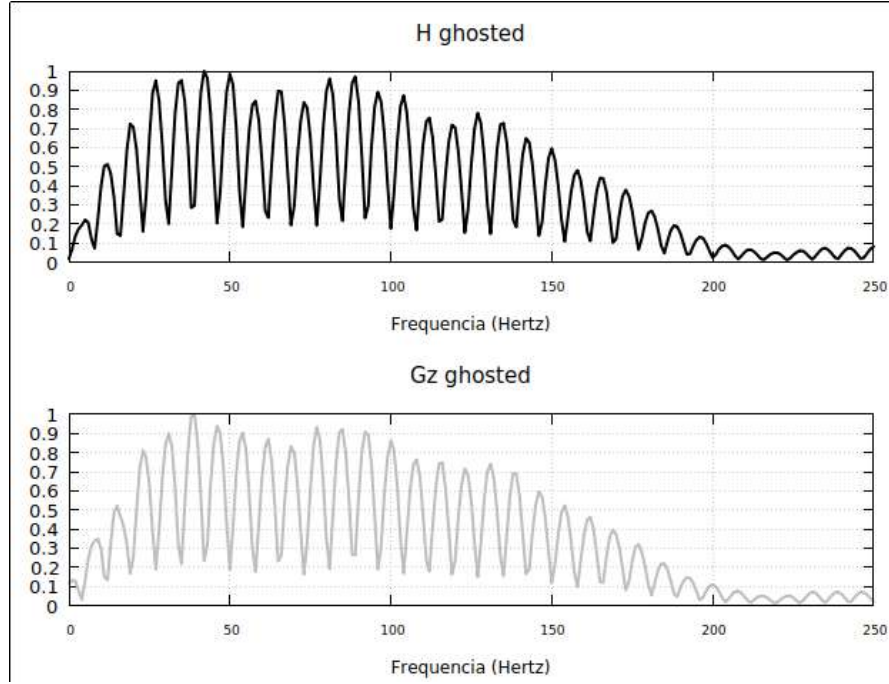


Figura 5 – Espectros de amplitudes do hidrofone (preto) e do geofone vertical (cinza), afetados por seus respectivos fantasmas. Nota-se a alternância entre os picos e vales dos *notches* em cada espectro de amplitude; como exemplo observa-se em 50Hz, um pico no hidrofone, enquanto que no geofone há um vale.

com o fator de espalhamento geométrico  $E$ , atrasados no tempo de reflexão na superfície livre de

$$\Delta t = \frac{2z \cos \theta}{v}, \quad (2.7)$$

sendo  $z$  a profundidade da lâmina d'água,  $v$  a velocidade de propagação do fantasma na água e  $\theta$  o ângulo de incidência do raio do fantasma, sendo  $\theta = 0$  para o caso vertical. A relação definida na equação 2.7 é extraída de considerações trigonométricas feitas sobre a Figura 6, a qual ilustra a geometria associada na geração do fantasma do receptor. No domínio do tempo obtemos, respeitando as observações de Amundsen & Reitan (1995), Soubaras (1996), Hugonnet *et al.* (2011) e Rosa (2018), em relação à construção dos operadores dos fantasmas para cada receptor:

$$\begin{aligned} g_0 &= \delta_t + rE\delta_{t-\Delta t} \\ h_0 &= \delta_t - rE\delta_{t-\Delta t} \end{aligned} \quad (2.8)$$

na qual  $\delta_t$  representa a função delta e  $\delta_{t-\Delta t}$  a mesma atrasada  $\Delta t$  unidades de tempo.

O método *crossghosting* apresentado acima no sistema de equações 2.6, cujos fantasmas são definidos no sistema de equações 2.8, é uma etapa pertinente na melhoria da qualidade da Soma PZ, e participa da decomposição acústica desenvolvida sob o senso do método dos mínimos quadrados, expresso na equação 2.5, sendo o filtro  $f_0$  calculado mediante a expressão 2.9

$$f_0 = [G'^T G' + \lambda I]^{-1} G'^T H', \quad (2.9)$$

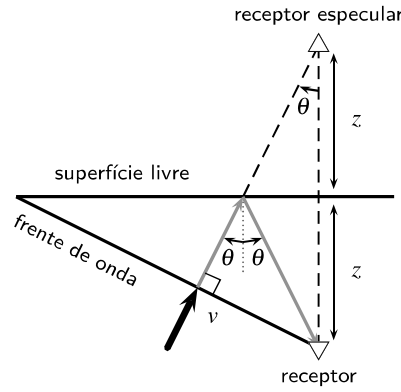


Figura 6 – Geometria associada com o atraso gerado pelo fantasma do receptor.  $z$  é a profundidade do receptor em relação a superfície livre,  $\theta$  é o ângulo de incidência entre o raio do fantasma e a normal à superfície de topo da água, e  $v$  é a velocidade de propagação da frente de onda no meio, que no caso é aquoso. Embora seja uma descrição generalizada, a situação se aplica facilmente ao caso no qual o receptor está localizado sobre o assoalho oceânico horizontal. Adaptado de Rosa (2018).

designando o filtro de Wiener-Levinson, uma vez que  $G'^T G'$  é a matriz de autocorrelação do traço, ou família de traços nos casos com mais de uma dimensão, regularizada em primeira ordem com luz branca  $\lambda$  (YILMAZ, 2001), a qual é banda-estruturada tipo Toeplitz, compõe o sistema linear de Yule-Walker e é resolvida de forma ótima mediante a recursão de Levinson (GOLUB; VAN LOAN, 1996; DUARTE, 2003; ROSA, 2018).

### 2.3.1 Tratamento da *peg-leg*

O procedimento descrito na subseção 2.3 acima, adequadamente parametrizado, é aplicado no tratamento do fantasma do receptor, descrito nas Figuras 2 e 3; no entanto, conforme exposto na Figura 4, o evento múltiplo contaminante nos traços é resultante da sobreposição entre o fantasma e a *peg-leg* (reflexão múltipla ascendente registrada simultaneamente ao fantasma). Para tratar a *peg-leg* do lado do receptor, Hugonnet *et al.* (2011), baseado no trabalho de Soubaras (1996), apresenta a solução como

$$P = U - p_0 * D, \quad (2.10)$$

onde  $P$ ,  $U$  e  $D$  são respectivamente o dado sem a *peg-leg* e os campos ascendente e descendente, enquanto  $p_0$  representa o filtro linear preditivo de Wiener-Levinson calculado a partir de  $U$  e  $D$ , de acordo com a equação 2.11 abaixo

$$p_0 = [D^T D + \lambda I]^{-1} D^T U, \quad (2.11)$$

sendo o parâmetro regularizador (luz branca) igual a  $\lambda$ .

Esta solução é baseada no trabalho de Soubaras (1996), e representa uma deconvolução preditiva, uma vez que o campo descendente pode ser considerado uma versão atrasada do campo ascendente (SOUBARAS, 1996; ANG *et al.*, 2010; EDME; SINGH, 2009; HUGONNET *et al.*, 2011). Nesta pesquisa, a equação 2.10 representa uma aproximação unidimensional e restringe-se ao tratamento da *peg-leg* do receptor.

## 2.4 Robustez da Minimização da Norma $L_1$

Enfatizando as observações anteriores em relação a natureza dos registros das componentes do hidrofone e vertical do geofone, efeitos de acoplamento, diferença nos campos registrados em cada sensor, além de sensibilidades diferentes à ruídos, oferecem sismogramas registrados com características distintas. Estas diferenças entre ambos os registros, resultam em situações que podem violar as premissas dos mínimos quadrados. As premissas dos mínimos quadrados estipulam que o pulso sísmico é de fase mínima, a razão sinal-ruído do dado é alta, e a refletividade é aleatória e estacionária (PORSANI; URSIN, 2007). Guitton & Verschuur (2004) constataram que em situações onde as premissas dos mínimos quadrados são violadas, a adoção de uma metodologia de filtragem linear robusta que contorna estas situações é adequada, sugerindo como opção minimizar a norma  $L_1$  do erro para calcular o filtro de forma, em uma soma adaptativa entre o modelo de múltiplas e o dado contaminado, mediante o método *IRLS* (*Iterative Reweighted Least Square*), conhecido por oferecer uma acurada aproximação da norma  $L_1$  e facilidade de implementação (SCALES; GERSZTENKORN, 1988; GUITTON; VERSCHUUR, 2004; OLIVEIRA; LUPINACCI, 2013; LI *et al.*, 2016).

O método *IRLS* fundamenta-se na diferenciação de uma hipérbole assintótica da norma  $L_1$  (Figura 7), uma vez que a curva da norma  $L_1$  não é diferenciável no seu ponto de mínimo. Essa aproximação permite a diferenciação no ponto de mínimo da norma, com acurácia determinada pelo parâmetro  $\varepsilon$  da curva assintótica, fornecendo uma solução iterativa para o sistema não-linear resultante do desenvolvimento daquela operação.

Por se tratar da resolução de um problema não-linear, o filtro baseado na minimização da norma  $L_1$ , também pode ser obtido pelo método de Newton discreto (RUGGIERO; LOPES, 2006), descrito na subseção D.2.2 do apêndice D. Contudo, o método *IRLS* apresenta maior facilidade de implementação que o método de Newton discreto.

Apresentado por Scales & Gersztenkorn (1988) como método robusto, ou seja, insensível à presença de ruído não-estacionário ou valores de amostras anômalos, oferecendo resultados com sentido físico isentos de artefatos provenientes de oscilações de alta frequência, optou-se por realizar experimentos de soma adaptativa com *IRLS* em traços sintéticos, e avaliar seu efeito sobre atenuação de múltiplas modeladas, agregando resultados



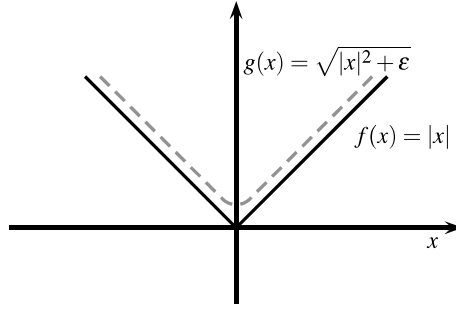


Figura 7 – Aproximação assintótica  $g(x)$  da norma  $L_1$   $f(x)$ ;  $f(x) = |x| \approx g(x) = \sqrt{|x|^2 + \epsilon}$ ,  $\forall \epsilon \in \mathbb{R}_+^* | \epsilon \approx 0$ . Esta aproximação possibilita a diferenciação numérica da norma  $L_1$  em seu ponto de mínimo.

motivadores para abordar a minimização dos desvios absolutos entre os registros do hidrofone e do geofone calibrado que participam da Soma PZ.

#### 2.4.1 Soma adaptativa em Dado Sintético

Seguindo a linha de Guitton & Verschuur (2004), optou-se por estudar os efeitos da soma adaptativa para atenuação de múltiplas utilizando o filtro de forma obtido pelo método IRLS. Portanto, modelou-se um traço  $d$ , exposto na primeira coluna da Figura 8, contaminado com múltiplas, cuja interferência é destacada pelas setas pretas sobre o traço da primeira coluna da Figura 8, e acrescido de valores anômalos de amplitude sobre amostras aleatórias, simulando um ruído não-estacionário destacado pelas setas cinza na Figura 8. Gerou-se o modelo de múltiplas  $m$  deste traço, utilizando a técnica de *SRME 1D – Surface Related Multiple Elimination 1D* (VERSCHUUR, 2006), a qual consiste no oposto da autoconvolução do traço de entrada – juntamente com uma rotação de fase de 30 graus, simulando distorções não tratadas no pulso. O traço contaminado e seu modelo de múltipla gerado, serviram de entrada para a soma adaptativa  $d - f * m = 0$ . O filtro de forma  $f$  foi obtido mediante três técnicas diferentes e seus resultados foram comparados. A Figura 8 compara os resultados destas somas adaptativas utilizando o filtro de Wiener-Levinson, técnica fundamentada na minimização da norma Euclidiana, e os filtros calculados com a minimização da norma  $L_1$  utilizando o método de Newton Discreto e o *IRLS*; os resultados expostos na Figura 8 refletem a robustez da minimização da norma  $L_1$  mediante os métodos de Newton Discreto e *IRLS*, diante de uma situação que viola as premissas dos mínimos quadrados.

Embora o método de Newton discreto tenha atingido resultado similar ao IRLS, por demandar mais operações durante a implementação, devido a avaliação iterativa da Jacobiana discreta, seu estudo limitou-se ao experimento exposto na Figura 8, escolhendo-se, portanto, o *IRLS* para desenvolver a solução robusta da equação 4.2, a qual fundamenta o estudo de decomposição acústica robusta do campo de onda registrado, em componentes ascendente e

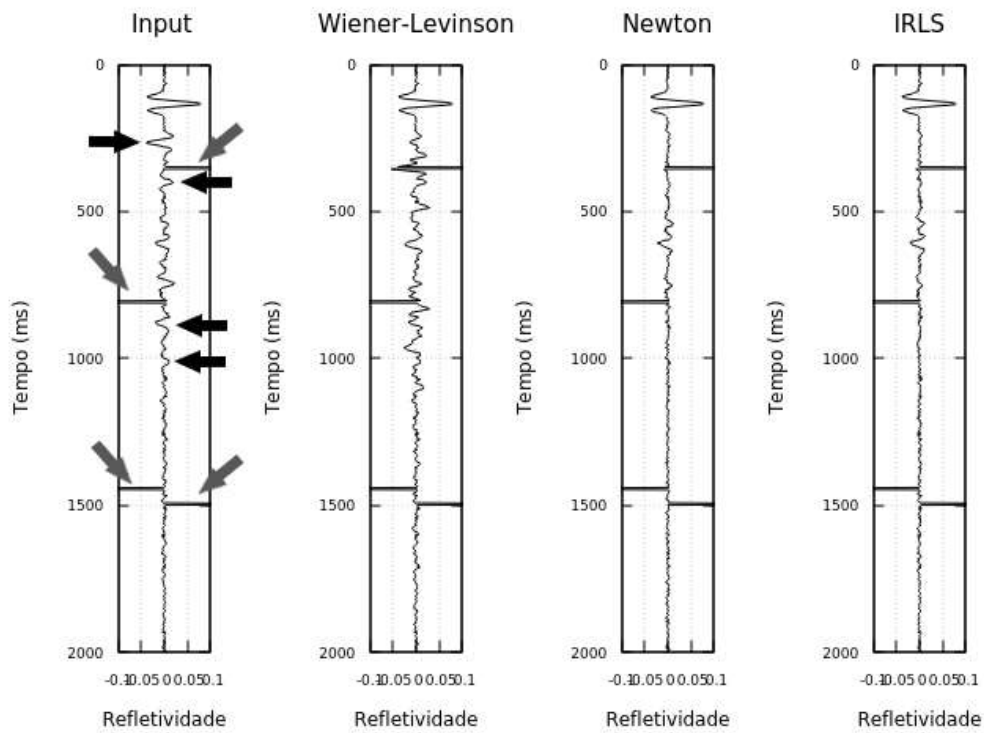


Figura 8 – Resultado das somas adaptativas entre um traço (primeira coluna) com múltiplas, indicadas pelas setas pretas, sob a presença de ruído não-gaussiano, indicado pelas setas cinza, e seu modelo de múltipla *SRME 1D* rotacionado na fase em 30 graus, usando filtros de Wiener-Levinson (segunda coluna), Newton Discreto (terceira coluna) e *IRLS* (quarta coluna).

descendente, mediante uma implementação fácil e oferecendo uma acurada aproximação da norma  $L_1$  (Figura 7).

## 3 Soma adaptativa robusta em Dado *Streamer*

### 3.1 Descrição do Dado

Para validar a robustez da minimização dos desvios absolutos em uma situação real, utilizando o método *IRLS*, testou-se a soma adaptativa traço a traço, utilizando janela cheia (traço inteiro) para estimativa dos filtros de forma, entre famílias de ponto médio comum – *CMP*, *Common Mid Point Gathers* – corrigidas de *NMO* – *Normal Moveout* (YILMAZ, 2001) – do dado *Mobil AVO viking graben line 12* (KEYS; FOSTER, 1998) e seu modelo de múltiplas RADON (YILMAZ, 2001; VERSCHUUR, 2006). Este dado foi adquirido na bacia sedimentar *North Vikings Grabens* no Mar do Norte, e possui acesso gratuito através da página da *SEG Wiki*, [https://wiki.seg.org/wiki/Open\\_data](https://wiki.seg.org/wiki/Open_data).

Trata-se de um dado sísmico marinho 2D convencional (*streamer*), com 1500 amostras por traço, com multiplicidade de 120 traços por cela, com distância de 25 metros entre receptores, distribuídos em afastamentos fonte-receptor no intervalo de 262 a 3237 metros, com profundidade de fonte de 6 metros e de receptor de 10 metros. Estes parâmetros de aquisição estão ilustrados na Figura 9.

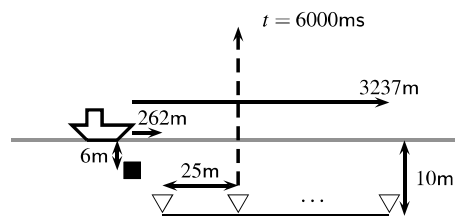


Figura 9 – Esquema de aquisição do dado *streamer* Mobil AVO viking graben line 12, mostrando os parâmetros utilizados no levantamento sísmico.

O dado foi processado de assinatura de campo remoto, utilizando a abordagem de atenuação da bolha com filtro preditivo e rotação de fase para fase zero. O campo remoto utilizado foi coletado junto com os dados sísmicos, como arquivo auxiliar, e não foi filtrado pelo operador de fantasma do receptor. Após o processamento da assinatura, o dado foi organizado em famílias de *CMP* (Figura 10) e submetido à análise de velocidades *NMO* para empilhamento. As famílias de *CMP* corrigidas de *NMO* (Figura 10), foram submetidas ao silenciamento dos estiramentos e serviram de entrada para a modelagem das múltiplas no domínio  $\tau - p$ , obtida pela transformada de RADON parabólico do *Seismic Unix*, concentrando as primárias em torno

do parâmetro de curvatura das parábolas  $p = 0$ , facilitando a discriminação dos *moveouts* das múltiplas, utilizados para modelagem das mesmas. O modelo resultante foi submetido às somas adaptativas Wiener-Levinson e *IRLS*, descritas na subseção 2.4.1, juntamente com as famílias de *CMP* após a correção de *NMO*.

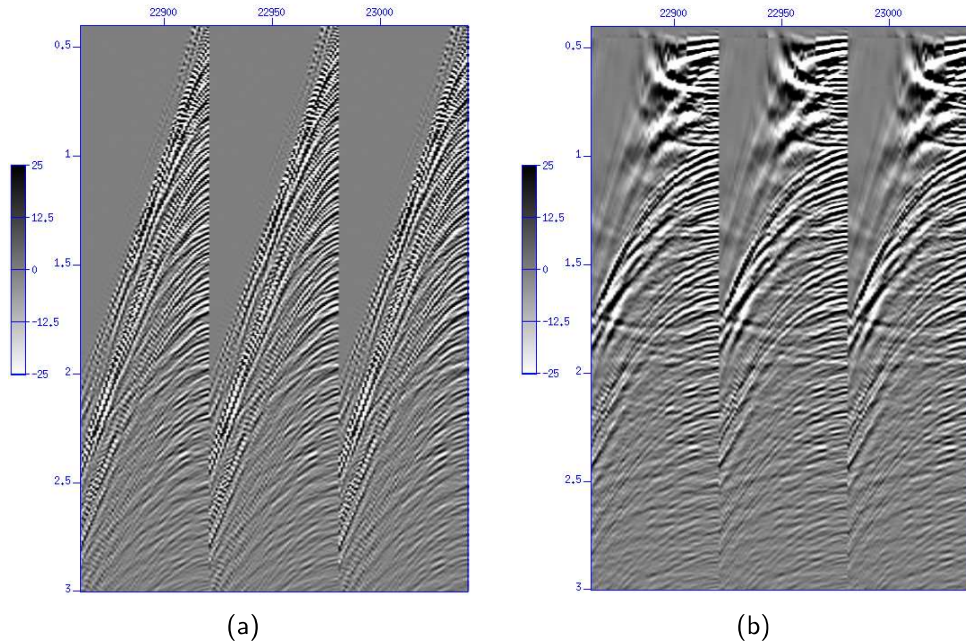


Figura 10 – Famílias de Ponto Médio Comum construídas após tratamento de assinatura de campo remoto (a), à esquerda, e correção de NMO (b), à direita.

### 3.2 Comparação entre os filtros IRLS e Wiener-Levinson

A Figura 11 ilustra os dados de entrada para as somas adaptativas Wiener-Levinson e *IRLS*, no domínio do tempo e organizados em famílias de *CMP*. A Figura 12 expõe os resultados das somas adaptativas Wiener-Levinson e *IRLS*, no domínio do tempo e organizados em famílias de *CMP*, enquanto a Figura 13 mostra a diferença entre a entrada e as saídas das somas adaptativas. As Figuras 14 e 15 mostram respectivamente, seções empilhadas dos dados de entrada e dos resultados das somas adaptativas Wiener-Levinson e *IRLS*, utilizando um modelo RADON com artefatos de modelagem acima do tempo da múltipla de primeira ordem (Sub-figuras 11(b) e 14(b)).

A Figura 16 ilustra os dados de entrada para as somas adaptativas Wiener-Levinson e *IRLS*, no domínio do tempo e organizados em famílias de *CMP*. A Figura 17 expõe os resultados das somas adaptativas Wiener-Levinson e *IRLS*, no domínio do tempo e organizados em famílias de *CMP*, enquanto a Figura 18 mostra as diferenças entre o dado antes e após as somas adaptativas. As Figuras 19 e 20 mostram respectivamente, seções empilhadas dos dados de entrada e dos resultados das somas adaptativas Wiener-Levinson e *IRLS*, utilizando

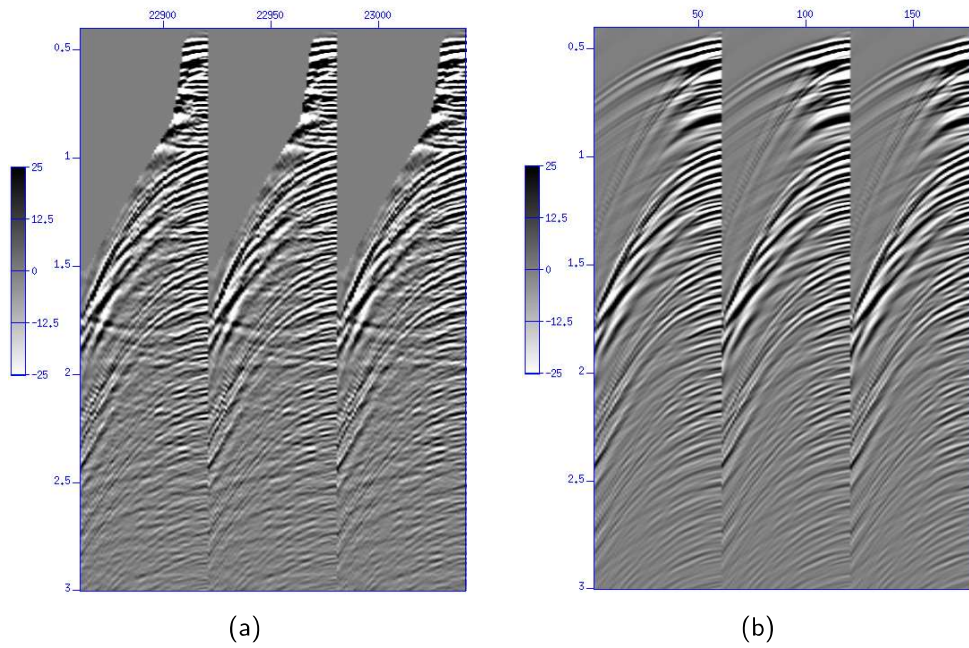


Figura 11 – Famílias de Ponto Médio Comum que serviram de entrada para as somas adaptativas utilizando Wiener-Levinson e *IRLS* na estimativa do filtro de forma, com artefatos de modelagem presentes. (a) Dado de entrada corrigido de NMO. (b) Modelo de múltiplas RADON, com artefatos de modelagem acima das múltiplas.

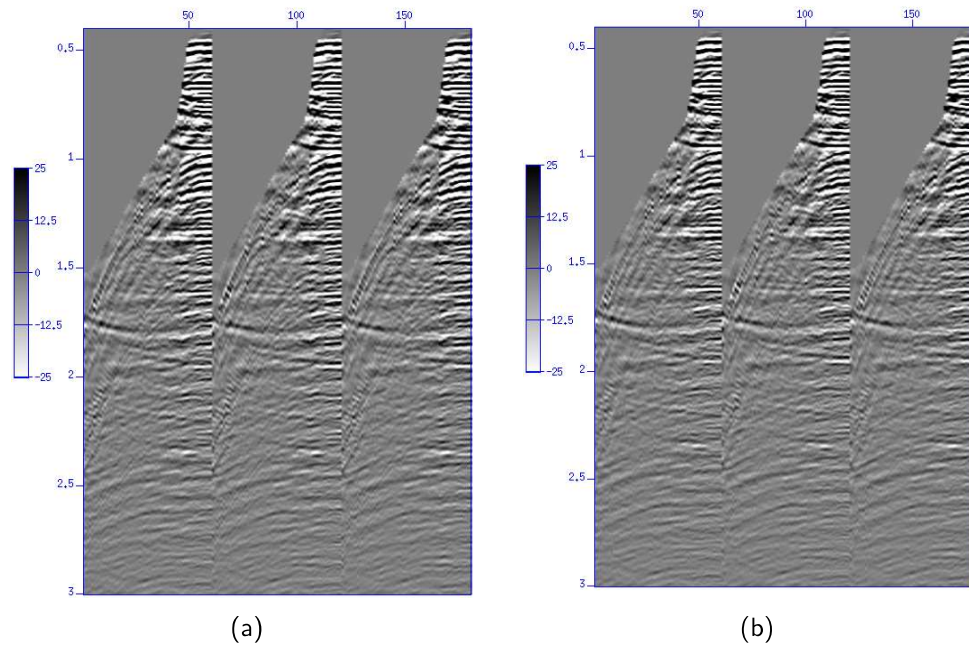


Figura 12 – Famílias de Ponto Médio Comum resultantes das somas adaptativas utilizando Wiener-Levinson (a) e *IRLS* (b) para estimar o filtro de forma, com artefatos de modelagem presentes.



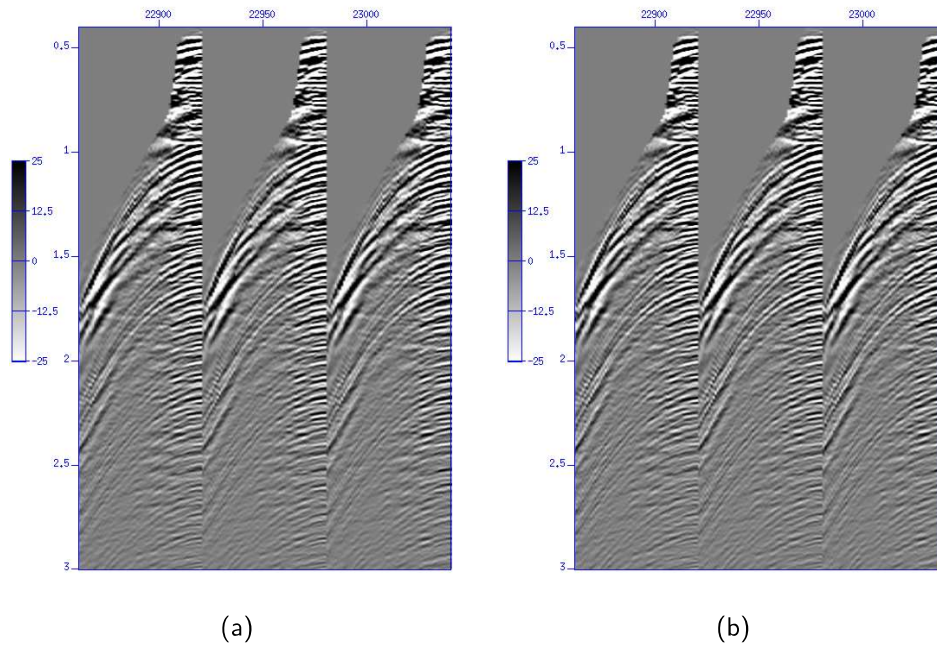


Figura 13 – Famílias de Ponto Médio Comum resultantes das diferenças entre o dado de entrada e os resultados das somas adaptativas utilizando Wiener-Levinson (a) e *IRLS* (b) para estimar o filtro de forma, com artefatos de modelagem presentes.

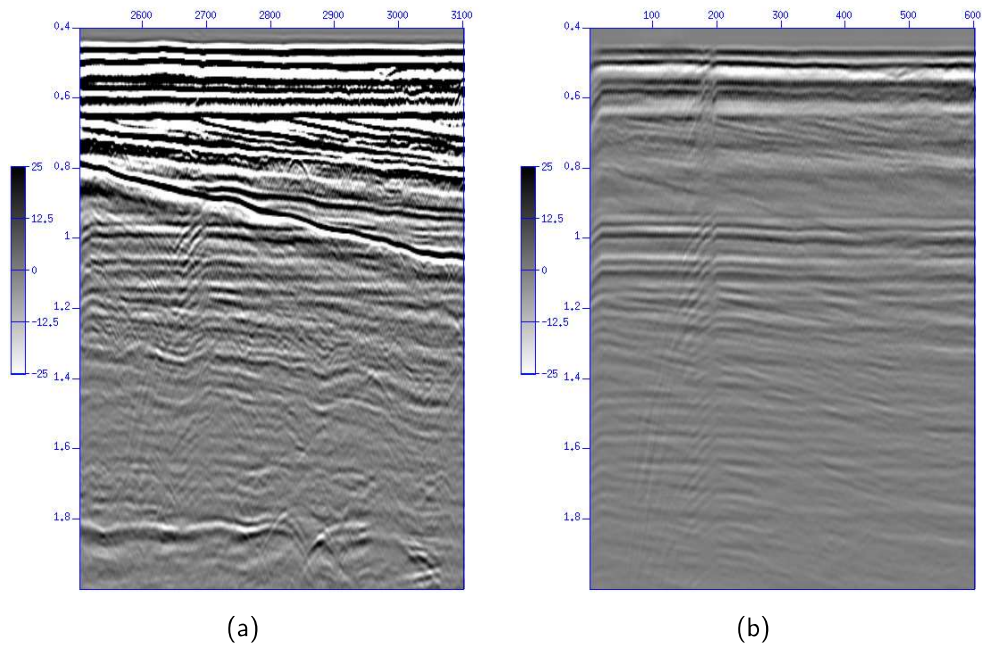


Figura 14 – Seções Empilhadas dos dados de entrada para as somas adaptativas utilizando Wiener-Levinson e *IRLS* na estimativa do filtro de forma, com artefatos de modelagem presentes. (a) Seção empilhada do dado contaminado por múltiplas. (b) Modelo de múltiplas RADON empilhado.

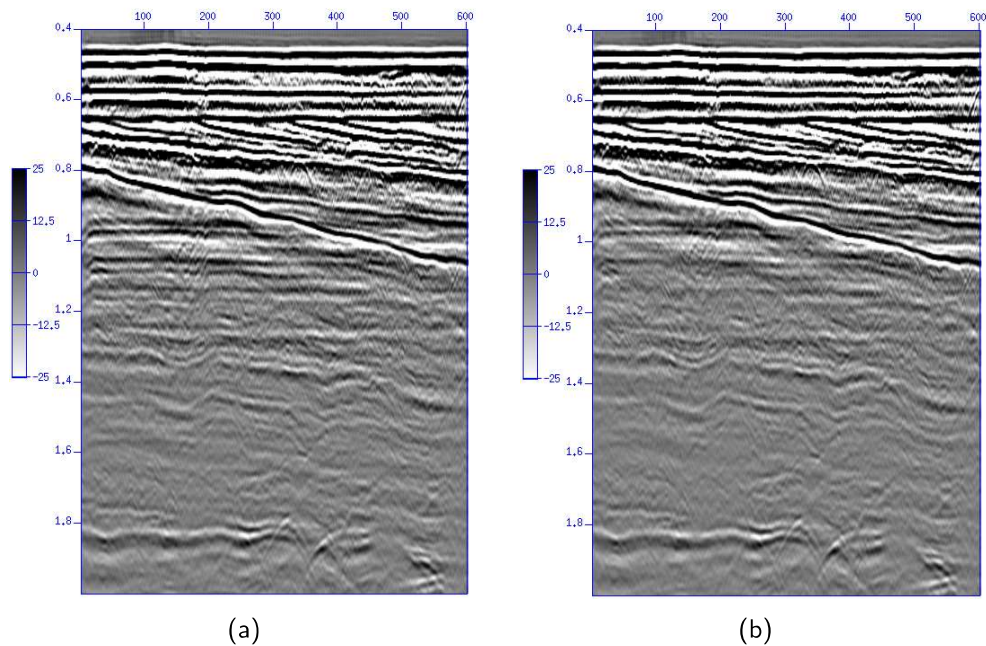


Figura 15 – Seções Empilhadas dos resultados das somas adaptativas utilizando Wiener-Levinson (a) e *IRLS* (b) para estimativa do filtro de forma, com artefatos de modelagem presentes.

um modelo RADON cujos artefatos de modelagem acima do tempo da múltipla de primeira ordem, foram tratados com um silenciamento (Sub-figuras 16(b) e 19(b)). A presença do artefato de modelagem, gerou situações que violam as premissas dos mínimos quadrados.

Pelas Figuras 11, 12, 14 e 15, percebe-se que o filtro *IRLS* se comporta de maneira mais robusta, atenuando a múltipla de forma mais eficaz que o Wiener-Levinson, tanto nas famílias de ponto médio comum quanto na seção empilhada. Contudo, com as entradas expostas nas Figuras 16 e 19, a Figura 20 expõe resultados similares nas seções empilhadas resultantes, com ligeiras diferenças nas famílias de ponto médio comum, observáveis principalmente nos traços de afastamentos longos na Figura 17. Isso pode ser explicado pela diminuição de condições que violam as premissas dos mínimos quadrados quando se silencia os artefatos do modelo de múltiplas, pelo próprio efeito atenuante de múltiplas inerente à técnica de empilhamento das famílias de ponto médio comum (YILMAZ, 2001), e pela natureza de discriminação do *moveout* da técnica de modelagem por RADON (VERSCHUUR, 2006). No entanto, os resultados obtidos corroboram com os experimentos de Scales & Gersztenkorn (1988) e Guitton & Verschuur (2004), constatando a robustez da filtragem linear com *IRLS*, e garantindo uma ligeira melhoria na qualidade dos resultados da soma adaptativa em relação ao filtro de Wiener-Levinson.

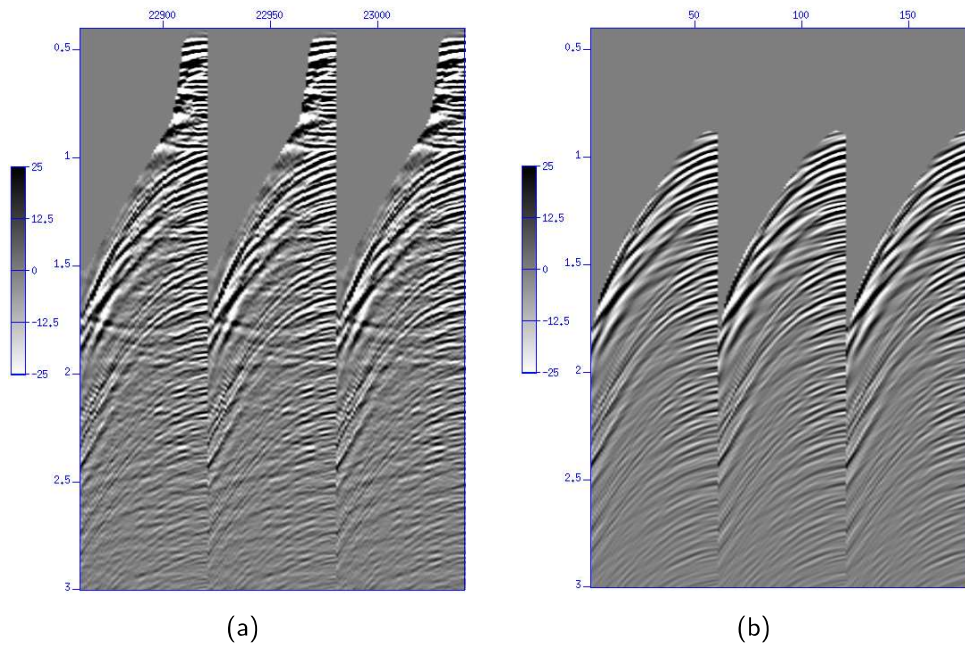


Figura 16 – Famílias de Ponto Médio Comum que serviram de entrada para as somas adaptativas utilizando Wiener-Levinson e *IRLS* na estimativa do filtro de forma, com artefatos de modelagem silenciados acima do tempo da múltipla. (a) Dados com múltiplas. (b) Modelo de múltiplas RADON com artefatos silenciados.

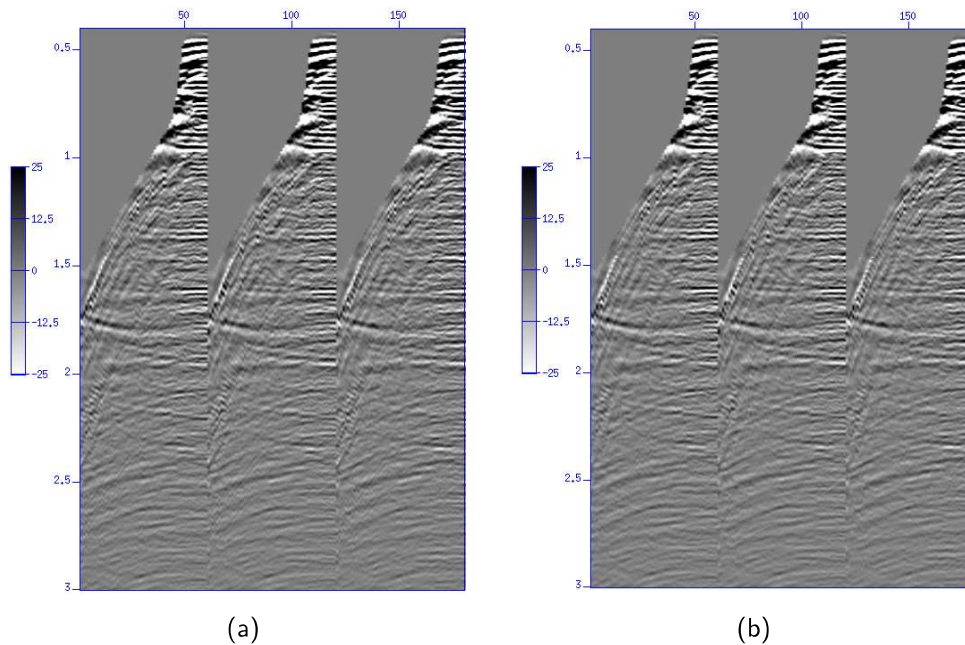


Figura 17 – Famílias de Ponto Médio Comum resultantes das somas adaptativas utilizando Wiener-Levinson (a) e *IRLS* (b) para estimar o filtro de forma, com artefatos de modelagem silenciados acima do tempo da múltipla.



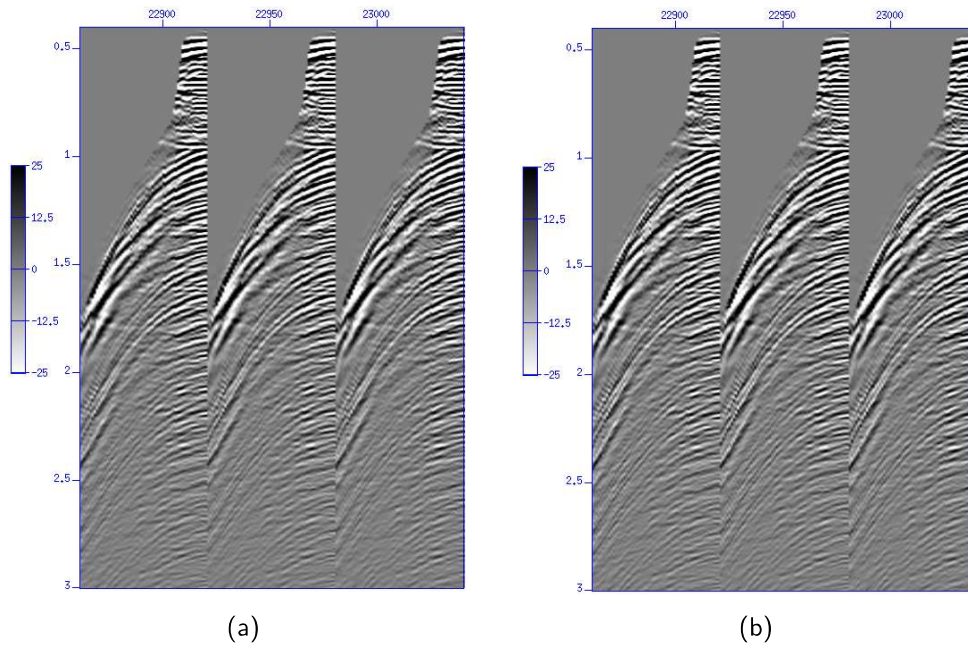


Figura 18 – Famílias de Ponto Médio Comum resultantes das diferenças entre o dado de entrada e os resultados das somas adaptativas utilizando Wiener-Levinson (a) e *IRLS* (b) para estimar o filtro de forma, sem artefatos de modelagem presentes.

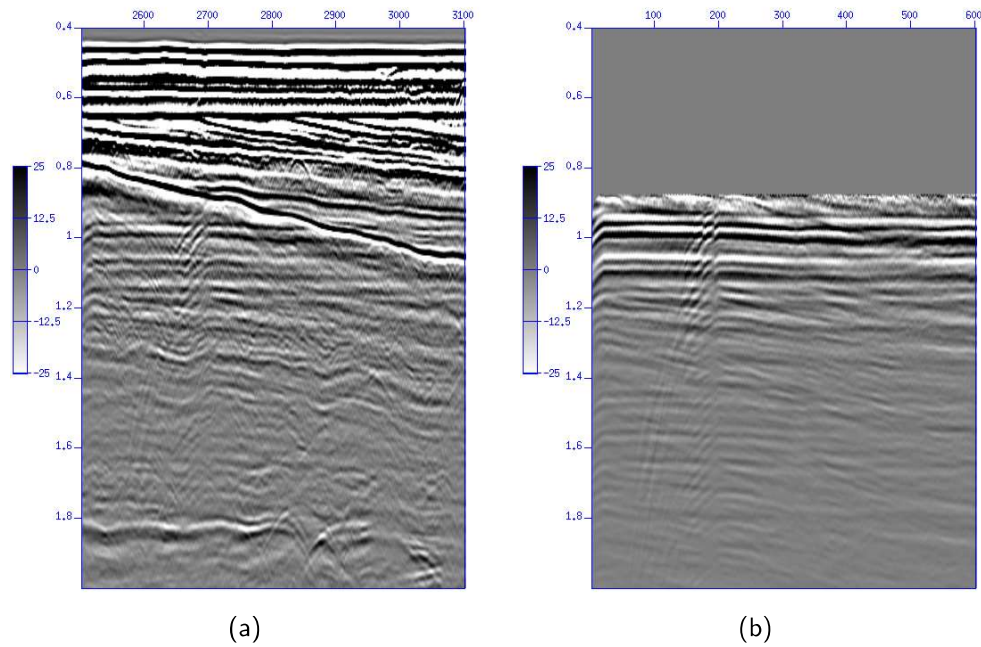


Figura 19 – Seções Empilhadas dos dados de entrada para as somas adaptativas utilizando Wiener-Levinson e *IRLS* na estimativa do filtro de forma, com artefatos de modelagem silenciados acima do tempo da múltipla. (a) Seção empilhada dos dados com múltiplas. (b) Modelo de múltiplas RADON com artefatos silenciados.

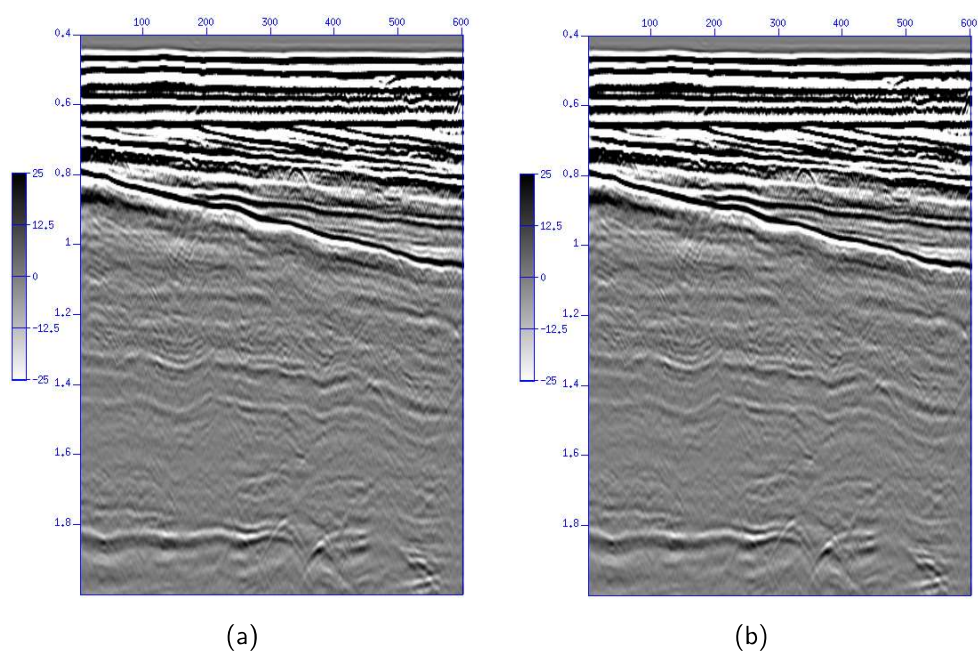


Figura 20 – Seções Empilhadas dos resultados das somas adaptativas utilizando Wiener-Levinson (a) e *IRLS* (b) para estimativa do filtro de forma, com artefatos de modelagem silenciados acima do tempo da múltipla.

## 4 Soma PZ robusta

### 4.1 Atenuação robusta do fantasma

Os resultados do capítulo 3 e da subseção 2.4.1 acima, justificam um estudo da aplicabilidade do método IRLS na decomposição acústica em campos ascendente e descendente a partir de dados multicomponentes de sensores de fundo marinho, considerando neste caso, que os registros do hidrofone e do geofone podem se apresentar de forma a violar as premissas dos mínimos quadrados. Logo, podemos reescrever a equação 2.4 inserindo a abordagem da filtragem linear robusta com IRLS, de maneira que os campos ascendente e descende sejam obtidos, a partir dos registro de hidrofone e geofone, por

$$\begin{aligned} U &= H + f_k * G \\ D &= H - f_k * G \end{aligned} \quad (4.1)$$

sendo

$$f_k = \operatorname{argmin} \|H' - f * G'\|_1. \quad (4.2)$$

Desta forma, obtêm-se um método robusto de tratamento do fantasma do receptor. A equação 4.2 trata da resolução de um problema não-linear (OLIVEIRA; LUPINACCI, 2013), o qual sendo resolvido pelo método IRLS, fornecerá o filtro  $f_k$  que minimiza a norma  $L_1$ .

Para isso, seguiu-se a mesma estrutura de cruzamento dos fantasmas apresentada acima pela equação 2.4 na seção 2.3, substituindo apenas o filtro adaptativo de Wiener-Levinson  $f_0$ , descrito na equação 2.9, pelo filtro IRLS  $f_k$ , de maneira que

$$f_k = [G'^T A^{(k)} G' + \mu B^{(k)}]^{-1} G'^T A^{(k)} H' \quad (4.3)$$

onde  $f_k$  é o filtro calculado na iteração  $k$ ,

$$A_{i,j}^{(k)} = 1/\sqrt{|\Delta D_i^{(k)}|^2 + \epsilon}, \forall i = j; A_{i,j}^{(k)} = 0, \forall i \neq j; \quad (4.4)$$

com  $\Delta D_i^{(k)} = H'_i - f_i^{(k-1)} * G'_i$ , sendo  $f^{(k-1)}$  o filtro obtido na iteração precedente  $k - 1$ , e

$$B_{i,j}^{(k)} = 1/\sqrt{(f_j^{(k-1)})^2 + \epsilon}, \forall i = j; B_{i,j}^{(k)} = 0, \forall i \neq j. \quad (4.5)$$

O filtro inicial  $f_0$  é a solução dos mínimos quadrados (OLIVEIRA; LUPINACCI, 2013), e possui seu cálculo otimizado mediante o algoritmo de Wiener-Levinson (DUARTE, 2003). Este filtro  $f_0$  serve de entrada para o cálculo do filtro  $f_k$  na primeira iteração  $k = 1$ , a qual é resolvida de forma ótima pela fatoração Cholesky (GOLUB; VAN LOAN, 1996), uma vez sendo a matriz  $G'^T A^{(k)} G' + \mu B^{(k)}$  definida positiva (LI *et al.*, 2016). A última iteração deve ser

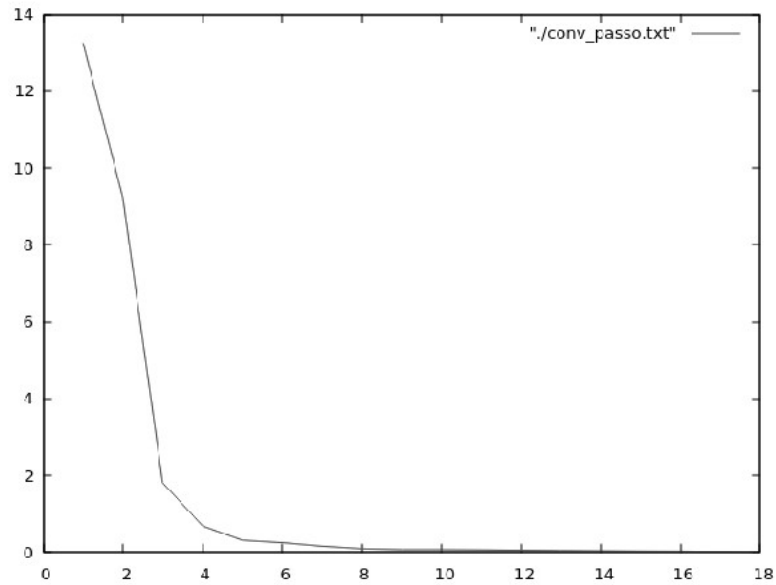


Figura 21 – Exemplo de curva de convergência para o cálculo do filtro IRLS, considerando o eixo vertical como a diferença entre as normas  $L_1$  dos filtros calculados nas últimas iterações, e o eixo horizontal como índice de iteração.

avaliada de maneira a expressar um grau de convergência satisfatório que garanta a robustez do método.

Enquanto o filtro de Wiener-Levinson pode ser obtido apenas parametrizando o número de coeficientes e um fator de regularização de primeira ordem, ou seja, um ruído branco ou luz branca (YILMAZ, 2001), o filtro IRLS demanda, pelo menos, da avaliação do parâmetro adicional  $\varepsilon$ , o qual consiste no erro de aproximação da assíntota que permite a diferenciação da norma  $L_1$  (Figura 7), considerando o regularizador  $\mu$  igual ao ruído branco adotado no cálculo do filtro de Wiener-Levinson. Ademais, por se tratar de um procedimento iterativo, embora a convergência seja atingida em uma taxa exponencial (Figura 21), o tempo de processamento do filtro IRLS em relação ao filtro de Wiener-Levinson se torna expressivamente maior quando se aumenta o número de coeficientes ou a precisão da convergência.

## 4.2 Atenuação robusta da *peg-leg*

Da mesma maneira, associamos o dado sem *peg-leg* ao resultado da soma adaptativa robusta, adequando a equação 2.10 à forma

$$P = U - p_k * D, \quad (4.6)$$

onde  $P$ ,  $D$  e  $U$  são respectivamente o dado sem a *peg-leg*, e os campos ascendente e descendente, enquanto  $p_0$  é o filtro IRLS considerando  $U$  e  $D$ , ou seja

$$p_k = [D^T A^{(k)} D + \mu B^{(k)}]^{-1} D^T A^{(k)} U \quad (4.7)$$

onde  $p_k$  é o filtro calculado na iteração  $k$ ,

$$A_{i,j}^{(k)} = 1/\sqrt{|\Delta D_i^{(k)}|^2 + \varepsilon}, \forall i = j; A_{i,j}^{(k)} = 0, \forall i \neq j; \quad (4.8)$$

com  $\Delta D_i^{(k)} = U_i - p_i^{(k-1)} * D_i$ , sendo  $p^{(k-1)}$  o filtro obtido na iteração precedente  $k - 1$ , e

$$B_{i,j}^{(k)} = 1/\sqrt{(p_j^{(k-1)})^2 + \varepsilon}, \forall i = j; B_{i,j}^{(k)} = 0, \forall i \neq j. \quad (4.9)$$

### 4.3 Aplicação em dados OBC

Conforme mencionado nas seções 4.1 e 4.2 acima, o método IRLS pode ser adaptado à soma da pressão com a componente vertical da velocidade de partícula, para a decomposição em campos ascendente e descendente, durante o processamento de onda compressional. Esta adequação pode ser resumida pelas equações 4.1, 4.3, 2.6 e 2.8. Estabeleceu-se, portanto, um fluxograma de processamento (Figura 22) para testar o comportamento do filtro IRLS substituindo o filtro Wiener-Levinson no tratamento do fantasma, durante a decomposição acústica em campos de onda, e da *peg-leg* do receptor.

Para entender o fluxograma, considera-se a abordagem acústica unidimensional do problema sísmico multicomponente de fundo marinho, descrita no capítulo 2, logo, uma seção de receptores empilhados representaria, de maneira aproximada, o resultado da propagação vertical da onda compressional.

A primeira etapa consiste em pré-condicionar as famílias de receptor comum de ambos os receptores (hidrofone e acelerômetro). Este pré-condicionamento resume-se no tratamento das assinaturas estatísticas (*designature*) de ambos os receptores, seguindo as etapas listadas na Figura 22, as quais finalizam com: a reamostragem do dado para metade da amostragem original (o que reduz a quantidade de dados para se processar); filtragem antialias; atenuação de bandas anômalas no hidrofone; e integração do acelerômetro, transformando aceleração de partícula em velocidade de partícula, simulando um registro de geofone.

Após o pré-condicionamento dos dados, estes são submetidos ao tratamento do fantasma (*deghosting*), que consiste na própria decomposição acústica em campos ascendente e descendente, a qual tem como seu primeiro passo, a obtenção de um filtro adaptativo adequado para o tratamento do fantasma do receptor.

Utilizando as seções de receptores próximos empilhadas, a janela de estimativa do filtro define a região dos traços que servem de entrada para as subrotinas de cálculo dos filtros adaptativos. Calculados os filtros, estes participam das operações de somas adaptativas descritas pelas equações 2.4 e 4.1, que executam a decomposição acústica, separando os campos ascendente e descendente. Esta operação fornece os resultados em sessões empilhadas, que são avaliadas durante o controle de qualidade para estipulação dos parâmetros adequados, permitindo prosseguir com o processamento. Obtidos os filtros para cada traço da sessão

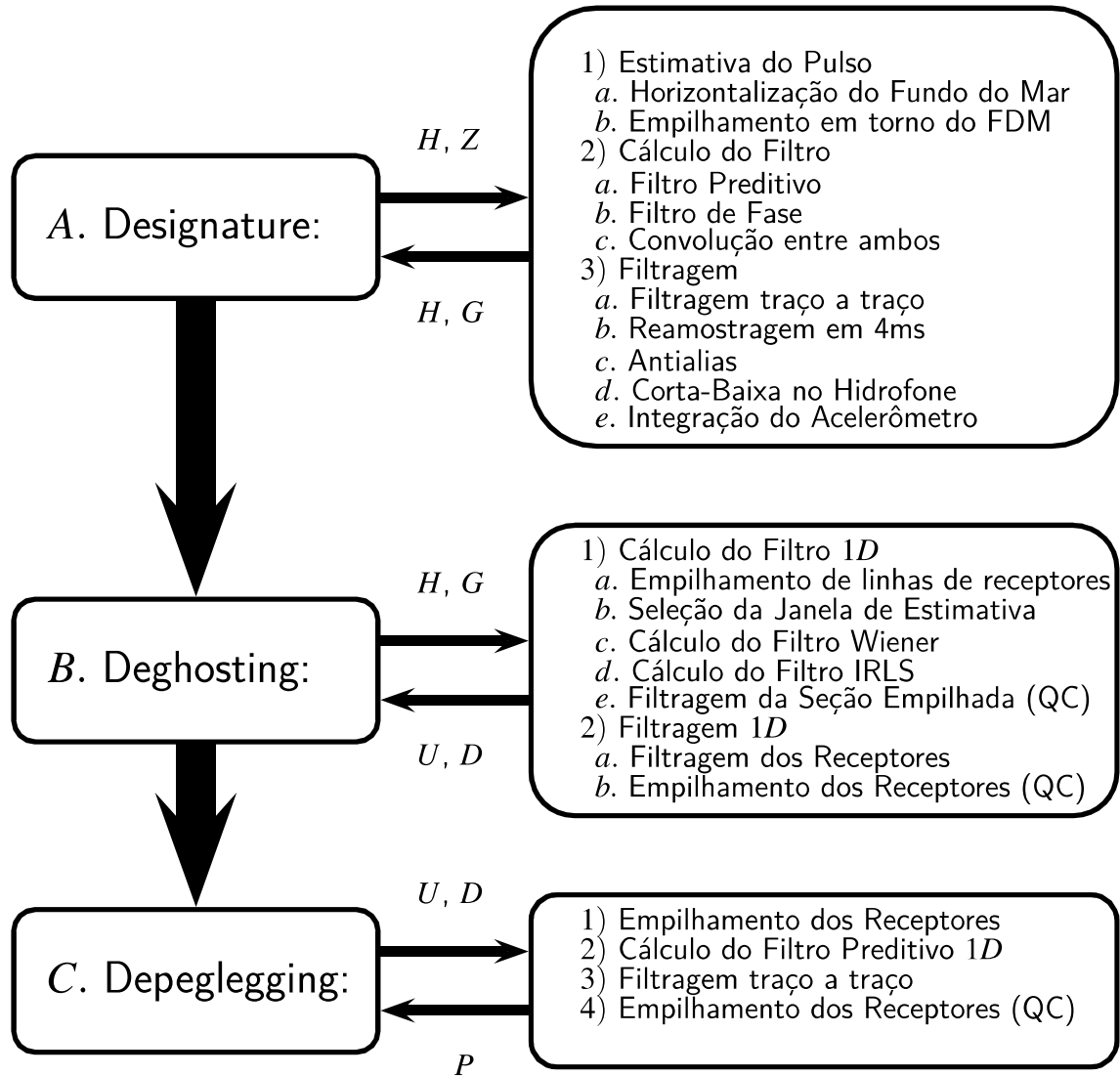


Figura 22 – Fluxograma descritivo das etapas de processamento de onda compressional, aplicadas no dado multicomponente do experimento.

empilhada, estes são aplicados em todos os traços de suas respectivas famílias de receptor comum. Após as filtrações e submissão às operações da decomposição acústica, estas famílias de receptor comum resultantes, são empilhadas, comparadas com as sessões obtidas durante o cálculo dos filtros adaptativos, e submetidas ao controle de qualidade.

Para executar o controle de qualidade, busca-se avaliar o aspecto geral das seções, no que tange aos níveis de ruído aleatório, relações de amplitude, presença de artefatos de operadores, polaridade dos eventos, forma dos espectros de amplitude. Espera-se que, para o campo ascendente, as reflexões se concentrem acima do tempo da *peg-leg* do receptor (ainda presente após o *deghosting*) e abaixo do fundo do mar, enquanto que para o campo descendente, este intervalo entre o fundo do mar e a *peg-leg* do receptor deve apresentar amplitudes zeradas ou bem mitigadas.

No que se refere a janela de estimativa dos filtros, o fluxograma determina a escolha da janela de estimativa do filtro; neste estudo usou-se dois tipos de janela, uma longa suficiente para englobar as múltiplas (fantasma e *peg-leg*), o que exige a aplicação do *crossghosting*, e uma curta sob a região entre o fundo do mar e a múltipla, descaracterizando a necessidade do *crossghosting*, uma vez que os *notches* dos fantasmas não contaminarão os espectros de amplitude dos dados de entrada, pois a múltipla não estará contida na janela de estimativa do filtro.

Os receptores submetidos ao tratamento do fantasma, são empilhados e mediante estes resultados executa-se o controle de qualidade, observando os dados no domínio do tempo e da frequência, e calculando as amplitudes RMS de uma janela entre o fundo do mar e a múltipla, composta pelo fantasma e a *peg-leg* do receptor, sobre os campos resultantes empilhados. Estes campos empilhados servem de entrada para o cálculo dos filtros preditivos durante o tratamento da *peg-leg* (*depeglegging*), os quais filtram as famílias de receptor comum do campo descendente para a realização da soma adaptativa descritas nas equações 2.10 e 4.6. As famílias resultantes do tratamento da *peg-leg*, são novamente empilhadas e observadas no domínio do tempo e da frequência para controle de qualidade.

Durante o controle de qualidade da atenuação da *peg-leg* do receptor, avalia-se, de maneira qualitativa, a eficácia da atenuação, assim como a razão sinal-ruído da sessão resultante e as relações de amplitude, de maneira a aceitar os parâmetros que menos alterem os aspectos geológicos das sessões resultantes.

#### 4.3.1 Pré-Condicionamento dos Dados – *Designature*

O fluxo proposto foi aplicado aos dados sísmicos multicomponentes de cabo de fundo (*OBC*) 0364\_4D\_JUBARTE\_PRM\_MONITOR\_01 adquiridos na área do Campo de Jubarte, disponibilizados ao UENF/LENEP pela ANP. Foram coletadas as componentes de pressão, dada pelo registro do hidrofone, e vertical da aceleração de partícula, dada pelo registro do acelerômetro, sobre uma linha de receptores mais próxima a uma linha de tiro, em destaque na Figura 23.

De acordo com o fluxograma de processamento da Figura 22, estas componentes selecionadas foram organizadas em famílias de receptor comum, e, devido ao grau de contaminação pela bolha, foram submetidas a um processamento de remoção das assinaturas de fonte e instrumento de registro, sob uma abordagem de rotação de fase e atenuação da bolha, a partir de pulsos estatísticos (Figuras 24(b) e 25(b)) extraídos de seções de receptores comum próximos (afastamentos curtos), empilhadas e corrigidas da estática do fundo do mar, de modo que os eventos que caracterizam esta reflexão, se apresentassem aproximadamente no mesmo nível horizontal (Figura 24(a) e 25(a)), permitindo a extração do pulso mediante seu empilhamento em uma janela em torno do fundo do mar. As Figuras 24 e 25 exemplificam o procedimento estatístico de tratamento

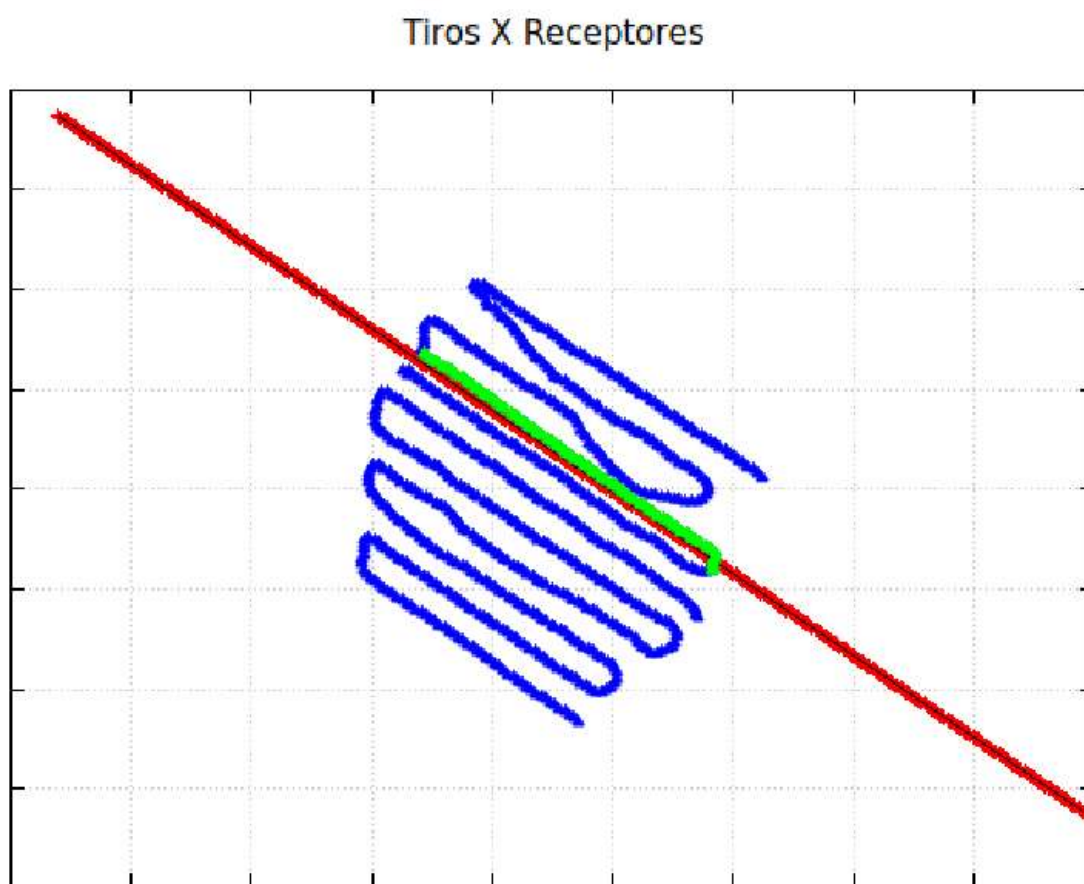


Figura 23 – Receptores (azuis) sobre a linha de receptor mais próxima (verde) à linha de tiros (vermelha), selecionados para efeito de estudo da soma PZ robusta.

das assinaturas para as componentes do hidrofone e acelerômetro vertical, enquanto que a Figura 26 expõe os pulsos resultantes deste tratamento.

Após o tratamento de assinatura, os dados foram reamostrados para a metade de suas razões de amostragem original, ou seja, de 2 para 4 milissegundos, e filtrados por um corta-alta anti-alias de 95Hz a 120Hz. Devido a apresentar amplitudes anômalas de baixa frequência, a componente do hidrofone  $H$  foi filtrada por um corta-baixa com rampa de 0 a 6 hertz (Figura 27). Nota-se que os resíduos incoerentes da diferença entre o dado de entrada e o filtrado (Subfiguras 27(f) e 27(c)), se concentraram nas baixas frequências ruidosas, enquanto os resquícios coerentes eliminados pelo filtro anti-alias, concentraram-se nas altas, garantindo a qualidade do dado filtrado contido na banda de frequência sísmica útil (Subfiguras 27(e) e 27(b)).

Nota-se que o método de soma da pressão com a componente vertical fundamenta-se na proporcionalidade da velocidade de partícula em relação à pressão, expressa na equação 2.2. Portanto, quando a componente vetorial fornecida pela aquisição refere-se à aceleração



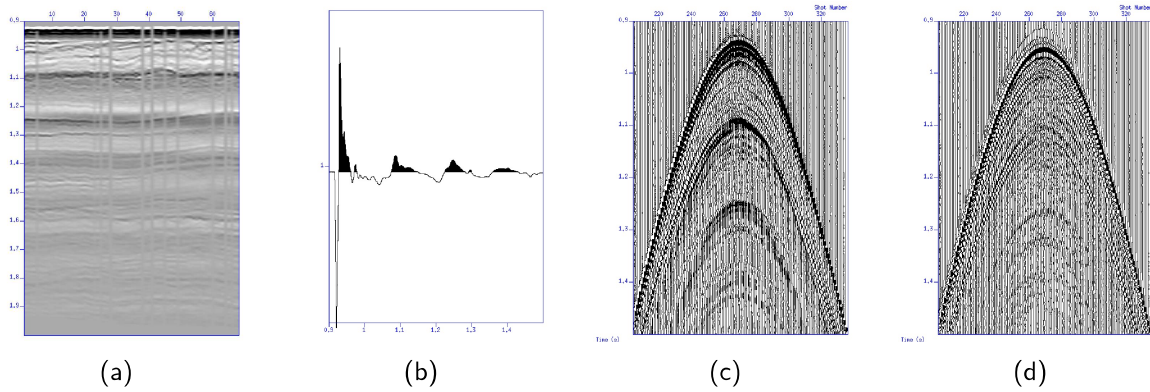


Figura 24 – Exemplo do tratamento estatístico da assinatura da fonte e instrumento de registro para o hidrofone. (a) é a seção empilhada com o fundo do mar horizontalizado com estática, (b) o pulso estatístico extraído do empilhamento da seção em (a), (c) a família de receptor comum de entrada e (d) a mesma família após o *designature*.

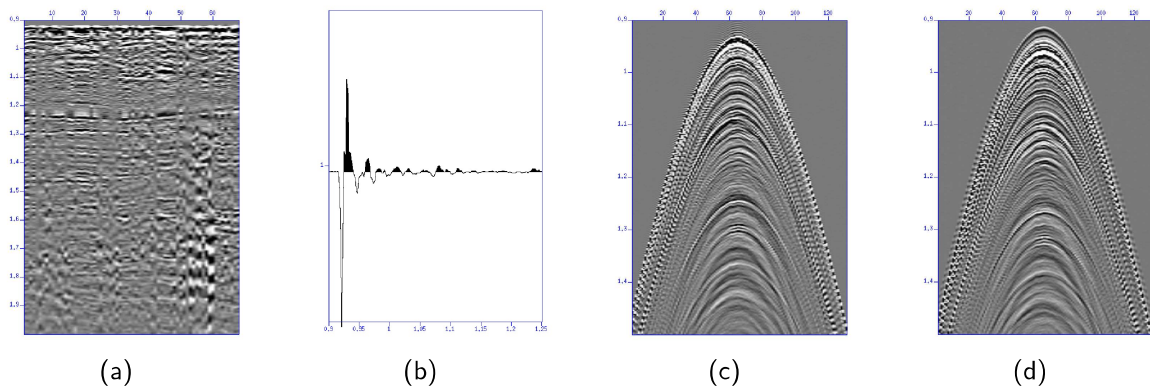


Figura 25 – Exemplo do tratamento estatístico da assinatura da fonte e instrumento de registro para o acelerômetro. (a) é a seção empilhada com o fundo do mar horizontalizado com estática, (b) o pulso estatístico extraído do empilhamento da seção (a), (c) a família de receptor comum de entrada e (d) a mesma família após o *designature*.

de partícula, exige-se uma integração numérica do registro do acelerômetro (Figura 28), afim de se obter valores de velocidade de partícula adequados às proposições do método.

Ainda devido a natureza proporcional entre as grandezas em questão (equação 2.2), a componente do acelerômetro integrado, representando a velocidade de partícula, apresentou-se com valores de amplitude média significativamente abaixo dos valores de variação da pressão lidos pelo hidrofone. Como buscava-se submeter as componentes a um processo de filtragem adaptativa, concluiu-se que a correção por um fator de escala, no intuito de igualar a ordem de grandeza das magnitudes de ambas as componentes, seria uma ideia razoável. Logo, este escalar foi obtido pela média da razão entre os espectros de amplitude médios do hidrofone e do acelerômetro integrado. O resultado obtido para este escalar foi 12.45.

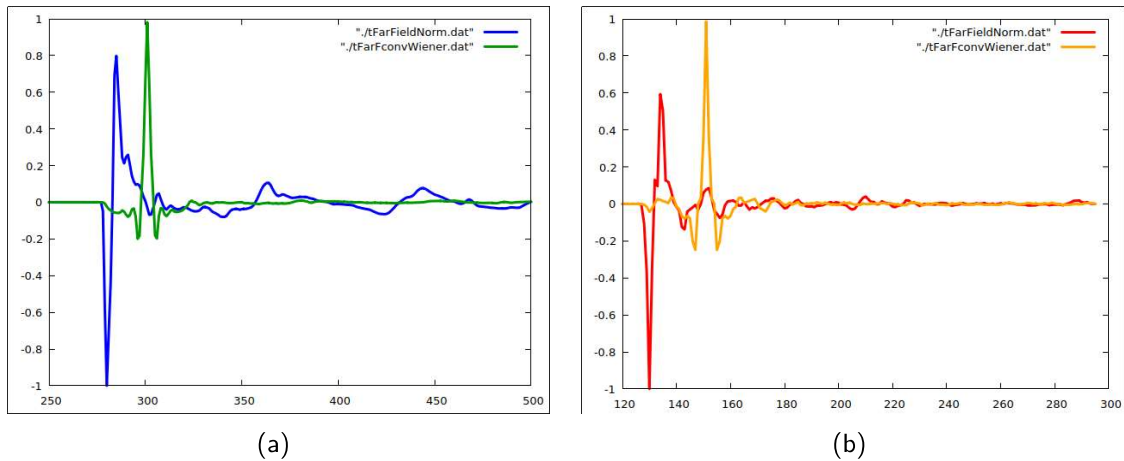


Figura 26 – Pulsos resultantes do tratamento estatístico das assinaturas, após filtros preditivos e rotação de fase. Em (a) temos os pulsos no hidrofone, a entrada em azul, e a saída em verde. Em (b) temos os pulsos no acelerômetro, a entrada em vermelho, e a saída em laranja.

#### 4.3.2 Atenuação do Fantasma – *Deghosting*

Os dados pré-condicionados receberam uma correção aproximada de NMO (*Normal Moveout*) com velocidade constante de 1500 metros por segundo, simulando a velocidade da lâmina d'água, e foram empilhados. Este procedimento objetivou construir uma representação aproximada do registro de afastamento zero, caracterizando o caso de incidência normal à interface que representa o fundo do mar, considerado horizontal (Figura 3), assim como fornecer insumos para estimativa dos filtros adaptativos intrínsecos ao procedimento de atenuação do fantasma do receptor e da *peg-leg*.

Prosseguiu-se com a linha adotada em Soubaras (1996), Hugonnet *et al.* (2011), onde estipula-se uma janela de adaptação sobre a seção de receptores empilhados, e aplica-se o filtro calculado sobre os traços de suas respectivas famílias de receptor comum. Devido ao fato dos receptores estarem localizados sob lâmina d'água profunda, foi possível determinar uma janela curta de adaptação, iniciada logo abaixo do fundo do mar e finalizando acima da múltipla de primeira ordem (Figura 35), com amostras suficientes para se obter filtros adequados sem a necessidade de aplicar o procedimento de *crossghosting* (HUGONNET *et al.*, 2011). Também foi utilizada uma janela longa, na qual incluiu-se as reflexões do fundo do mar e a múltipla, e sobre ela foram calculados os filtros em questão, após as operações de *crossghosting*.

Utilizando a janela longa para estimativa dos filtros, necessitando do *crossghosting*, os operadores dos fantasmas foram modelados para cada componente partindo das condições impostas pelo sistema de equações 2.3, implicando nas equações 2.8, avaliando os parâmetros de refletividade negativa da superfície da água, igual a  $-0.99$ , e o fator percentual de espalhamento geométrico igual a  $0.83$ , descritos em Rosa (2018). Como a

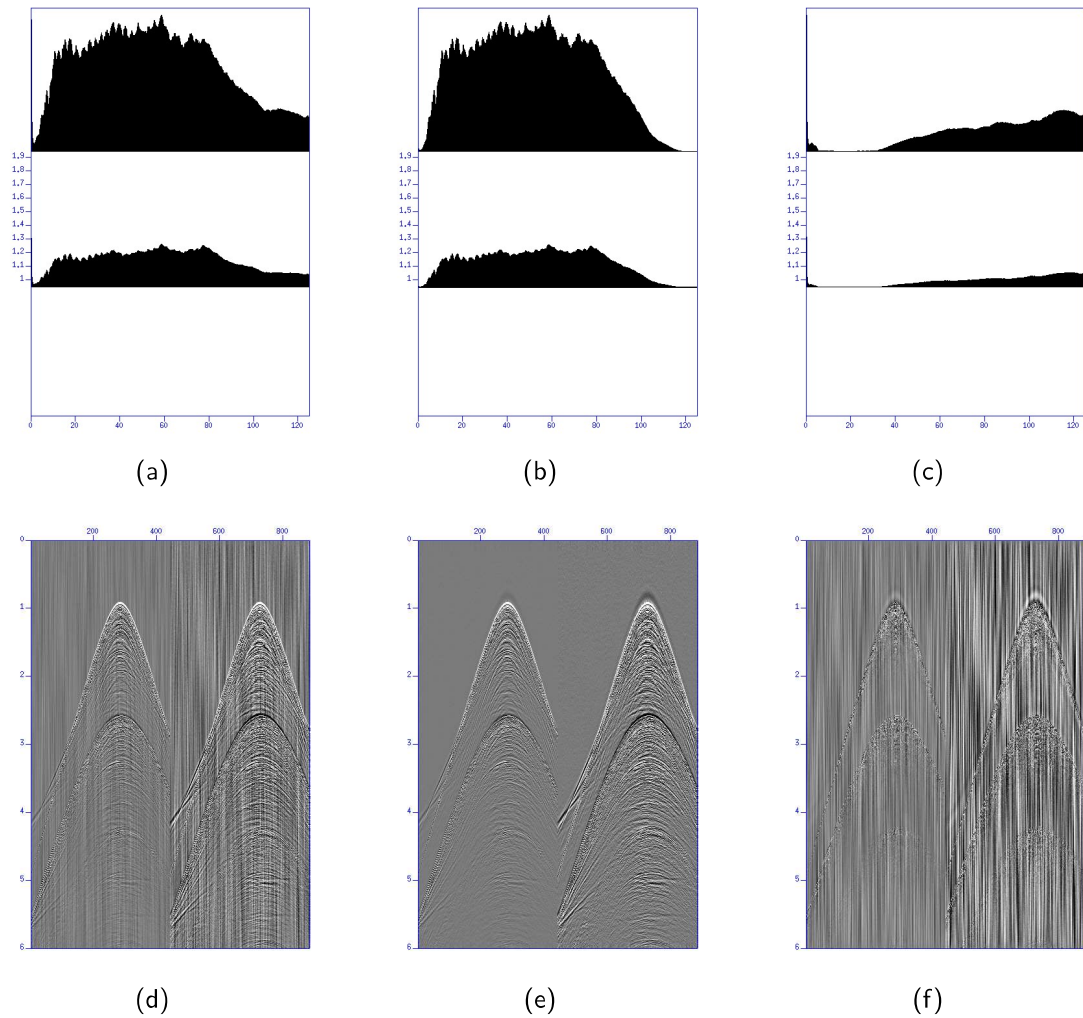


Figura 27 – Resultado da aplicação dos filtros corta-baixa e anti-alias no hidrofone. (a), (b) e (c) são respectivamente os espectros de amplitude das famílias de receptor comum de entrada (d), de saída (e) e da diferença entre a entrada e a saída (f).

seção empilhada trata da aproximação unidimensional da incidência vertical, o ângulo de incidência foi zero. A profundidade do receptor foi extraída do cabeçalho do traço, e inserida adequadamente no cálculo dos operadores de fantasma, de acordo com o receptor tratado. Devido a natureza discreta do dado e o formalismo da linguagem de programação, o tempo foi convertido para número de amostras, acatando o intervalo de amostragem de 4 milissegundos. Os operadores modelados, filtraram as componentes do hidrofone e do acelerômetro integrado de forma a extrair os resultados do *crossghosting* (SOUBARAS, 1996; HUGONNET *et al.*, 2011). Aplicado o *crossghosting* em ambas as componentes, prosseguiu-se com o cálculo dos filtros adaptativos de Wiener-Levinson e IRLS, e subsequente somas adaptativas entre as componentes. Para obtenção de resultados satisfatórios, foi necessário calcular filtros longos.

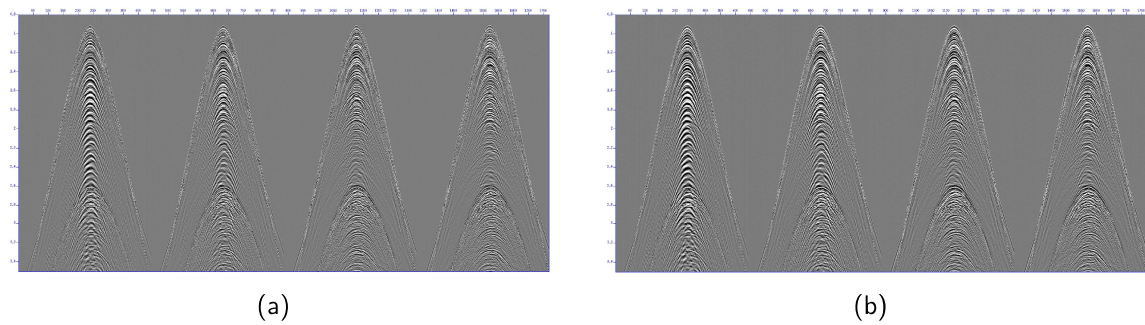


Figura 28 – Resultado da integração do acelerômetro sobre o *gather* de receptor. Em (a) temos famílias de receptor comum do acelerômetro, após o tratamento de assinaturas, que foram integradas, resultando nas famílias em (b).

Mesmo se tratando de um procedimento prático aproximado, os resultados destas operações fornecem a decomposição entre os campos ascendente (*upgoing*) e descendente (*downgoing*), sob os sensores dos mínimos quadrados e da minimização da norma  $L_1$ , os quais servem de insumo para o prosseguimento do processamento sísmico com sensores de fundo marinho, em especial para atenuação da *peg-leg* no *upgoing* (seção 2.3.1), ou por processamento convencional, como SRME (VERSCHUUR, 2006), no *downgoing*.

#### 4.3.3 Atenuação da *peg-leg* – *Depeglegging*

Estimados os filtros adaptativos sobre as seções empilhadas, estes foram aplicados às suas respectivas famílias de receptor comum. Estas operações concluíram a fase de *deghosting* (Figura 22) e geraram os campos ascendente e descendente, os quais foram submetidos a fase de *depeglegging* (Figura 22). Aplicou-se, portanto, os procedimentos descritos nas seções 2.3.1 e 4.2, para tratamento da *peg-leg* do lado do receptor, uma vez que todo procedimento de filtragem foi operado sob condições unidimensionais (HUGONNET *et al.*, 2011). Neste caso, filtros curtos foram satisfatoriamente aplicados à família de receptor comum, calculados traço a traço com janela de estimativa cheia sobre os empilhamentos dos campos ascendente e descendente.

#### 4.3.4 Ferramentas

Para leitura e controle de qualidade dos processos aplicados aos dados, foi utilizado o pacote gratuito SU (*Seismic Unix*), disponibilizado pelo *Center Wave Phenomena* da Universidade do Colorado. Durante a seleção de traços, o tratamento da assinatura, modelagens e avaliação de resultados das subrotinas implementadas, utilizou-se o *Gnuplot* complementando o controle de qualidade daquelas etapas de processamento. Para as operações de filtragem, construção dos operadores, resolução de sistemas lineares e cálculo

dos filtros, foram implementados programas e subrotinas em linguagem de programação FORTRAN (*Formula Translation*).

Por conta das atribuições dos valores lidos nos traços sísmicos em variáveis reais, limites de operacionalidade da linguagem FORTRAN e magnitude dos valores de entrada oferecidos pelos arquivos do SU, necessitou-se de uma operação de escalamento dos dados dentro dos programas implementados, controlada por um fator de escalamento necessário, aplicado no início, logo após a leitura dos dados, para a estabilidade das operações de obtenção dos filtros, e removido no final antecipando a escrita dos dados processados, preservando com isso, as relações de amplitude dos dados de entrada.

As subrotinas para cálculo dos filtros, foram utilizadas em ambos os tratamentos, tanto do fantasma quanto da *peg-leg*. Para o filtro de Wiener-Levinson, foi implementada uma subrotina para executar a recursão de Levinson, baseado no algoritmo de Claerbout (1976) descrito em Rosa (2018). Para fatoração Cholesky, escolheu-se a implementação pelo produto externo (GOLUB; VAN LOAN, 1996).



## 4.4 Resultados

### 4.4.1 *Deghosting* - Cálculo dos Filtros

A primeira etapa deste fluxo de processamento consiste na estimativa dos filtros adaptativos, sobre uma janela nas seções de receptores empilhados das componentes do hidrofone e vertical do acelerômetro integrado. Conforme mencionado no capítulo 4.3, dois tipos de janelas foram utilizadas para calcular os filtros, uma contemplando o fundo do mar e as múltiplas, e outra definida entre estes dois eventos. Devido à natureza de lâmina d'água profunda do dado estudado, a primeira janela tornou-se relativamente longa, enquanto a última, curta. As subseções abaixo expõem os resultados da etapa de estimativa dos filtros para ambas as janelas, e discute o controle de qualidade sobre as seções de receptores empilhados dos campos ascendente e descendente resultantes.

#### 4.4.1.1 Janela Longa

A janela longa utilizada para estimativa do filtro (Figura 29) contemplou os eventos do fundo do mar, representado pelas setas brancas sobre as seções empilhadas, e da múltipla, composta pela sobreposição entre o fantasma e a *peg-leg*, representada pelas setas pretas sobre as seções empilhadas do hidrofone e do acelerômetro integrado. Tamanhos de janela foram testados durante o procedimento, escolhendo-se de 0.0 a 10.0 segundos sobre o traço inteiro como tamanho ideal para determinar a janela longa. Os filtros foram calculados com 780 coeficientes sobre a janela estipulada, utilizando como entrada, as componentes submetidas ao *crossghosting* (Figura 30), descrito na equação 2.6.

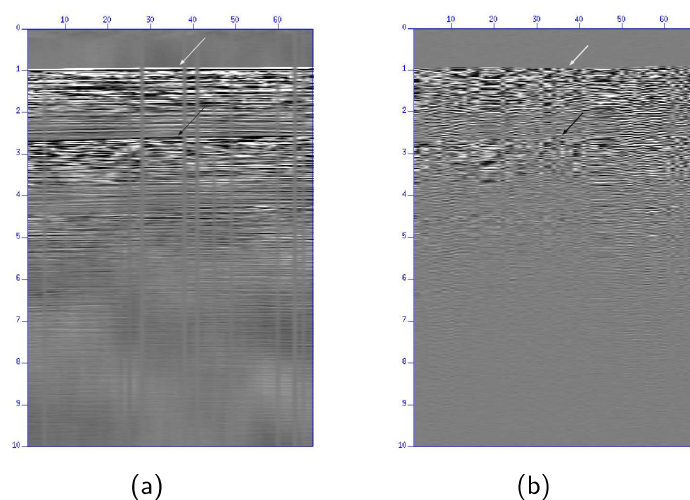


Figura 29 – Janela longa para estimativa dos filtros contendo o fundo mar (setas brancas) e as múltiplas (setas pretas) sobre as seções de receptores próximos empilhados das componentes do hidrofone (a) e do acelerômetro integrado (b), utilizadas na estimativa dos filtros adaptativos durante o tratamento do fantasma do receptor.

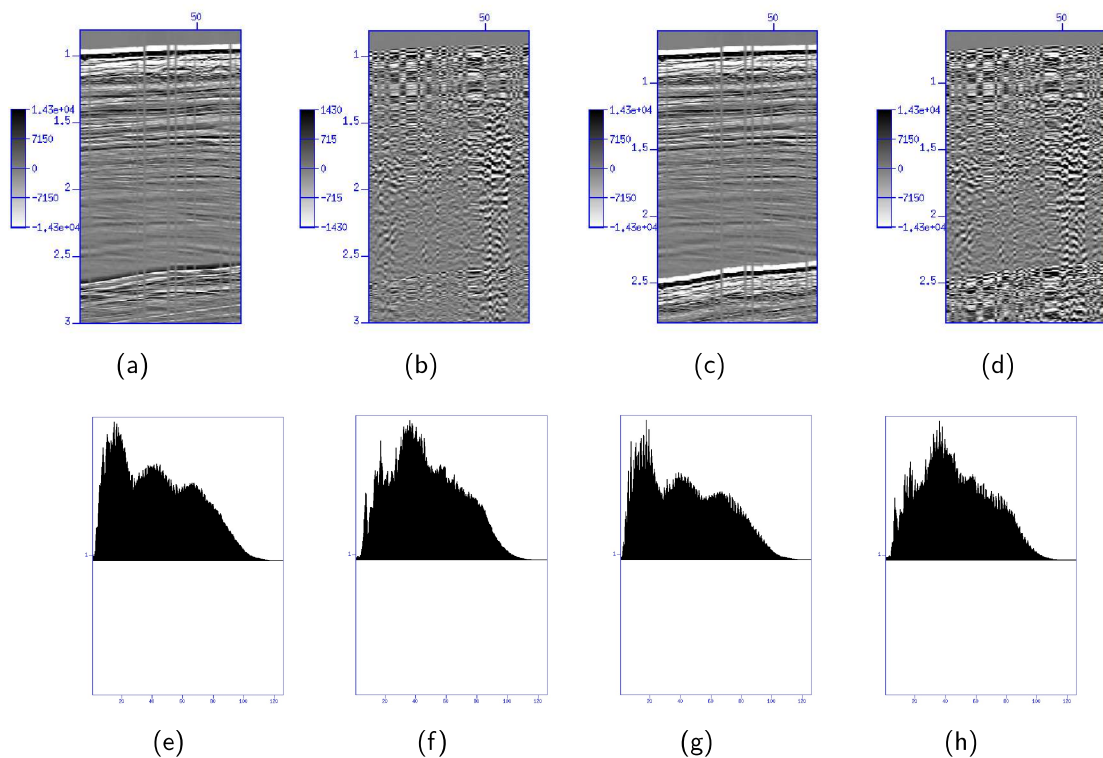


Figura 30 – Seções empilhadas de receptores próximos no domínio do tempo para o hidrofone (a), para o acelerômetro integrado (b), e para os resultados do *crossghosting* no hidrofone (c), e no acelerômetro integrado (d), com seus respectivos espectros de amplitude médios (e), (f), (g) e (h).

As Figuras 31, 32 e 33 expõem as seções de receptores empilhados dos campos ascendentes e descendentes, resultantes da decomposição acústica para tratamento do fantasma, utilizando os filtros de Wiener-Levinson (Figura 32) e IRLS (Figura 33). Percebe-se sobre estes resultados, que a soma adaptativa com filtro IRLS resolve as reflexões de maneira mais nítida, apresentando uma seção com conteúdo de ruído menor e com a presença de artefatos de borda de filtro mitigados, em relação aos contidos na seção resultante da soma adaptativa com filtro de Wiener-Levinson. Este resultado comprova a robustez do filtro IRLS perante situações ruidosas que violam as premissas dos mínimos quadrados, como é o caso da janela longa contendo as múltiplas. Avaliando os espectros de amplitude médios (Sub-figuras 32(b), 32(d), 33(b) e 33(d)), extraídos das janelas expostas nas Sub-figuras 32(a), 32(c), 33(a) e 33(c), estipulada entre o fundo do mar e a múltipla, entre 1.7 e 2.3 segundos, observa-se que o nível de amplitude na janela de controle de qualidade do campo descendente, é menor quando se utiliza o IRLS, apresentando uma média da amplitude  $RMS$  dentro da janela de  $2.559124e + 02$ , aproximadamente metade da calculada sobre a janela resultante da filtragem com Wiener-Levinson  $5.969247e + 02$ , conferindo melhor qualidade aos resultados daquela abordagem, uma vez que o nível ideal de amplitude esperado dentro da janela é zero; quanto ao campo ascendente, há um ligeiro

ganho nas amplitudes da banda útil e uma redução razoável nas altas frequências (geralmente dominada por ruídos incoerentes), quando utilizado o IRLS. Além disso, comparando as janelas de controle de qualidade dos campos resultantes usando Wiener-Levinson com as do IRLS, percebeu-se a presença de artefatos de borda de filtro mais marcantes naquelas.

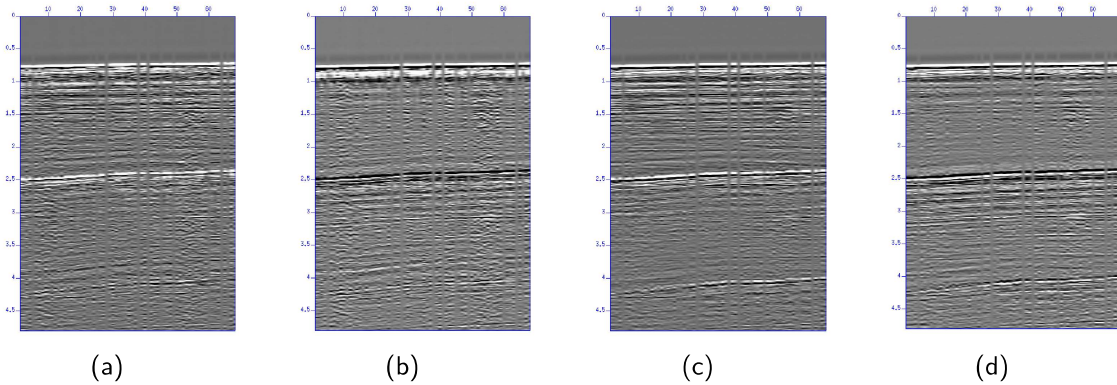


Figura 31 – Resultados da decomposição acústica em campos ascendente, e descendente, utilizando *crossghosting* e filtro adaptativo Wiener-Levinson e IRLS com 780 coeficientes, usando janela longa para estimativa do filtro sobre empilhamentos de receptores próximos. (a) Campo ascendente Wiener-Levinson. (b) Campo descendente Wiener-Levinson. (c) Campo ascendente IRLS. (d) Campo descendente IRLS.

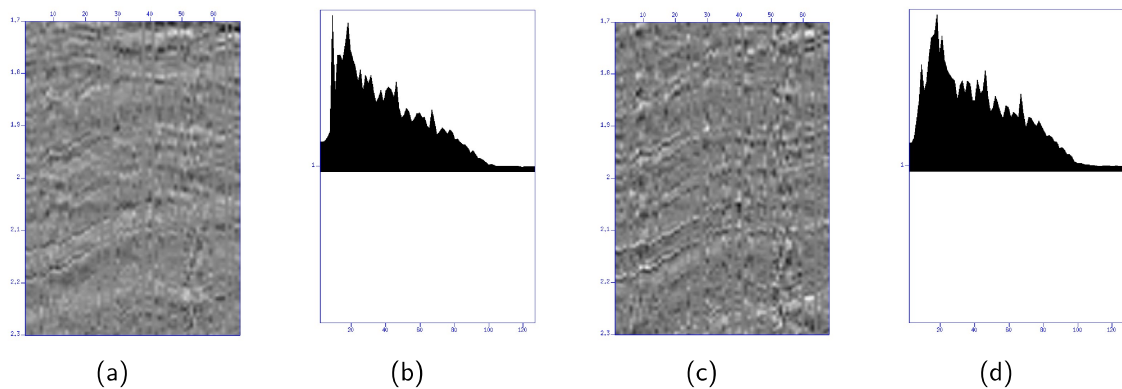


Figura 32 – Resultados da decomposição acústica em campos ascendente e descendente, utilizando *crossghosting* e filtro adaptativo Wiener-Levinson com 780 coeficientes, usando janela longa para estimativa do filtro sobre empilhamentos de receptores próximos. (a) Janela de controle de qualidade no campo ascendente definida entre 1.7 e 2.3 segundos sobre a seção empilhada. (b) Espectro de amplitude médio da janela (a). (c) Janela de controle de qualidade no campo descendente, definida entre 1.7 e 2.3 segundos sobre a seção empilhada. (d) Espectro de amplitude médio da janela (c).



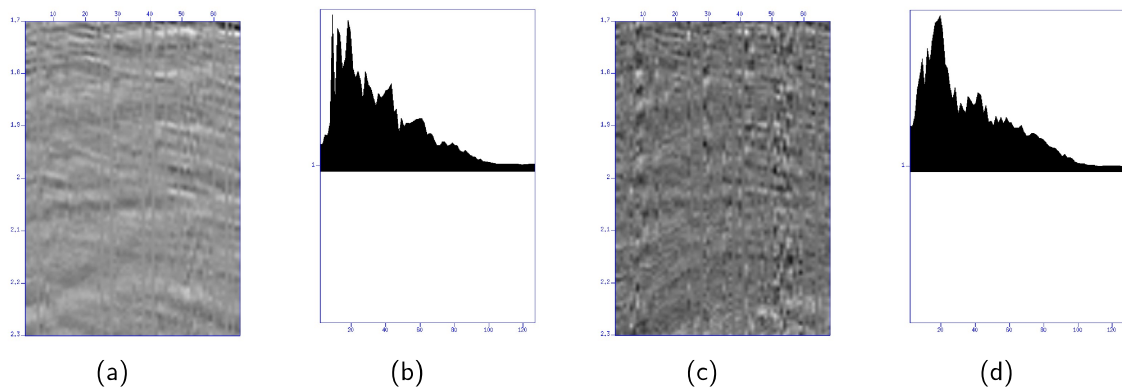


Figura 33 – Resultados da decomposição acústica em campos ascendente e descendente, utilizando *crossghosting* e filtro adaptativo IRLS, com 780 coeficientes, usando janela longa para estimativa do filtro sobre empilhamentos de receptores próximos. (a) Janela de controle de qualidade no campo ascendente definida entre 1.7 e 2.3 segundos sobre a seção empilhada. (b) Espectro de amplitude médio da janela (a). (c) Janela de controle de qualidade no campo descendente, definida entre 1.7 e 2.3 segundos sobre a seção empilhada. (d) Espectro de amplitude médio da janela (c).

A Figura 34 detalha estas observações, comparando janelas ampliadas sobre as regiões onde se espera a presença de reflexões úteis, consideradas sinal de interesse, nas seções de receptores empilhados dos campos ascendentes (acima do tempo da múltipla de primeira ordem, entre 1.4 e 2.2 segundos) e descendentes (abaixo do tempo da múltipla de primeira ordem, entre 2.4 e 4.0 segundos) obtidos com filtragem linear adaptativa utilizando os filtros Wiener-Levinson e IRLS.

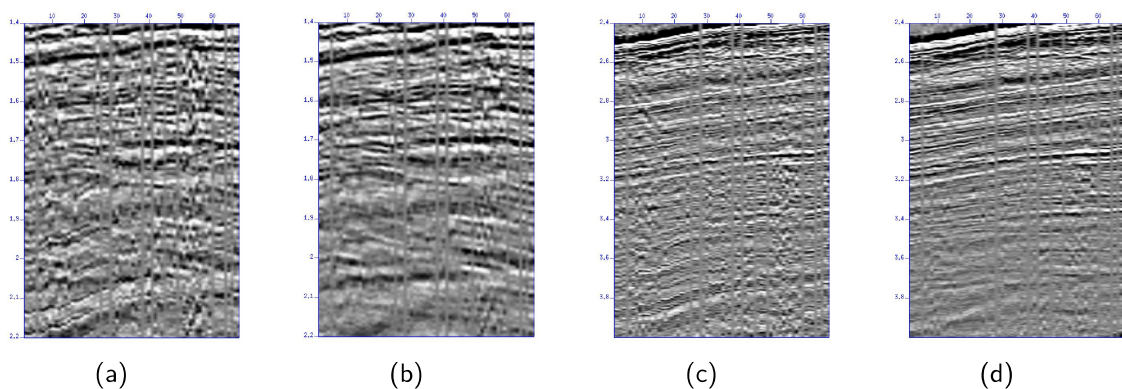


Figura 34 – Detalhe sobre seções empilhadas resultantes das decomposições acústicas com filtros de Wiener-Levinson e IRLS. (a) Campo ascendente Wiener-Levinson. (b) Campo Ascendente IRLS. (c) Campo descendente Wiener-Levinson. (d) Campo descendente IRLS. A janela sobre os campos ascendentes foi definida entre 1.4 e 2.2 segundos, e sobre os descendentes, entre 2.4 e 4.0 segundos sobre as seções empilhadas.

#### 4.4.1.2 Janela Curta

A janela curta (Figura 35) foi posicionada entre os eventos do fundo do mar e da múltipla, excluindo-os de dentro da janela de estimativa do filtro, definida entre 1.06 e 2.48 segundos sobre as seções de receptores próximos empilhados. Embora seu tamanho em relação à janela longa (Figura 29) tenha sido menor, devido à natureza do dado de lâmina d'água profunda utilizado neste estudo, sua extensão foi grande o suficiente para estimar os filtros adaptativos que representassem com fidelidade as características de cada componente de entrada, sem a necessidade de executar o *crossghosting*, uma vez que o fantasma foi excluído da janela de estimativa dos filtros adaptativos.

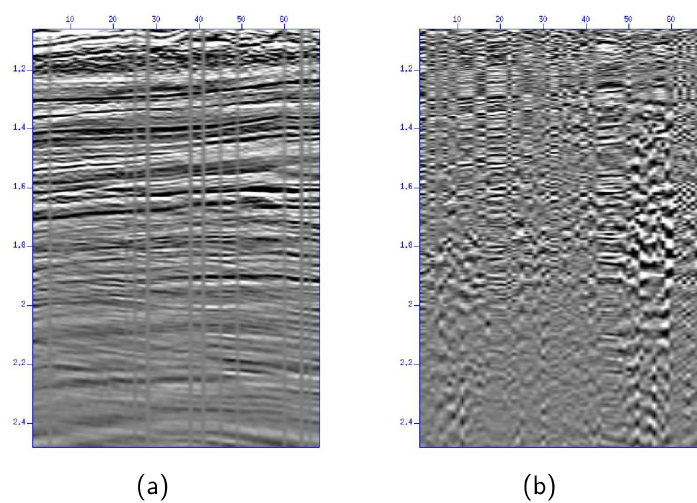


Figura 35 – Janela curta entre 1.06 e 2.48, sobre as seções de receptores próximos empilhados das componentes do hidrofone (a) e do acelerômetro vertical integrado (b), as quais serviram de entrada para a estimativa dos filtros adaptativos durante a decomposição acústica para tratamento do fantasma do receptor.

Além disso, o posicionamento da janela curta restringiu uma região dos dados de entrada que se aproxima das condições impostas pelas premissas de minimização da norma euclidiana, proporcionando resultados similares para as decomposições acústicas com filtros adaptativos de Wiener-Levinson e IRLS, quando observados no domínio do tempo (Figuras 36, 37 e 38). Contudo, o uso do filtro IRLS durante o tratamento do fantasma do receptor forneceu resultados com qualidade ligeiramente superior, perceptível na avaliação dos espectro de amplitude médios (Sub-figuras 37(b), 37(d), 38(b), e 38(d)) extraídos das janelas de controle de qualidade, definida entre 1.7 e 2.3 segundos sobre as seções empilhadas nos campos ascendente (Sub-figuras 37(a) e 38(a)) e descendente (Sub-figuras 37(c) e 38(c)), ou seja, as amplitudes sobre a banda de frequências útil do campo ascendente com IRLS, sofreram um pequeno ganho, enquanto as do campo descendente com IRLS, uma pequena redução de magnitude em relação aos campos extraídos usando o filtro de Wiener-Levinson. Esta observação é corroborada pelos valores médios das amplitudes

*RMS* na janela de controle de qualidade (entre 1.7 e 2.3 segundos sobre as seções empilhadas) sobre o campo descendente com Wiener-Levinson (o qual foi de  $1.975253e + 02$ ) e com IRLS (o qual foi de  $1.959301e + 02$ ), e também sobre os campos ascendentes com Wiener-Levinson (o qual foi de  $5.063239e + 02$ ) e IRLS (o qual foi de  $5.231459e + 02$ ). Estes valores, embora possuam diferenças quantitativas pequenas, apresentaram-se alinhados com a ligeira melhoria na qualidade quando se utiliza IRLS.

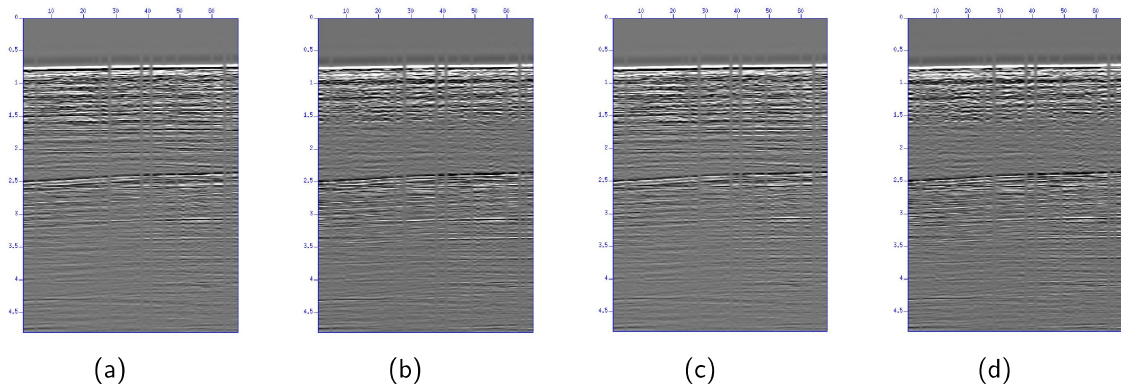


Figura 36 – Resultados da decomposição acústica em campos ascendente e descendente, utilizando o filtro adaptativo Wiener-Levinson e IRLS com 200 coeficientes, usando janela curta para estimativa do filtro sobre empilhamentos de receptores próximos. (a) Campo ascendente Wiener-Levinson. (b) Campo descendente Wiener-Levinson. (c) Campo ascendente IRLS. (d) Campo descendente IRLS.

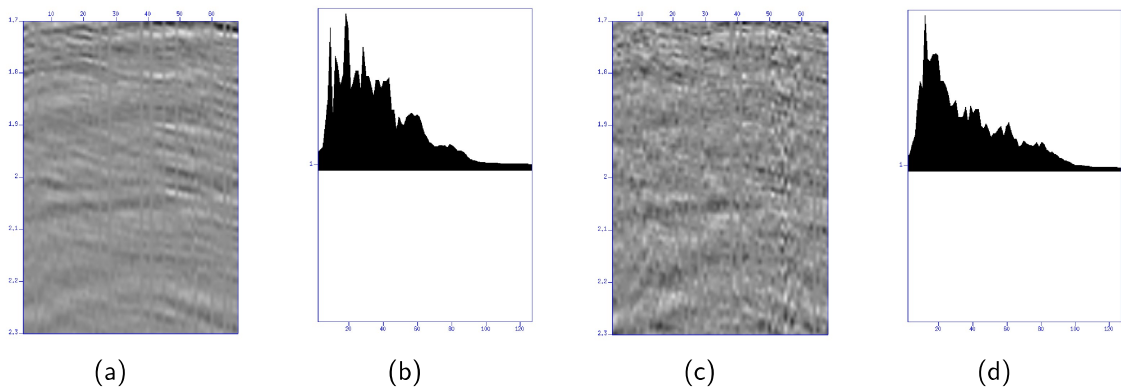


Figura 37 – Resultados da decomposição acústica em campos ascendente e descendente, utilizando o filtro adaptativo Wiener-Levinson, com 200 coeficientes, usando janela curta para estimativa do filtro sobre empilhamentos de receptores próximos. (a) Janela de controle de qualidade no campo ascendente definida entre 1.7 e 2.3 segundos sobre a seção empilhada. (b) Espectro de amplitude médio da janela (a). (c) Janela de controle de qualidade no campo descendente, definida entre 1.7 e 2.3 segundos sobre a seção empilhada. (d) Espectro de amplitude médio da janela (c).

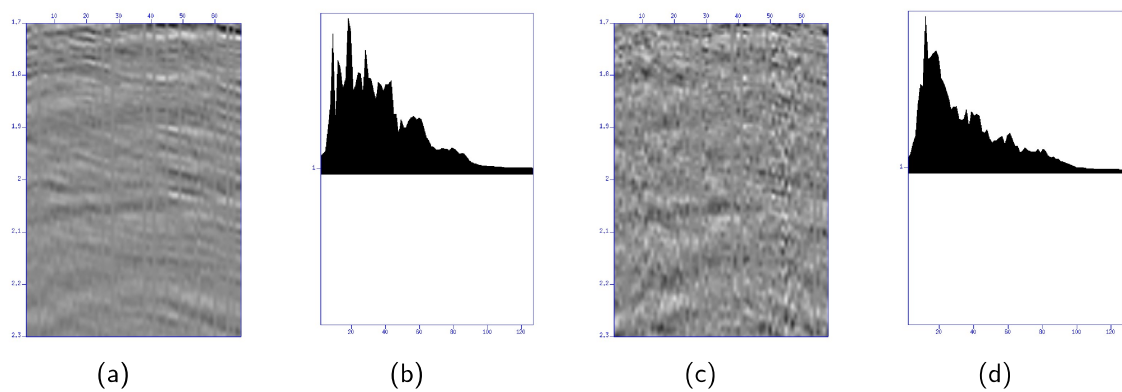


Figura 38 – Resultados da decomposição acústica em campos ascendente e descendente, utilizando filtro adaptativo Wiener-Levinson, com 200 coeficientes, usando janela curta para estimativa do filtro sobre empilhamentos de receptores próximos. (a) Janela de controle de qualidade no campo ascendente definida entre 1.7 e 2.3 segundos sobre a seção empilhada. (b) Espectro de amplitude médio da janela (a). (c) Janela de controle de qualidade no campo descendente, definida entre 1.7 e 2.3 segundos sobre a seção empilhada. (d) Espectro de amplitude médio da janela (c).

Os resultados das etapas de cálculo dos filtros adaptativos sobre as seções empilhadas nos faz perceber que, com determinado pré-condicionamento dos dados de entrada, assim como a possibilidade de exclusão dos fantasmas do receptor de dentro da janela de estimativa do filtro adaptativo, obtemos entradas resultantes sob condições aproximadas de respeito às premissas dos mínimos quadrados. A necessidade de aplicar previamente o *crossghosting* quando se utiliza a janela curta, logo, é descartada, já que sem a participação dos fantasmas dentro destas janelas, as amplitudes sobre a banda útil dos espectros de amplitude das componentes, não são afetados pelos *notches* oriundos da contaminação pelo fantasma do receptor, logo o aspecto de sincronia alternada entre os espectros de amplitude do hidrofone e do geofone (representado neste experimento pela componente vertical do acelerômetro integrada), previsto teóricamente durante a formulação do *crossghosting* (equação 2.6), não se apresenta durante o cálculo dos filtros adaptativos. Neste caso, como a presença do fantasma do receptor é um fator que insere condições que violam as premissas dos mínimos quadrados, uma vez que a magnitude das múltiplas se sobressai em relação à energia das primárias conflitantes.

#### 4.4.2 *Deghosting* - Aplicação sobre Receptor Comum

Estipulados os parâmetros dos filtros adaptativos, mediante o controle de qualidade do tratamento do fantasma nas seções empilhadas, estes foram aplicados às famílias de receptor comum (Figura 39) do hidrofone (Sub-figura 39(a)) e do acelerômetro integrado (Sub-figura 39(b)), de maneira a filtrar todos os traços pertencentes à família geradora do traço empilhado, sobre o qual foi estimado o filtro. Foram comparadas as famílias de receptor comum abertas e



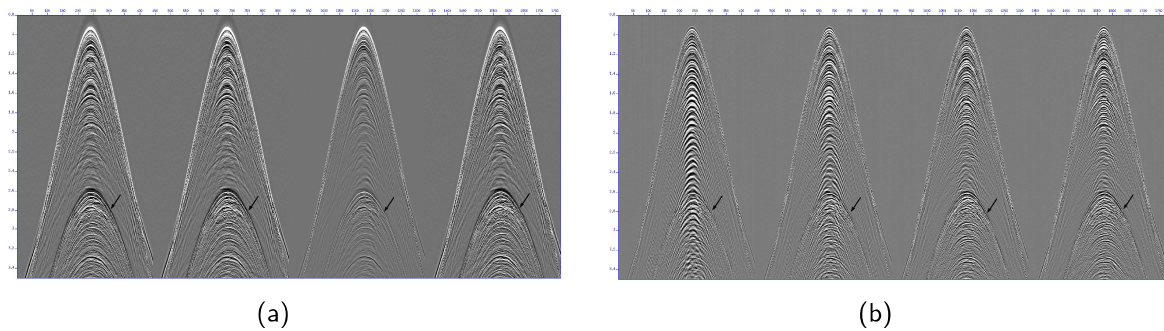


Figura 39 – Famílias de receptor comum de entrada para o tratamento do fantasma (*deghosting*). Em (a) temos o hidrofone, e em (b), o acelerômetro integrado. As setas pretas destacam a múltipla composta pelo fantasma e pela *peg-leg* do receptor.

suas seções empilhadas, nos domínios do tempo e da frequência (dentro da janela de controle de qualidade entre a múltipla e o fundo do mar), dos resultados da decomposição acústica para tratamento do fantasma utilizando filtros adaptativos de Wiener-Levinson e IRLS obtidos sob uma janela longa, com *crossghosting*, e uma curta. As subseções 4.4.2.1 e 4.4.2.2 abaixo expõem e discutem os resultados da aplicação deste procedimento.

#### 4.4.2.1 Janela Longa

Os resultados da decomposição acústica para tratamento do fantasma, utilizando janela longa sobre as famílias de receptores abertos, estão expostos na Figura 40, utilizando Wiener-Levinson e IRLS. Por se tratar de dados de lâmina d'água profunda, a abordagem unidimensional na modelagem do operador do fantasma, gerou um artefato hiperbólico do evento do fundo do mar com o mesmo atraso do fantasma, visíveis nas famílias de receptores abertas da Figura 40.

Embora os artefatos dos operadores de fantasmas do *crossghosting* estivessem visíveis nas famílias de receptores, principalmente nos traços com afastamentos longos, tanto na decomposição com Wiener-Levinson quanto com IRLS, as seções empilhadas de receptores próximos dos campos ascendentes de descendentes, resultantes das decomposições utilizando filtros Wiener-Levinson e IRLS (Figura 41), expuseram qualidade satisfatória, sugerindo que a abordagem unidimensional funciona bem para afastamentos fonte-receptor curtos, ou seja, com ângulos de incidência próximos de zero.

A despeito da presença do artefato dos operadores de fantasma nos *gathers*, as seções empilhadas do *deghosting* com IRLS apresentaram conteúdo de ruído incoerente ligeiramente menor que o *deghosting* com Wiener-Levinson, quando se observa as seções empilhadas no domínio do tempo (Figura 41); além disso, observando a região detalhada da Figura 42, observa que a decomposição acústica com IRLS resolveu bem a situação ruidosa de amplitude anômala.

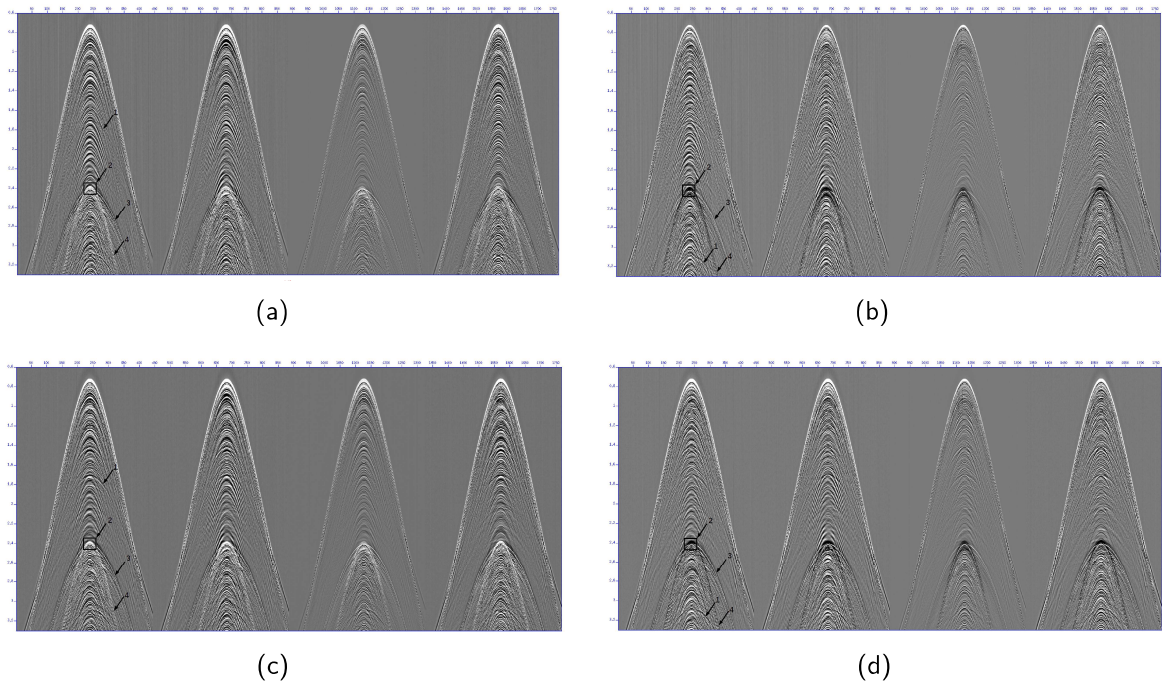


Figura 40 – Resultado da decomposição acústica unidimensional, Wiener-Levinson e IRLS, aplicadas aos *gathers* de receptores. Os campos ascendente e descendente são respectivamente, (a) e (b), para Wiener-Levinson, e (c) e (d), para IRLS. As setas com numeração 1 indicam as reflexões primárias sobre os campos ascendentes e descendentes; as setas 2 apontam para a zona de interseção entre o evento real e o artefato; as setas 3 indicam o fantasma real enquanto as 4, o artefato do operador de fantasma.

Estes fatos justificam a redução das amplitudes nas bandas de alta frequência nos espectros médios obtidos dentro das janelas de controle de qualidade entre o fundo do mar e a múltipla (Figuras 43 e 44). Além disso, nas janelas de controle de qualidade e extração dos espectros de amplitude, há a presença de artefatos de borda de filtro quando se filtra com Wiener-Levinson, o que não ocorreu com o IRLS. A média das amplitudes *RMS* sobre a janela de controle de qualidade foi de  $2.059034e+03$  para filtragem com Wiener, e de  $1.569414e+03$  com IRLS, comprovando a robustez superior da filtragem com IRLS em relação à com Wiener-Levinson.

Como o objetivo do tratamento do fantasma é fornecer uma versão do dado livre deste ruído e com qualidade satisfatória nas famílias de receptor comum, constatou-se que a abordagem unidimensional com janela longa e aplicação do *crossghosting* não correspondeu ao esperado para este tipo de dado de água profunda, uma vez que os operadores de fantasmas geraram artefatos coerentes não desejados. Embora não tenha sido testada uma abordagem multidimensional neste estudo, estes resultados ruidosos em água profunda com janela longa e *crossghosting*, sugerem a necessidade de soma adaptativa multidimensional, além da construção de operadores de fantasmas associados ao afastamento fonte-receptor do traço a ser filtrado, controlado pelo ângulo de incidência presente na equação 2.7 que

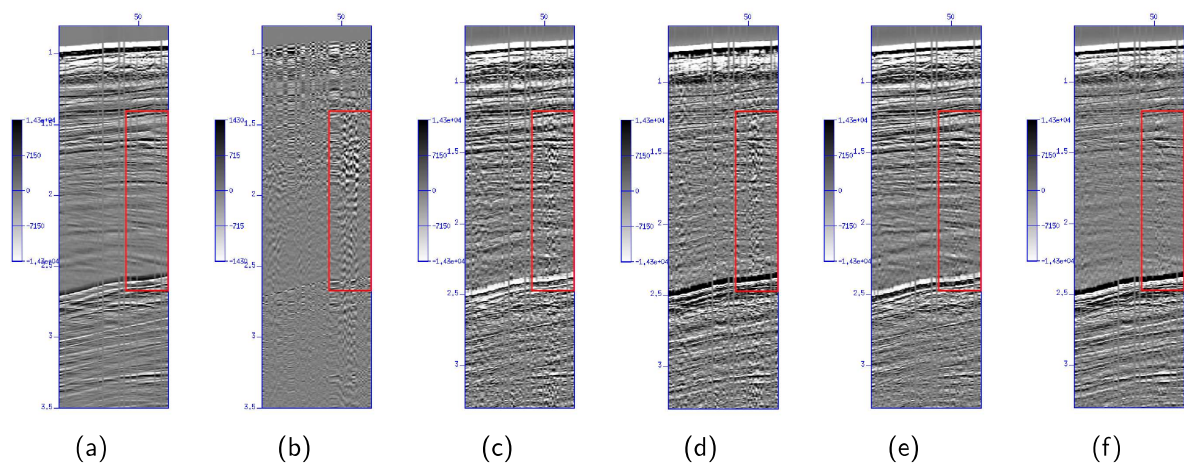


Figura 41 – Resultado dos empilhamentos da decomposição acústica unidimensional, Wiener-Levinson e IRLS, aplicadas aos *gathers* de receptores. A região vermelha está destacada na Figura 42. (a) Hidrofone. (b) Acelerômetro integrado. (c) Campo Ascendente Wiener-Levinson. (d) Campo Descendente Wiener-Levinson. (e) Campo Ascendente IRLS. (f) Campo Descendente IRLS.

determina o atraso do fantasma em relação à reflexão primária, garantindo o correto mapeamento do evento dentro da família de receptor aberta.

#### 4.4.2.2 Janela Curta

Os resultados utilizando 200 coeficientes de filtro adaptativo, calculado sobre a janela curta entre o fundo do mar e a múltipla, na seção empilhada de receptores próximos, sem executar o *crossghosting*, para processar o fantasma do receptor sobre as famílias de receptor comum, estão expostos na Figura 45.

Desta vez, notou-se a ausência de artefatos (Figura 45), decorrentes dos operadores de fantasmas calculados durante o *crossghosting*, em ambos os casos (Wiener e IRLS); uma vez que o *crossghosting* usando operador unidimensional não foi aplicado durante a estimativa do filtro, espera-se que os resultados não apresentem estes artefatos. Contudo, no domínio do tempo, estas famílias de receptor comum representando os resultados da decomposição acústica, apresentaram-se semelhantes, com pequenas diferenças em termos de qualidade, tanto nas famílias de receptor comum (Figura 45) quanto nas seções empilhadas expostas na Figura 46.

Sobre as seções de receptores próximos empilhadas, no entanto, consegue-se identificar melhor as pequenas diferenças entre os dois métodos de filtragem utilizados quando observadas no domínio da frequência. Analisando os espectros de amplitude médios das Sub-figuras 47(b), 47(d), 48(b) e 48(d), contidos nas Figuras 47 e 48, extraídos das janelas de controle de qualidade (Sub-figuras 47(a), 47(c), 48(a) e 48(c)) sobre as seções empilhadas, detalhadas na Figura 46, pode-se perceber que os campos obtidos com filtro

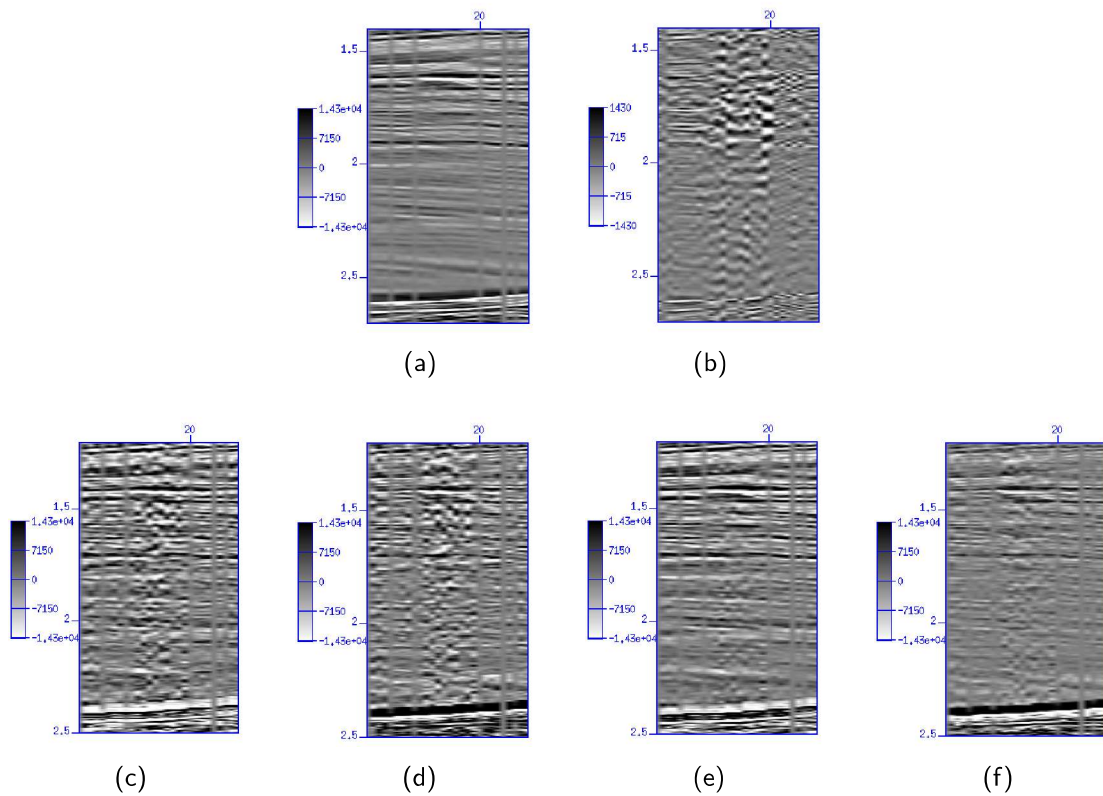


Figura 42 – Detalhe dos empilhamentos da Figura 41. (a) Hidrofone. (b) Acelerômetro integrado. (c) Campo Ascendente Wiener-Levinson. (d) Campo Descendente Wiener-Levinson. (e) Campo Ascendente IRLS. (f) Campo Descendente IRLS.

adaptativo IRLS, apresentaram ligeiro ganho nas amplitudes da banda útil no campo ascendente, e ligeira redução das amplitudes sobre as bandas de médias e altas frequências no campo descendente, em relação aos campos obtidos com filtragem Wiener-Levinson.

#### 4.4.3 Tratamento da *peg-leg*

Os campos resultantes da decomposição acústica utilizando IRLS, foram selecionados como dados de entrada para o procedimento de *depeglegging*, no intuito de atenuar a múltipla remanescente composta somente pela *peg-leg*. As ligeiras melhorias na qualidade dos resultados da decomposição acústica motivaram esta seleção.

As Figuras 49 e 50 expõem, respectivamente, os resultados sobre as famílias de receptores comum, e suas respectivas seções de empilhamentos próximos. É notória a semelhança dos resultados no domínio do tempo, indicando que o filtro Wiener-Levinson foi suficiente para processar a *peg-leg*, tornando-se a técnica ótima para a situação fornecida pelos resultados do *deghosting* executado neste estudo; bem como percebe-se a eficácia dos métodos em atenuar a *peg-leg*, gerando seções empilhadas com qualidade intermediária entre



a componente do hidrofone e a vertical do levantamento sísmico, quando se observa a evolução do dado exposta na Figura 51.

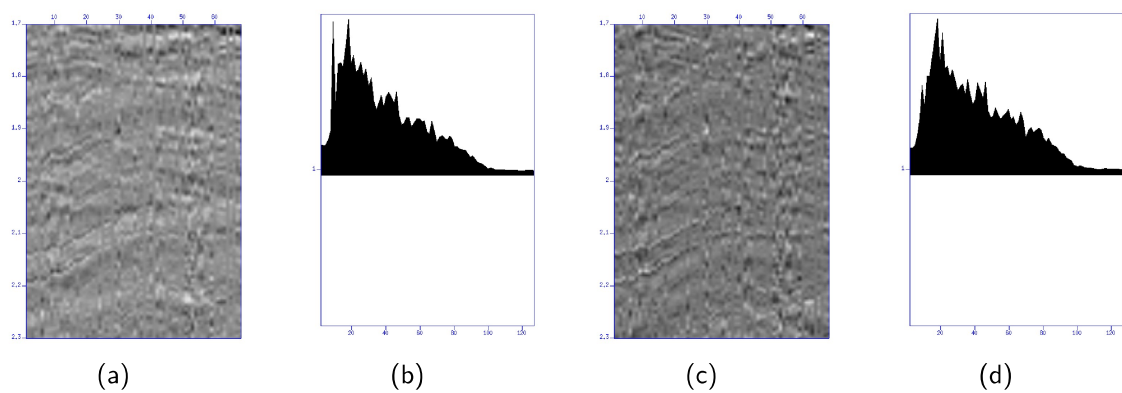


Figura 43 – *Deghosting* com Wiener-Levinson de janela longa: janela sobre seção empilhada do campo ascendente no domínio do tempo (a), e seu espectro de amplitude médio (b); janela sobre seção empilhada do campo descendente no domínio do tempo (c), e seu espectro de amplitude médio (d).

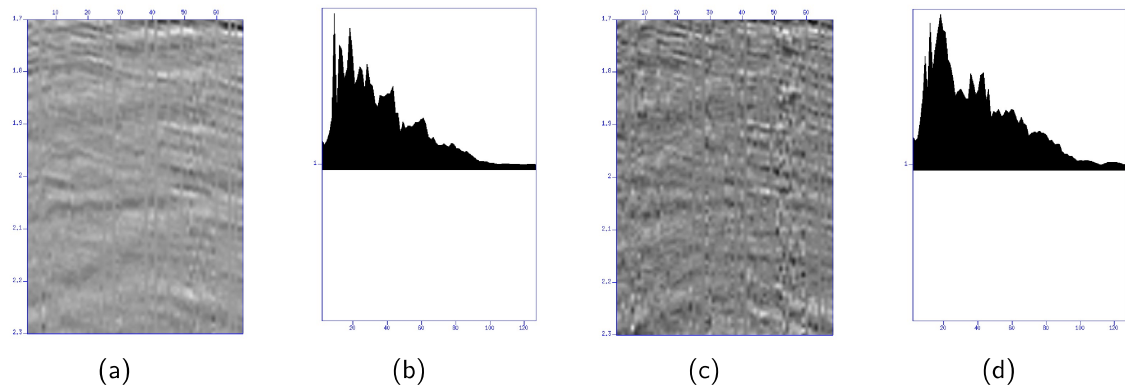


Figura 44 – *Deghosting* com IRLS de janela longa: janela sobre seção empilhada do campo ascendente no domínio do tempo (a), e seu espectro de amplitude médio (b); janela sobre seção empilhada do campo descendente no domínio do tempo (c), e seu espectro de amplitude médio (d).

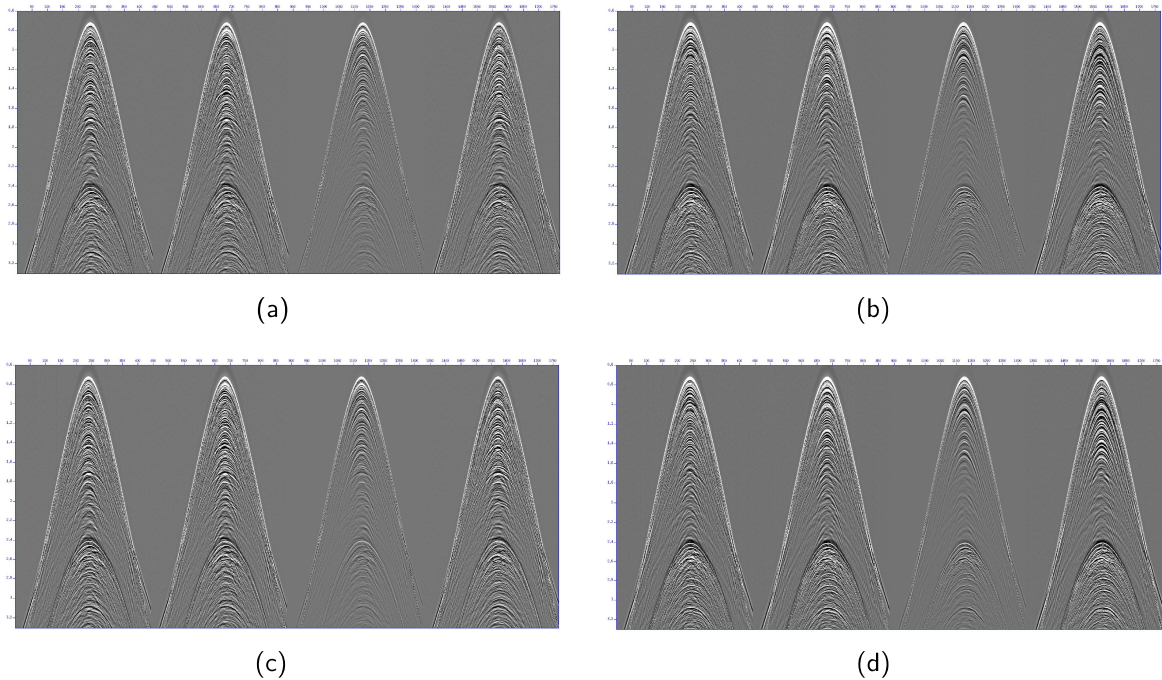


Figura 45 – Resultado da decomposição acústica unidimensional, Wiener-Levinson e IRLS, aplicadas aos *gathers* de receptores utilizando janela de estimativa curta. Os campos ascendente e descendente são respectivamente, (a) e (b), para Wiener-Levinson, e (c) e (d), para IRLS.

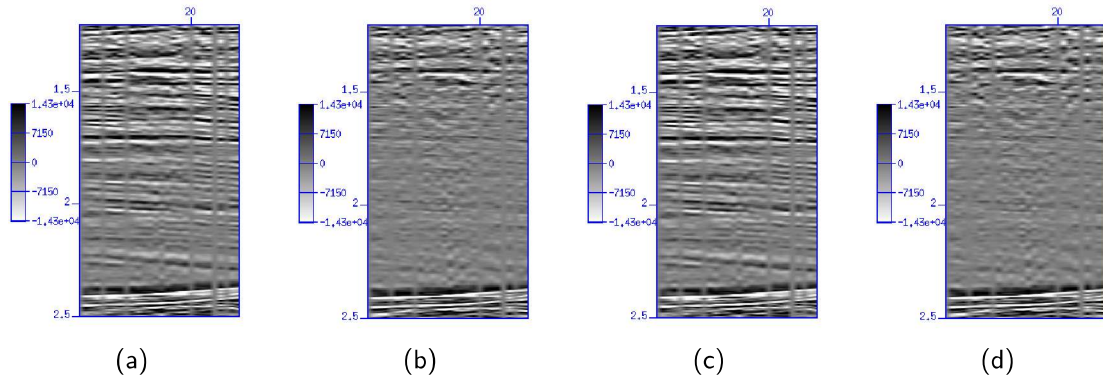


Figura 46 – Detalhe das seções empilhadas resultantes do *deghosting* no receptor, utilizando janela de estimativa de filtro curta. Os campos ascendente e descendente são respectivamente, (a) e (b), para Wiener-Levinson, e (c) e (d), para IRLS.

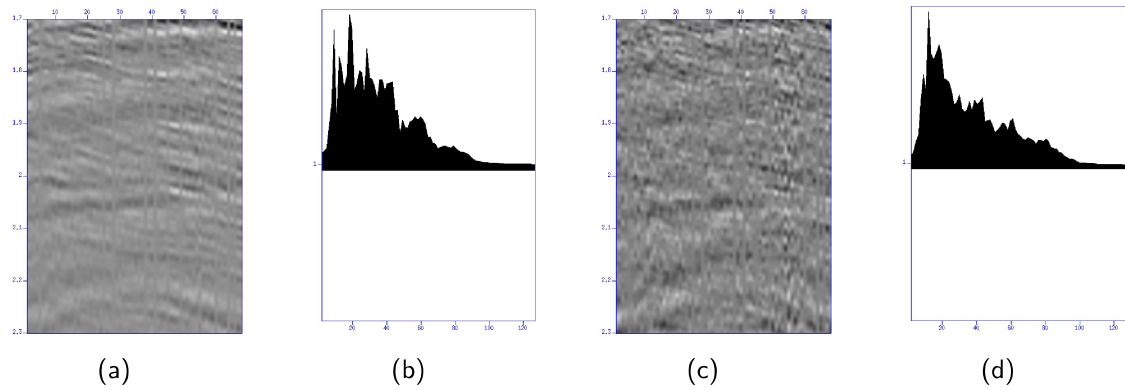


Figura 47 – *Deghosting* com Wiener-Levinson de janela curta: janela sobre seção empilhada do campo ascendente no domínio do tempo (a), e seu espectro de amplitude médio (b); janela sobre seção empilhada do campo descendente no domínio do tempo (c), e seu espectro de amplitude médio (d).

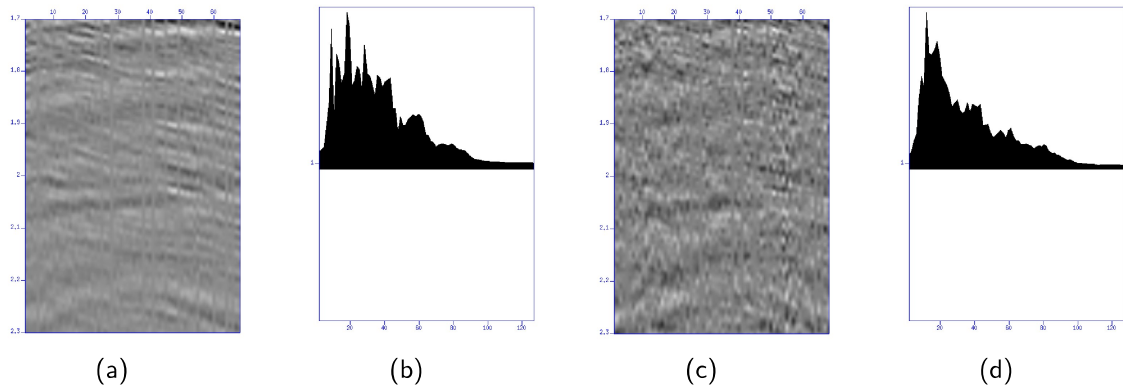


Figura 48 – *Deghosting* com IRLS de janela curta: janela sobre seção empilhada do campo ascendente no domínio do tempo (a), e seu espectro de amplitude médio (b); janela sobre seção empilhada do campo descendente no domínio do tempo (c), e seu espectro de amplitude médio (d).

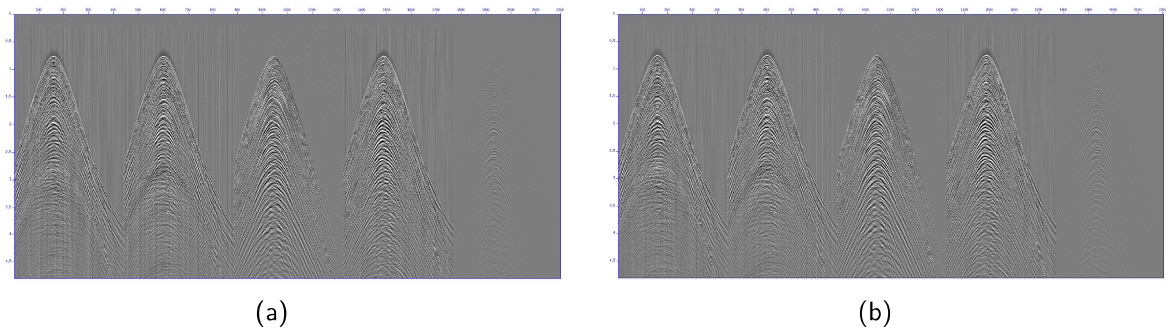


Figura 49 – Resultado do *depegging* utilizando filtros preditivos Wiener-Levinson (a) e IRLS (b), calculados sobre o respectivo traço resultante do empilhamento dos campos provenientes do *deghosting*, e aplicados sobre os receptores.

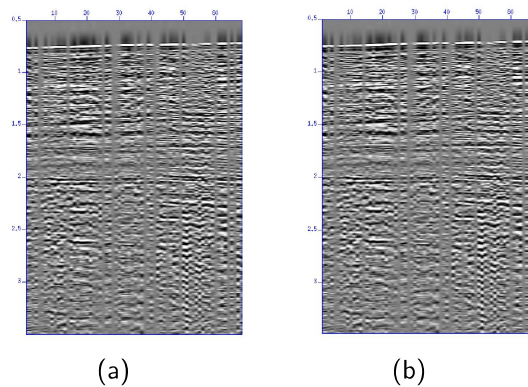


Figura 50 – Receptores próximos empilhados resultantes do *Depegging*, utilizando filtros preditivos Wiener-Levinson (a) e IRLS (b).

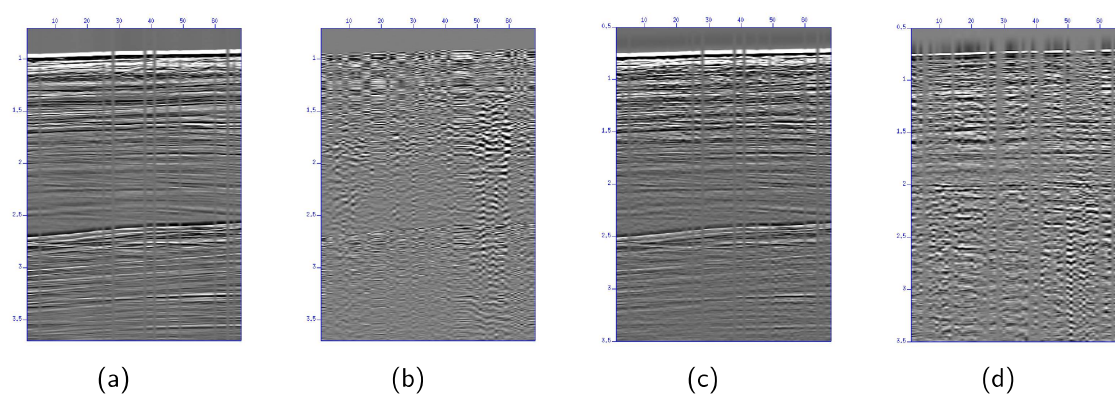


Figura 51 – Evolução do dado observada sobre seções de receptores próximos empilhadas. O hidrofone (a) e o acelerômetro integrado (b) servem de entrada para obtenção do campo ascendente por IRLS (c), o qual é submetido à filtragem IRLS da *peg-leg* (d).

## 5 Conclusões

Embora a qualidade satisfatória dos resultados da aplicação da soma adaptativa com IRLS (Figura 51), tanto na decomposição em campos ascendente e descendente quanto na atenuação da *peg-leg*, nos incline a recomendá-la como opção robusta, deve-se considerar os recursos computacionais disponíveis, assim como a urgência na apresentação de resultados do projeto sobre o qual deseja-se aplicá-la. Durante um fluxo de processamento sísmico tradicional, costuma-se reamostrar os dados na dimensão do tempo após a remoção das assinaturas de fonte e instrumento de registro (normalmente por um filtro inverso ou de fase, aplicado sobre uma assinatura de campo remoto modelado com base nos parâmetros de aquisição); esta versão reamostrada pode ser mais adequada para aplicação do método de decomposição robusta em campos ascendente e descendente por IRLS, uma vez que a quantidade de amostras reduzida, resultaria em menor tempo de processamento. Além disso, com as assinaturas tratadas, os traços de ambas as componentes se apresentarão de forma semelhantes, revelando a natureza proporcional das grandezas registradas.

Ainda sobre tempo de execução, este pode ser bem controlado utilizando parâmetros adequados, em especial, avaliando os que mais impactam no tempo de processamento: o número de coeficientes do filtro  $n$  e o critério de convergência. O primeiro define o tamanho da matriz definida positiva que será processada, a qual, neste experimento, se resolve em  $\frac{n^3}{3}$  operações de ponto flutuante devido a fatoração Cholesky pelo produto externo somada à resolução dos sistemas triangulares em  $2n^2$  operações de ponto flutuante (GOLUB; VAN LOAN, 1996). O critério de convergência adotado foi a diferença da norma  $L_1$  entre os filtros calculados; este deve representar a acurácia satisfatória para aproximação do modelo desejado.

Recomenda-se avaliar estes métodos no processamento das famílias de receptor comum abertas, utilizando a janela de estimativa do filtro sobre os receptores empilhados; quando a janela de estimativa do filtro contiver os eventos múltiplos, aplicar o *crossghosting* atribuindo o ângulo de incidência, implícito na construção dos operadores dos fantasmas, condizente com o valor de afastamento fonte-receptor (*offset*) igual a zero. No entanto, para refletores profundos, a curva de *moveout* da múltipla em relação ao afastamento fonte-receptor será mais suave, o que exigirá uma abordagem bidimensional na modelagem do fantasma. Nestes casos, seria mais seguro trabalhar sob uma janela de estimativa curta, excluindo os eventos múltiplos.

Considerando uma área de produção com estruturas ativas, sobre a qual deseja-se monitorar a produção através da sísmica, recomenda-se o uso de aquisição de fundo marinho para recuperar cobertura adequada na imagem, assim como estudos de comparação das mudanças na imagem ao longo do tempo, caracterizando a sísmica 4D. Neste caso em

específico, de sísmica  $4D$ , o uso do IRLS na soma adaptativa intrínseca à decomposição acústica utilizada neste estudo, pode ser uma alternativa segura, robusta e preferível, sendo que qualquer melhoria, mesmo que pequena, nas versões resultantes de cada etapa do processamento  $4D$ , são sempre almejadas, uma vez que um fluxograma de processamento sísmico  $4D$  é construído de forma a submeter o dado a algumas pequenas correções que, cumulativamente, agregam mais valor ao produto, conferindo qualidade satisfatória e reduzindo as incertezas do estudo.

Os métodos apresentados neste texto, podem ser expandidos para casos multidimensionais, adequando os filtros em operadores matriciais, no caso  $2D$  (ROSA, 2018; SNEHA, 2018), ou volumétricos, no caso  $3D$  (HUGONNET *et al.*, 2011), assim como serem adaptados a uma abordagem de filtragem janelada, controlada por parâmetros de transição entre as janelas para evitar marcas de borda. Um estudo sobre a curva de tempo de atraso do fantasma em função do ângulo de incidência (determinado pelo *offset*) pode ser desenvolvido afim de obter estimativas de filtros que contemplem a natureza multidimensional da propagação da onda sísmica.



## Referências

- AMUNDSEN, L.; REITAN, A. Decomposition of multicomponent sea-floor data into upgoing and downgoing p- and s-waves. *Geophysics*, v. 60, p. 563–572, março–abril 1995. Citado 3 vezes nas páginas 1, 9 e 11.
- ANG, Y. W.; BALE, R.; GRION, S.; HOLDEN, J. The ups and downs of ocean-bottom seismic processing: Applications of wavefield separation and up-down deconvolution. *The Leading Edge*, Special Section: Multicomponent Seismic, p. 936–943, outubro 2010. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 13.
- BERESFORD, G.; JANEX, G. A practical approach to obc summation and geophone calibration in areas of shallow water and hard seafloor. In: *9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*. SBGF, Salvador, Brasil: [s.n.], 1996. Citado na página 1.
- CLAERBOUT, J. F. *Fundamentals of Geophysical Data Processing - with applications to petroleum prospecting*. 1a. ed. [S.l.]: Blackwell Scientific Publications, 1976. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 74.
- DUARTE, O. de O. *Dicionário Enciclopédico INGLÊS-PORTUGUÊS de geofísica e geologia*. 2a. ed. SBGF: Rio de Janeiro, 2003. Citado 7 vezes nas páginas 12, 24, 58, 66, 67, 72 e 73.
- EDME, P.; SINGH, S. C. Receiver function decomposition of obc data: theory. *Geophysics*, v. 177, p. 966–977, fevereiro 2009. Citado 6 vezes nas páginas 1, 2, 6, 8, 9 e 13.
- GILAT, A.; SUBRAMANIAM, V. *Numerical for Engineers and Scientists*. 2a. ed. John Wiley & Sons, Inc.: Danvers, 2011. Citado na página 65.
- GOLUB, G. H.; VAN LOAN, C. F. *Matrix Computation*. 3a. ed. Johns Hopkins: Londres, 1996. Citado 8 vezes nas páginas 12, 24, 34, 51, 59, 60, 61 e 67.
- GUITTON, A.; VERSCHUUR, D. J. Adaptive subtraction of multiples using the l1-norm. *Geophysical Prospecting*, EAGE, v. 52, p. 27–38, 2004. Citado 5 vezes nas páginas 2, 13, 14, 20 e 63.
- HUGONNET, P.; BOELLE, J.; HERRMANN, P.; PRATA, F.; LAFRAM, A. Pz summation of 3d waz obs receiver gathers. In: *73rd EAGE conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC*. Viena, Austria: [s.n.], 2011. Citado 15 vezes nas páginas 1, 2, 3, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 31, 32, 33, 52 e 69.
- KEYS, R. G.; FOSTER, D. J. Comparison of seismic inversion methods on a single real data set. In: *1994 SEG Postconvention Workshop*. SEG: [s.n.], 1998. p. 1–12. Citado na página 16.
- LI, Z.-X.; LI, Z.-C.; LU, W. Multichannel predictive deconvolution based on the fast iterative shrinkage-thresholding algorithm. *Geophysics*, SEG, v. 81, n. 1, p. 17–30, janeiro 2016. Citado 5 vezes nas páginas 13, 24, 63, 64 e 67.
- MAHABOOB, B.; VENKATESWARLU, B.; SANKAR, C. N. J. R.; BALASIDDAMUNI, P. A treatise on ordinary least squares estimation of parameters of linear model. *International*



*Journal of Engineering & Technology*, SPC, v. 7, n. 4, p. 518–522, october 2018. Citado na página 62.

MUIJS, R.; ROBERTSSON, J. O. A.; HOLLIGER, K. Data-driven adaptive decomposition of multicomponent seabed records. *Geophysics*, v. 69, n. 5, p. 1329–1337, setembro-outubro 2004. Citado na página 1.

MUIJS, R.; ROBERTSSON, J. O. A.; HOLLIGER, K. Data-driven adaptive decomposition of multicomponent seabed seismic recordings: Application to shallow-water data from the north sea. *Geophysics*, v. 72, n. 6, p. V133–V142, novembro–dezembro 2007. Citado na página 1.

OLIVEIRA, S. A. M.; LUPINACCI, W. M. L1 norm inversion method for deconvolution in attenuating media. *Geophysical Prospecting*, EAGE, p. 1–7, 2013. Citado 5 vezes nas páginas 13, 24, 63, 64 e 67.

PORSANI, M. J.; URSIN, B. Direct multichannel predictive deconvolution. *Geophysics*, SEG, v. 72, n. 2, p. 11–27, março 2007. Citado na página 13.

ROSA, A. R. *Análise do Sinal Sísmico*. 2a. ed. SBGf: Rio de Janeiro, 2018. Citado 16 vezes nas páginas 5, 7, 8, 10, 11, 12, 31, 34, 52, 57, 58, 59, 60, 66, 67 e 69.

RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. da R. *Cálculo Numérico, Aspectos teóricos e computacionais*. 2a. ed. Pearson Makron: São Paulo, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 13, 64 e 65.

SCALES, J. A.; GERSZTENKORN, A. Robust methods in inverse theory. *Inverse Problems*, UK, n. 4, p. 1071–1091, março 1988. Citado 3 vezes nas páginas 2, 13 e 20.

SNEHA, H. 2d convolution in image processing. *allaboutcircuits.com*, novembro 2018. Citado na página 52.

SOUBARAS, R. Ocean bottom hydrophone and geophone processing. In: *66th Annual International Meeting*. SEG: [s.n.], 1996. Citado 12 vezes nas páginas 1, 2, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 31, 32 e 69.

VERSCHUUR, D. J. *Seismic Multiple Removal Techniques - past, present and future*. 1a. ed. EAGE: The Netherlands, 2006. Citado 7 vezes nas páginas 6, 14, 16, 20, 33, 68 e 69.

VERSCHUUR, D. J.; SCHALKWIJK, K. M.; WAPENAAR, C. P. A. Adaptive decomposition of multicomponent ocean-bottom seismic data into downgoing and upgoing p- and s-waves. *Geophysics*, v. 68, p. 1091–1102, maio–junho 2003. Citado 3 vezes nas páginas 1, 8 e 9.

WANG, Y.; GRION, S. Pz calibration in shallow waters: the britannia obs example. In: *Las Vegas Annual Meeting*. SEG: [s.n.], 2008. p. 1088–1092. Citado 3 vezes nas páginas 1, 5 e 8.

WANG, Y.; GRION, S.; BALE, R. What comes up must have gone down the principle and application of up-down deconvolution for multiple attenuation of ocean bottom data. *CSEG Records*, v. 34, n. 10, p. 16–20, dezembro 2009. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 10.

YILMAZ, O. *Seismic Data Analysis - processing, inversion and interpretation of seismic data*. 2a. ed. USA: Doherty, SEG, 2001. v. 1. Citado 4 vezes nas páginas 12, 16, 20 e 25.

# APÊNDICE A – Geometria de Fundo Marinho

## A.1 Absissa do Refletor

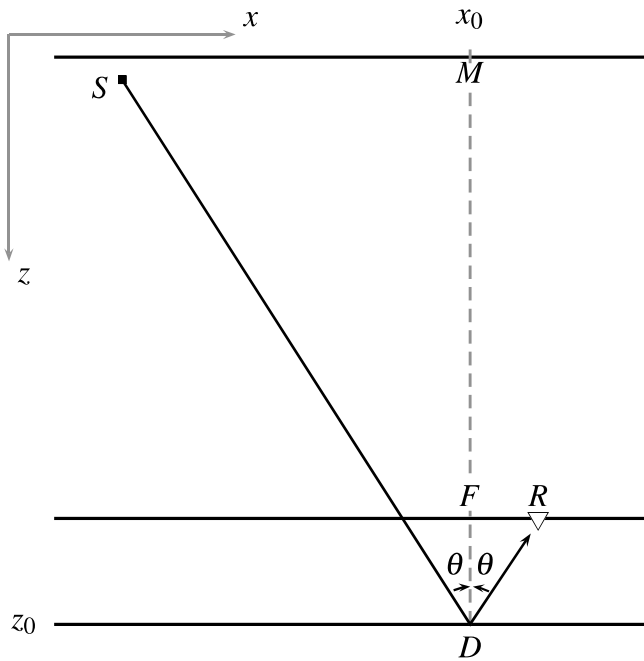


Figura 52 – Geometria de Fundo Marinho.

Aplicando a Lei de Snell nas condições da Figura 52, extraímos as seguintes relações:

$$\frac{|RF|}{|DF|} = \frac{|MS|}{|DM|} = \tan \theta, \quad (\text{A.1})$$

o que implica em

$$x_0 = \frac{x_r(z_s - z_0) + x_s(z_r - z_0)}{z_s + z_r - 2z_0} \quad (\text{A.2})$$

Considerando que a fonte está localizada na superfície d'água, sua profundidade  $z_s$  será igual a zero, logo, conclui-se que

$$x_0 = \frac{(x_r + x_s)z_0 - x_s z_r}{2z_0 - z_r}, \quad (\text{A.3})$$

relacionando a absissa do refletor com sua profundidade, variando as fontes (Figura 53), de maneira que a medida em que a profundidade diminui, as reflexões convergem para a projeção vertical do receptor, enquanto que para uma mesma fonte, as reflexões se aproximam da absissa do ponto médio a medida em que se aumenta a profundidade.

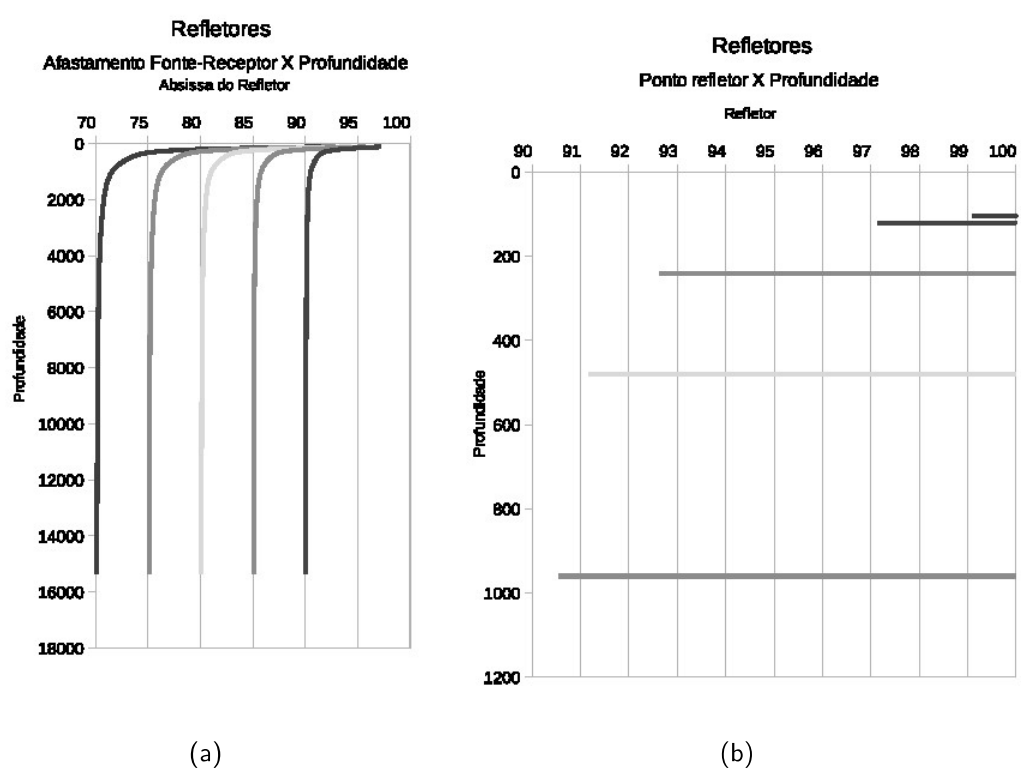


Figura 53 – Abscissa do refletor na sísmica de fundo marinho. (a) Fonte vs Profundidade. (b) Profundidade vs Fonte.

# APÊNDICE B – Sinais e Sistemas

## B.1 Convolução

### B.1.1 Caso Unidimensional 1D

Dados dois sinais representados por duas séries temporais discretas unidimensionais:

$$w(t) \equiv w_t = \{\dots, w_{-2}, w_{-1}, w_0, w_1, w_2, \dots\}$$

e

$$r(t) \equiv r_t = \{\dots, r_{-2}, r_{-1}, r_0, r_1, r_2, \dots\},$$

define-se convolução como a seguinte operação de filtragem linear, no domínio do tempo:

$$s_t = w_t * r_t = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} w_{\tau} r_{t-\tau}. \quad (\text{B.1})$$

A equação (B.1) pode ser expressa na forma matricial (equação (B.2)); considerando ambos os sinais causais, ou seja, definidos para tempos positivos ( $w_{-t} = r_{-t} = 0, \forall t \in \mathbb{N}$ ), temos:

$$s_t = w_t * r_t = Wr = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ \vdots \\ s_{m+n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_0 & 0 & \dots & 0 \\ w_1 & w_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_m & w_{m-1} & \dots & w_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & w_m \end{bmatrix}_{(m+n-1) \times n} \begin{bmatrix} r_0 \\ r_1 \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix}. \quad (\text{B.2})$$

Denominarei

$$W = \begin{bmatrix} w_0 & 0 & \dots & 0 \\ w_1 & w_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_m & w_{m-1} & \dots & w_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & w_m \end{bmatrix}_{(m+n-1) \times n}$$

como matriz convolucional de  $w_t$ .

Aplicando a transformada de Fourier na equação (B.1), deduz-se o teorema da convolução no domínio do tempo, fundamental da transformada de Fourier (ROSA, 2018):

$$r_t * w_t \Leftrightarrow R(\omega)W(\omega) = A_R(\omega)A_W(\omega)\exp\{i[\phi_R(\omega) + \phi_W(\omega)]\}, \quad (\text{B.3})$$

ou seja, uma convolução no domínio do tempo equivale a uma multiplicação no domínio da frequência (ROSA, 2018); como se trata da multiplicação de duas funções exponenciais complexas, conclui-se mediante sua forma polar, que a convolução no tempo equivale a multiplicar os espectros de amplitude e somar os de fase, das funções que participam da operação.

## B.2 Correlação Cruzada

Dadas duas funções expressas como séries temporais,  $w_t$  e  $r_t$ , a correlação cruzada entre elas é definida como:

$$\phi_{wr}(\tau) = w_t \otimes r_t = w_t * r_{-t} = \sum_{t=-\infty}^{\infty} w_t r_{t-\tau} = \sum_{t=-\infty}^{\infty} w_{t+\tau} r_t. \quad (\text{B.4})$$

A expressão (B.4) equivale à convolução da primeira função,  $w_t$ , com a segunda,  $r_t$ , revertida no tempo,  $r_{-t}$ ; esta reversão faz com que o resultado apresente sempre uma parte anti-causal com o *lag zero* localizado no número de coeficientes da segunda função (DUARTE, 2003). Apresentada sob a forma de convolução, conclui-se que a correlação cruzada não é uma operação comutativa,  $\phi_{wr} \neq \phi_{rw}$ , exceto quando as funções são pares e iguais (ROSA, 2018).

Na prática, costuma-se utilizar a forma normalizada da correlação, dada por (DUARTE, 2003)

$$\bar{\phi}_{wt} = \frac{\phi_{wt}}{\sqrt{\sum_j w_j^2 \sum_j r_j^2}}. \quad (\text{B.5})$$

desta maneira, calcula-se o grau de similaridade entre as funções  $w_t$  e  $r_t$ , com seus coeficientes variando entre -1 e 1 (ROSA, 2018; DUARTE, 2003).

Quando as duas funções envolvidas no cálculo da correlação cruzada são a mesma, a operação é denominada autocorrelação, e pode ser utilizada para estimar a periodicidade da função.

# APÊNDICE C – Resolução de Sistemas Lineares

## C.1 Recursão de Levinson

A matriz quadrada não singular de Toeplitz  $T \in \mathbf{R}^{n \times n}$ , apresenta valores constantes ao longo de cada diagonal. Definida como  $t_{ij} = r_{i-j} \forall i, j \in \mathbf{N}; r_k \in \mathbf{R}^n \forall k \in \mathbf{Z}$ , é positiva definida ( $x^T T x > 0, \forall x \in \mathbf{R}^n$ ), persimétrica (simétrica em relação à sua antidiagonal, ou seja  $T = E T^T E$ , sendo  $E = I(:, n : -1 : 1)$  a matriz de permuta cujos elementos são iguais a zero exceto sobre sua antidiagonal, iguais à unidade), e está relacionada com um conjunto de problemas de predição linear (GOLUB; VAN LOAN, 1996) generalizados pelo sistema:

$$T_k x = b = (b_1, \dots, b_k). \quad (\text{C.1})$$

Resolvido (C.1) para  $1 \leq k < n$ , pode-se resolver

$$\begin{bmatrix} T_k & E_k r \\ r^T E_k & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b \\ b_{k+1} \end{bmatrix}, \quad (\text{C.2})$$

mediante

$$\mu = \frac{b_{k+1} - r^T E_k x}{1 + r^T y} \quad (\text{C.3})$$

e

$$v = x + \mu E_k y, \quad (\text{C.4})$$

onde  $y$  é a solução do sistema de Yule-Walker  $T_k x = -r = (r_1, \dots, r_k)$  (GOLUB; VAN LOAN, 1996).

Aplicando o procedimento recursivamente até  $k = n - 1$  obtemos a solução de (C.1) para  $k = n$ . O algoritmo abaixo realiza a recursão de Levinson e obtem o vetor  $x$  com  $n = k + 1$  coeficientes utilizando  $4n^2$  operações de ponto flutuante (GOLUB; VAN LOAN, 1996; ROSA,

2018):

$$\begin{aligned}
& y_1 = -r_1; x_1 = b_1; \beta = 1; \alpha = -r_1 \\
& \textbf{for} k = 1 : n - 1 \\
& \quad \beta = (1 - \alpha^2)\beta \\
& \quad \mu = \frac{b_{k+1} - \sum_{i=1}^k r_i x_{k+1-i}}{\beta} \\
& \quad \textbf{for} i = 1 : k \\
& \quad \quad v_i = x_i + \mu y_{k+1-i} \\
& \quad \quad x_i = v_i \\
& \quad \textbf{end} \\
& \quad x_{k+1} = \mu \\
& \quad \textbf{if} k < n - 1 \\
& \quad \quad \alpha = \frac{-r_{k+1} + \sum_{i=1}^k r_i x_{k+1-i}}{\beta} \\
& \quad \quad \textbf{for} i = 1 : k \\
& \quad \quad \quad z_i = y_i + \mu y_{k+1-i} \\
& \quad \quad \quad y_i = z_i \\
& \quad \quad \textbf{end} \\
& \quad \quad y_{k+1} = \alpha \\
& \quad \textbf{end} \\
& \textbf{end}
\end{aligned} \tag{C.5}$$

## C.2 Sistemas triangulares

O algoritmo abaixo resolve o sistema triangular inferior  $Ly = b$  por substituição direta de linhas, exigindo  $n^2$  flops; sendo  $L \in \mathbb{R}^{n \times n}$  triangular inferior quadrada, e  $b \in \mathbb{R}^n$  um vetor, o algoritmo abaixo sobrescreve  $b$  com a solução  $y$  de  $Ly = b$  (GOLUB; VAN LOAN, 1996)

$$\begin{aligned}
& b(1) = b(1)/L(1,1) \\
& \textbf{for} i = 2 : n \\
& \quad b(i) = \left( b(i) - \sum_{j=1}^{i-1} L(i,j)y(j) \right) / L(i,i). \\
& \textbf{end}
\end{aligned} \tag{C.6}$$

O algoritmo abaixo resolve o sistema triangular superior  $Ux = b$  por substituição reversa de linhas, exigindo  $n^2$  flops; sendo  $U \in \mathbb{R}^{n \times n}$  triangular superior quadrada, e  $b \in \mathbb{R}^n$  um vetor,

o algoritmo abaixo sobrescreve  $b$  com a solução  $x$  de  $Ux = b$  (GOLUB; VAN LOAN, 1996)

$$\begin{aligned}
 &b(n) = b(n)/U(n, n) \\
 &\quad \mathbf{for} i = n - 1 : -1 : 1 \\
 &\quad \quad b(i) = \left( b(i) - \sum_{j=i+1}^n U(i, j)x(j) \right) / U(i, i). \\
 &\quad \mathbf{end}
 \end{aligned} \tag{C.7}$$

### C.3 Fatoração Cholesky

Dada uma matriz quadrada não singular  $A$ , simétrica e definida positiva, ou seja  $x^T A x > 0, \forall x \in \mathbb{R}^n$  (em termos práticos, significa que não há perda de generalidade com a normalização de sua diagonal principal), o algoritmo abaixo efetua a fatoração Cholesky na versão do produto externo (GOLUB; VAN LOAN, 1996), calculando a matriz triangular inferior com diagonal positiva  $G$ , de modo que  $A = GG^T$  permite resolver o sistema  $Ax = b$  mediante a resolução dos sistemas triangulares  $Gy = b$  (triangular inferior) e  $G^T x = y$  (triangular superior). Para todo  $i \geq j$ ,  $G(i, j)$  sobrescreve  $A(i, j)$ :

$$\begin{aligned}
 &\mathbf{for} k = 1 : n \\
 &\quad A(k, k) = \sqrt{A(k, k)} \\
 &\quad A(k+1 : n, k) = A(k+1 : n, k)/A(k, k) \\
 &\quad \mathbf{for} j = k+1 : n \\
 &\quad \quad A(j : n, j) = A(j : n, j) - A(j : n, k)A(j, k) \\
 &\quad \mathbf{end} \\
 &\mathbf{end}
 \end{aligned} \tag{C.8}$$

Este algoritmo exige  $n^3/3$  operações de ponto flutuante (GOLUB; VAN LOAN, 1996).



# APÊNDICE D – Métodos de Regressão e Estimadores

## D.1 Método dos Mínimos quadrados

O método dos mínimos quadrados, ou em sua sigla inglesa OLS (*Ordinary Least Square*), compreende técnicas de regressão as quais minimizam o quadrado da norma  $L_2$  do resíduo  $\Delta D = Mr - D$  entre o modelo ajustado  $Mr$  e o dado mensurado  $D$ . É o método mais aplicado em análise de dados e é a base de outros métodos (MAHABOOB *et al.*, 2018). O método dos consiste em resolver o denominado sistema linear de equações normais  $M^T Mr = M^T D$ , cuja solução  $r$  corresponde aos coeficientes do modelo estimado na regressão. Uma dedução das equações normais está desenvolvida abaixo.

Dada a função erro da norma  $L_2$

$$\|\Delta D\|_2^2 = E(r) = \sum_i \left| \sum_k M_{ik} r_k - D_i \right|^2 \quad (D.1)$$

a qual consiste num parabolóide de revolução (FIGURA), seu mínimo igualando seu gradiente a zero,  $\nabla E(r) = 0$ , obtemos

$$\begin{aligned} \nabla E(r) &= \frac{\partial E(r)}{\partial r_n} = \sum_i 2M_{in} \left( \sum_k M_{ik} r_k - D_i \right) = 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow \sum_i \left( \sum_k M_{ik} r_k M_{in} - D_i M_{in} \right) &= \sum_i \sum_k M_{ik} r_k M_{in} - \sum_i D_i M_{in} = 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow \sum_i \sum_k M_{ik} r_k M_{in} &= \sum_i D_i M_{in} = \\ = \sum_i M_{ik} M_{in} \sum_k r_k &= \sum_i D_i M_{in} = \\ = \sum_i M_{ki} M_{in} \sum_k r_k &= \sum_i M_{ni} D_i. \end{aligned} \quad (D.2)$$

A equação (D.2) pode ser expressa em notação matricial da seguinte forma

$$M^T Mr = M^T D. \quad (D.3)$$

O sistema linear da equação (D.3) é denominado sistema de equações normais; este sistema é consistente nele existindo pelo menos uma solução não trivial, que nos fornece os coeficientes do estimador dos mínimos quadrados  $r$  (MAHABOOB *et al.*, 2018).

## D.2 Método dos Mínimos Absolutos

O método dos mínimos absolutos propõe o cálculo dos parâmetros de um modelo, o qual fornece o somatório mínimo dos módulos residuais em relação a uma medição real. Isso significa que a norma  $L_1$  das diferenças entre o dado coletado e o modelo calculado é minimizada por esta metodologia.

Por se tratar de uma função não diferenciável no seu ponto de mínimo absoluto, a minimização da norma  $L_1$  torna-se um problema não linear, exigindo uma solução numérica como o uso de aproximações assintóticas. Baseando-se nas premissas expostas na Figura 7, será mostrada a dedução do método iterativo dos mínimos quadrados reponderados, conhecido na literatura (LI *et al.*, 2016; OLIVEIRA; LUPINACCI, 2013; GUITTON; VERSCHUUR, 2004) por sua sigla, na língua inglesa, IRLS – *Iterative Reweighted Least Square*. A partir da formulação do IRLS, será apresentada uma adaptação do método de Newton discreto para solucionar o problema da minimização da norma  $L_1$ .

### D.2.1 Método IRLS

O método IRLS caracteriza-se por sua simples implementação, apresentado sob notação matricial, e sua robustez no ajuste do modelo perante a presença de ruído não gaussiano, ou seja, pontos expúrios no dado. Abaixo, a dedução da expressão que descreve o método, proposta por Oliveira & Lupinacci (2013), se fundamenta no caso particular de um conjunto de dados com valores complexos.

Seja  $Mr$  o modelo – definido pela multiplicação entre o operador matricial  $M$  e o vetor de parâmetros  $r$  – e  $D$  o dado, ambos complexos. Ao considerar, como uma boa aproximação da norma  $L_1$  de  $x$ , a curva assintótica

$$|x| \approx \sqrt{x^2 + \varepsilon}, \quad (\text{D.4})$$

pode-se definir a função erro associada à diferença  $\Delta D = Mr - D$  como:

$$E(r) = \sum_i \sqrt{|\Delta D_i|^2 + \varepsilon} + \mu \sum_j \sqrt{r_j^2 + \varepsilon}. \quad (\text{D.5})$$

Sendo  $|\Delta D_i|^2 = \Re^2\{\Delta D_i\} + \Im^2\{\Delta D_i\} = \Delta D_i \overline{\Delta D_i}$ , onde  $\overline{\Delta D_i} = \Re\{\Delta D_i\} - \Im\{\Delta D_i\}$  remete ao complexo conjugado de  $\Delta D_i$ , obtêm-se a derivada de  $\Delta D_i$  em relação a  $r_n$  como

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\Delta D_i \overline{\Delta D_i})}{\partial r_n} &= \Delta D_i \frac{\partial \overline{\Delta D_i}}{\partial r_n} + \overline{\Delta D_i} \frac{\partial \Delta D_i}{\partial r_n} = \overline{M}_{i,n} \Delta D_i + M_{i,n} \overline{\Delta D_i} = \overline{M}_{i,n} \Delta D_i + \overline{\overline{M}_{i,n} \Delta D_i} = \\ &= 2\Re\{\overline{M}_{i,n} \Delta D_i\}. \end{aligned}$$

Este resultado permite-nos diferenciar analiticamente a função erro da equação (D.5) e obter

$$\frac{\partial E(r)}{\partial r_n} = \frac{1}{2} \sum_i \frac{\partial \Delta D_i \overline{\Delta D_i} / \partial r_n}{\sqrt{|\Delta D_i|^2 + \varepsilon}} + \mu \frac{r_n}{\sqrt{r_n^2 + \varepsilon}} =$$

$$\frac{\partial E(r)}{r_n} = \sum_i \frac{\Re\{\overline{M_{i,n}}(M_{i,n}r_j)\}}{\sqrt{|\Delta D_i|^2 + \varepsilon}} + \mu \frac{r_n}{\sqrt{r_n^2 + \varepsilon}} - \sum_i \frac{\Re\{\overline{M_{i,n}}D_i\}}{\sqrt{|\Delta D_i|^2 + \varepsilon}} \quad (D.6)$$

A equação (D.6) corresponde a seguinte equação matricial (D.7) (OLIVEIRA; LUPINACCI, 2013):

$$\frac{\partial E(r)}{r_n} = [\Re\{M^H A M\} + \mu B]r - \Re\{M^H A D\} \quad (D.7)$$

onde  $M^H$  é a matriz hermetiana (complexo conjugado transposto) de  $M$ ;  $A_{i,j} = 1/\sqrt{|\Delta D_i|^2 + \varepsilon}, \forall i = j; A_{i,j} = 0, \forall i \neq j$ ; e  $B_{i,j} = 1/\sqrt{r_n^2 + \varepsilon}, \forall i = j; B_{i,j} = 0, \forall i \neq j$ .

Para encontrarmos o mínimo da função erro (D.5), pelo método IRLS, igualamos o seu gradiente, equação (D.7), a zero, e obtemos o seguinte sistema linear (D.8)

$$[\Re\{M^H A M\} + \mu B]r = \Re\{M^H A D\} \quad (D.8)$$

o qual deve ser resolvido iterativamente até convergir em um vetor de parâmetros  $r$  o qual tornará a norma  $L_1$  do resíduo  $\Delta D$  mínima. Devido  $\Re\{M^H A M\}$  ser uma matriz definida positiva, o sistema (D.8) possui solução ótima, com custos computacionais equivalentes, mediante a aplicação do método do gradiente conjugado ou pela fatoração Cholesky; contudo, recomenda-se o uso da fatoração Cholesky para atingir maior acurácia nos resultados (LI *et al.*, 2016).

## D.2.2 Método de Newton Discreto

O método de Newton resolve o sistema não linear

$$F(x) = 0$$

mediante a resolução iterativa do sistema linear

$$J(x^{(k)})s^{(k)} = -F(x^{(k)})$$

sendo  $k$  o índice representativo da iteração, obtem-se

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + s^{(k)}.$$

$J(x^{(k)})$  é a matriz Jacobiana de  $F(x)$ , cujas colunas representam as derivadas parciais de  $F(x)$ , e as linhas, o gradiente  $\nabla F(x)$  de  $F(x)$ . Isto significa que o método de Newton consiste em basicamente duas etapas (RUGGIERO; LOPES, 2006):

1. avaliação da matriz Jacobiana  $J(x^{(k)})$ ;
2. resolução do sistema linear  $J(x^{(k)})s^{(k)} = -F(x^{(k)})$ .

Obtendo sucesso na resolução do problema proposto, o método de Newton trabalha bem e converge rápido (GILAT; SUBRAMANIAM, 2011).

Quando a solução analítica da derivada se torna uma tarefa árdua, ou até mesmo impossível, pode-se aplicar a seguinte solução numérica aproximada para avaliar a Jacobiana  $J(x^{(k)})$  (RUGGIERO; LOPES, 2006):

$$J_{ij}(x^{(k)}) = \frac{\partial f_i(x^{(k)})}{\partial x_j} = \frac{f_i(x^{(k)} + he_j) - f_i(x^{(k)})}{h}, \quad (\text{D.9})$$

onde  $e_j = (0, 0, \dots, 1, 0, \dots, 0)^T$ , com o elemento igual a 1 na posição  $j$ , e  $h$  é o passo da derivada, um parâmetro influente nos resultados da aplicação do método, geralmente é um número pequeno,  $h \approx 0$ , em relação aos valores de  $F(x)$ .

Aplicando o método de Newton discreto na minimização da norma  $L_1$  do resíduo  $d - Mr$  para obter  $r$ , partimos da premissa de localização do mínimo da aproximação assintótica da norma  $L_1$ , equação (D.4), a qual é igualar o gradiente do erro, equação (D.7), a zero, ou seja:

$$\nabla E(r) = \frac{\partial E(r)}{\partial r_n} = [\Re\{M^H A M\} + \mu B]r - \Re\{M^H A D\} = 0. \quad (\text{D.10})$$

Aplicando a equação (D.9) à equação (D.10), podemos avaliar discretamente a jacobiana de  $\nabla E(r)$

$$J_{ij}(r^{(k)}) = \frac{\nabla E_i(r^{(k)} + he_j) - \nabla E_i(r^{(k)})}{h}. \quad (\text{D.11})$$

e seguir com as etapas iterativas do método de Newton até obter  $r$  desejado.

# APÊNDICE E – Filtragem Linear Adaptativa

## E.1 Filtro de forma convolucional

O filtro de forma, *matching filter*, é definido como um operador convolucional, o qual transforma um modelo em uma versão mais próxima do que se encontra registrado em um dado real. Seu cálculo fundamenta-se na minimização de algum critério estabelecido, normalmente alguma norma do erro. Considerando  $d$  o dado real,  $m$  o modelo e  $f$  o filtro, podemos definir matematicamente o filtro de forma mediante a expressão da equação E.1:

$$d = f * m. \quad (\text{E.1})$$

A equação E.1 estabelece uma relação de igualdade, o que não corrobora com o que se observa em estudos práticos; isso nos leva a reformulá-la como uma aproximação (equação E.3):

$$d \approx f * m. \quad (\text{E.2})$$

A partir da equação E.3 podemos definir o erro, ou desvio, como

$$\varepsilon = d - f * m, \quad (\text{E.3})$$

o qual almeja-se que seja o menor possível. Abordaremos a seguir dois tipos de filtro, calculados sob critérios que garantem que os valores de erro sejam os menores possíveis, o filtro de Wiener-Hopf-Levinson e o filtro por IRLS.

### E.1.1 Filtro de Wiener-Hopf-Levinson

O filtro de Wiener-Hopf-Levinson baseia-se na aplicação do Método dos Mínimos Quadrados para obtenção do filtro (DUARTE, 2003; ROSA, 2018). Consiste em resolver um sistema de equações normais no intuito de minimizar a norma  $L2$  do erro  $\varepsilon$ , o qual no domínio do tempo será

$$f_o = \operatorname{argmin} \|d - f * m\|_2^2, \quad (\text{E.4})$$

onde  $f_o$  denota o filtro de Wiener-Hopf-Levinson.

Como a norma  $L2$  do erro  $\varepsilon$  consiste na raiz quadrada do somatório dos coeficientes de erro ao quadrado, sua diferenciação analítica se torna factível e resulta nas equações normais expressas na equação E.5

$$M^T M f = M^T d, \quad (\text{E.5})$$

onde  $M$  denota a matriz de convolução (equação B.2) do modelo, o que implica que o produto  $M^T M$  resulta na matriz bandada de autocorrelação  $\Phi_m$ , e  $M^T d$  no vetor de correlação cruzada  $\Phi_{md}$  (DUARTE, 2003), o que nos leva a expressar a equação E.5 como

$$\Phi_m f = \Phi_{md}. \quad (\text{E.6})$$

Devido à estrutura da matriz de autocorrelação  $\Phi_m$ , classificamo-na como uma matriz de Toeplitz, e o sistema da equação E.6 torna-se um sistema de Yule-Walker, o qual possui solução ótima mediante a recursão de Levinson (ROSA, 2018; DUARTE, 2003; GOLUB; VAN LOAN, 1996).

### E.1.2 Filtro IRLS

O filtro IRLS consiste no argumento que minimiza a norma  $L1$  do erro  $\varepsilon$ , utilizando o método dos mínimos quadrados reponderados (IRLS), explicado na subseção D.2.1, o qual no domínio do tempo será

$$r_o = \operatorname{argmin} \|d - r * m\|_1, \quad (\text{E.7})$$

onde  $d$  é o dado real,  $m$  o modelo e  $r_o$  denota o filtro IRLS, cuja solução iterativa dá-se por

$$r^{(k)} = [M^T A^{(k)} M + \mu B^{(k)}]^{-1} M^T A^{(k)} D \quad (\text{E.8})$$

onde  $r^{(k)}$  é o filtro calculado na iteração  $k$ ,

$$A_{i,j}^{(k)} = 1/\sqrt{|\Delta D_i^{(k)}|^2 + \varepsilon}, \forall i = j; A_{i,j}^{(k)} = 0, \forall i \neq j; \quad (\text{E.9})$$

com  $\Delta D_i^{(k)} = d_i - r_i^{(k-1)} * m$ , sendo  $r^{(k-1)}$  o filtro obtido na iteração precedente, e

$$B_{i,j}^{(k)} = 1/\sqrt{(r_j^{(k-1)})^2 + \varepsilon}, \forall i = j; B_{i,j}^{(k)} = 0, \forall i \neq j \quad (\text{E.10})$$

o filtro é calculado iterativamente, podendo ser resolvendo de forma ótima a matriz positiva definida da equação E.8 por Cholesky (LI *et al.*, 2016).

Quanto ao modelo inicial  $r^{(0)}$  de entrada na primeira iteração  $k = 1$ , seu cálculo se resume à obtenção do filtro de mínimos quadrados (OLIVEIRA; LUPINACCI, 2013), tendo solução ótima mediante o algoritmo de Wiener-Levinson.

## APÊNDICE F – Classificação das Múltiplas

Em um experimento sísmico, as reflexões primárias são eventos que contêm somente uma reflexão ascendente, enquanto as múltiplas, pelo menos uma descendente (VERSCHUUR, 2006). Devido seus efeitos sobre o registro, as reflexões múltiplas são consideradas ruídos quando se utilizam algoritmos de imageamento que consideram somente a primeira chegada. Tendo em vista a necessidade de atenuar o efeito das múltiplas sobre o dado, é preciso identificá-las sobre o registro sísmico. Verschuur (2006) destaca as seguintes características que permitem identificar as múltiplas presentes em um dado sísmico: repetição periódica de eventos de reflexão; o aumento do mergulho para múltiplas de altas ordens, conflitantes com as primárias; alteração do foco devido à concavidade das estruturas nas superfícies geradoras de múltiplas; aumento da amplitude para múltiplas de alta ordem; e interferências diversas entre múltiplas e primárias, assim como entre diferentes tipos de múltiplas.

Segundo Verschuur (2006), dentre os diversos caminhos para classificar as múltiplas, podemos realizá-los de acordo com a superfície na qual o campo de onda é refletido para o sentido descendente (Figura 54), e através do comprimento do seu período (Figura 55).

Sendo assim, as múltiplas podem ser classificadas como múltiplas de superfície (Figura 54(a)), quando há pelo menos uma reflexão descendente gerada na superfície livre (interface água-ar ou rocha-ar), ou múltiplas internas (Figura 54(b)), as quais possuem reflexões descendentes geradas somente por interfaces subjacentes à superfície livre.

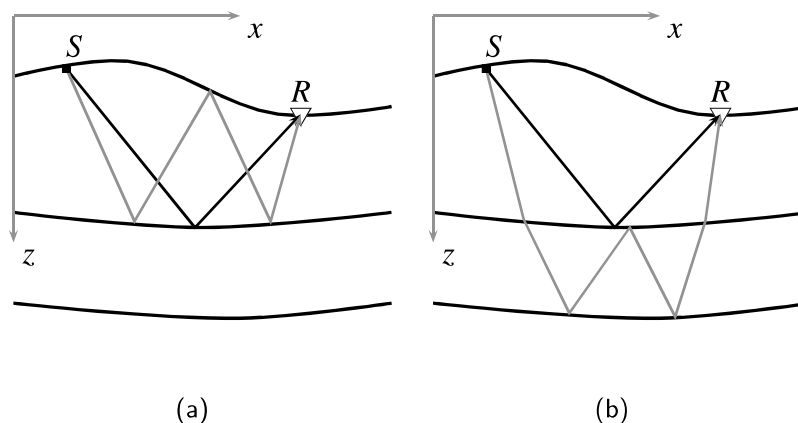


Figura 54 – Classificação das múltiplas de acordo com a superfície sobre a qual é gerada a reflexão descendente. Em (a) temos múltiplas de superfície, e em (b), múltiplas internas.

Independentes da superfície geradora das múltiplas, estas também podem ser classificadas de acordo com a espessura e velocidade da camada na qual a múltipla reverbera, uma vez que estas propriedades afetarão diretamente o período das múltiplas; sendo assim, temos múltiplas de longo (Figura 55(a)) ou de curto período (Figura 55(b)).

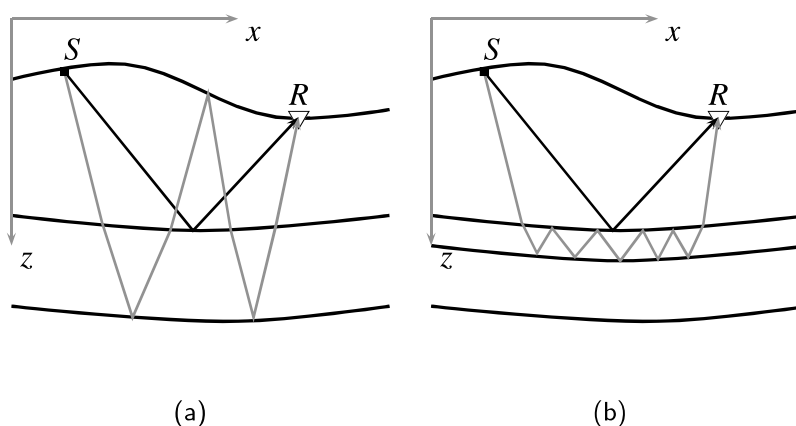


Figura 55 – Classificação das múltiplas de acordo com o período. Em (a) temos múltiplas de longo período, e em (b), múltiplas de curto período.

Além do acima exposto, Verschuur (2006) subclassifica as múltiplas de superfície em três tipos: múltiplas de primeira camada (Figura 56(a)); reverberações na primeira camada ou *peg-legs* (Figura 56(b)); e outras múltiplas de superfície (Figura 56(c)).

Podemos ainda sub-classificar dois tipos peculiares de múltiplas de superfície (Figura 57), sendo a primeira contendo a reflexão descendente sobre a superfície livre próxima à fonte sísmica, antecedendo a reflexão ascendente sobre o refletor. Neste caso, a múltipla é denominada fantasma da fonte (Sub-figura 57(a)). A segunda, a qual é registrada com incidência descendente sobre o receptor (Sub-figura 57(b)), denominada fantasma do receptor (ROSA, 2018).

Embora numa sísmica convencional, onde a fonte e o receptor estão localizados aproximadamente na mesma cota, a visualização dos tipos de múltipla de superfície apresentados acima tenha se tornado trivial (Figura 56), quando se altera a cota do receptor para o fundo oceânico ou para a base d'água, ou da primeira camada, a identificação dos eventos demanda um pouco mais de observação (Figura 58). Considerando o experimento sísmico de fundo oceânico, Soubaras (1996) e Hugonnet *et al.* (2011) definem a múltipla como a resultante da sobreposição entre dois tipos de múltiplas, o fantasma do receptor (Sub-figura 57(b)) e a *peg-leg* do receptor (Sub-figura 58(b)). Estes dois tipos de múltipla podem ser identificados quando os transpomos, quando adquiridos numa sísmica convencional, para o caso em que a cota do receptor coincide com a superfície refletora, subjacente à superfície livre, a qual define a base da primeira camada. É importante salientar que o sentido da incidência sobre o receptor facilita a identificação dos eventos,



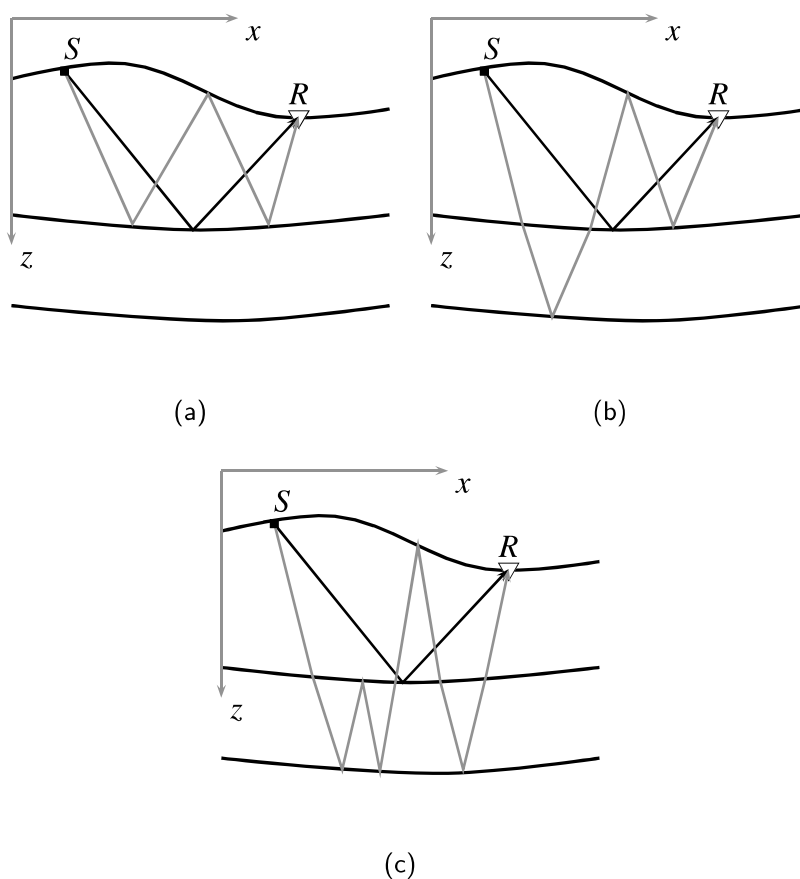


Figura 56 – Sub-classificação das múltiplas de superfície. Em (a) temos múltiplas de primeira camada, em (b), as reverberações na primeira camada ou *peg-legs*, e em (c), outras múltiplas de superfície.

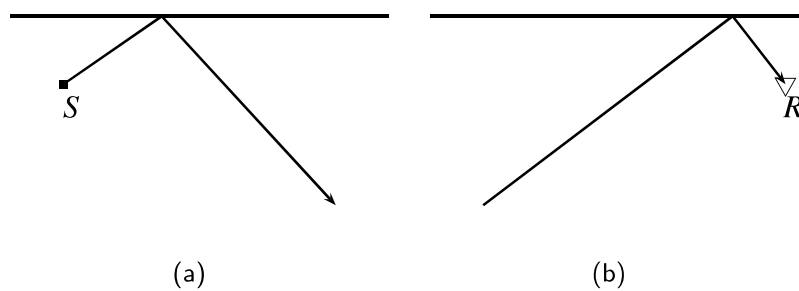


Figura 57 – Classificação das múltiplas: Fantasmas de fonte (a). Fantasma de receptor (b).

sendo o fantasma representado com incidência descendente, e a *peg-leg*, com incidência ascendente, ambos referentes ao receptor.

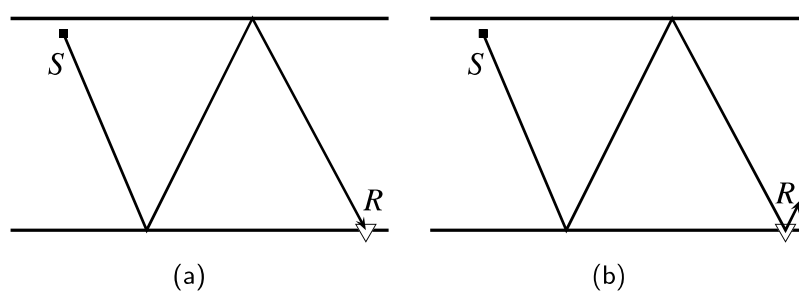


Figura 58 – Classificação das múltiplas: Fantasmas do receptor (a) e *peg-leg* do receptor (b).

## ANEXO A – Subrotina para Convolução

Neste anexo é apresentado a subrotina FORTRAN para executar a operação de convolução.

```
SUBROUTINE CONVO(A,NA,B,NB,X)
```

```
!Fonte: Duarte (2003)
```

```
DIMENSION A(1),B(1),X(1)
```

```
NX = NA + NB - 1
```

```
DO 10 I = 1,NX
```

```
X(I) = 0.0
```

```
10 CONTINUE
```

```
L = 0
```

```
DO 30 I = 1,NA
```

```
AI = A(I)
```

```
DO 20 J = 1,NB
```

```
K = L + J
```

```
X(K) = X(K) + AI * B(J)
```

```
20 CONTINUE
```

```
L = L + 1
```

```
30 CONTINUE
```

```
RETURN
```

```
END
```

## ANEXO B – Subrotina para Correlação

Neste anexo é apresentado a subrotina FORTRAN para executar a operação de correlação.

```
SUBROUTINE XCOR(A,NA,B,NB,X)
```

```
!Fonte: Duarte (2003)
```

```
DIMENSION A(1),B(1),X(1)
```

```
NX = NA + NB - 1
```

```
DO 10 I = 1,NX
```

```
X(I) = 0.0
```

```
10 CONTINUE
```

```
L = 0
```

```
DO 30 I = 1,NA
```

```
AI = A(I)
```

```
M = NB
```

```
DO 20 J = 1,NB
```

```
K = L + J
```

```
X(K) = X(K) + AI * B(M)
```

```
M = M - 1
```

```
20 CONTINUE
```

```
L = L + 1
```

```
30 CONTINUE
```

```
RETURN
```

```
END
```

## ANEXO C – Subrotina FORK

Neste anexo é apresentado a subrotina FORTRAN FORK para executar a transformada de Fourier.

```
SUBROUTINE FORK(LX,CX,SIGNI)
```

```
C FONTE: Claerbout (1976)
```

```
C FAST FOURIER 2/15/69
```

```
C LX
```

```
C CX(K) = SQRT(1/L)SUM(CX(J)*EXP(2*PI*SIGNI*I*(J-1)*(K-1)/LX))
```

```
C J = 1 FOR K = 1,2,...,(LX = 2**INTEGER)
```

```
COMPLEX CX(LX),CARG,CEXP,CW,CTEMP
```

```
J = 1
```

```
SC = SQRT(1./LX)
```

```
DO 30 I = 1,LX
```

```
IF(1.GT.J) GO TO 10
```

```
CTEMP = CX(J)*SC
```

```
CX(J) = CX(I)*SC
```

```
CX(I) = CTEMP
```

```
10 M = LX/2
```

```
20 IF(J.LE.M) GOT0 30
```

```
J = J - M
```

```
M = M/2
```

```
IF(M.GE.I) GO TO 20
```

```
30 J = J + M
```

```
L = 1
```

```
40 ISTEP = 2*L
```

```
DO 50 M = 1,L
```

```
CARG = (0.,1.)*(3.14159265*SIGNI*(M-1))/L
```

```
CW = CEXP(CARG)
```

---

```
DO 50 I = PI,LX,ISTEP
CTEMP = CW * CX(I + L)
CX(I + L) = CX(I) - CTEMP
50 CX(I) = CX(I) + CTEMP
L = ISTEP ,
IF(L.LT.LX) GO TO 40
RETURN
END
```

# ANEXO D – Importação de dados SU no FORTRAN

Neste anexo é apresentado um programa de importação de arquivos no formato do *Seismic Unix*, possibilitando seu processamento dentro da linguagem FORTRAN.

Fonte: [https://www.researchgate.net/publication/](https://www.researchgate.net/publication/289126443_Read_seismic_unix_SU_file_with_Fortran_TRACES)

289126443\_Read\_seismic\_unix\_SU\_file\_with\_Fortran\_TRACES

```

PROGRAM READSUFIL
!-----
! Read a input.su file (trace-by-trace) making data available to
! be processed
! Write the processed data in a out.su file
! -----
! - Input parameters:
!   input.su - input data
!   ns - number sample by trace
!   nh - size su header
!   ntrac - number total traces of the SU file
!
! - work vectors
!   sudata - sutrace vector
!   trace - auxiliary trace vector
! - Output data:
!   out.su
! -----
! Development: Federal University of the Bahia - Brazil
!               CPGG - Research Center of Geophysics and Geology
! Authors: Michelangelo G. da Silva and Milton J. Porsani
!   mykael_ba@yahoo.com.br / porsani@cpgg.ufba.br
! Date: 28, december - 2015
!-----
IMPLICIT NONE
INTEGER :: ns, nh, ntrac, j, ipos

```

```
REAL, ALLOCATABLE :: sudata(:), trace(:)

! Size of suheader = 60*4 bytes
nh = 60
ns=1001 ! input parameter provided by user
ntrac=49 ! input parameter provided by user

! Allocation memory
ALLOCATE(sudata(ns+nh))
ALLOCATE(traces(ns))

! Open I/O su file
OPEN(10,FILE='input.su', ACCESS='STREAM', form='UNFORMATTED' )
OPEN(20,FILE='out.su', ACCESS='STREAM', form='UNFORMATTED' )

! Loop trace-to-trace
DO j=1,ntrac
    ipos=(j-1)*((ns+nh)*4)+1
!       Read input sufile
    sudata=0.
    READ(10, pos=ipos) sudata(1:ns+nh)

!       Manipulate traces
    trace(1:ns) = sudata(nh+1:nh+ns)

!       uncomment next line for example of the manipulation
!       call mysub(ns,trace)

!       Transfer traces and write output sufile
    sudata(nh+1:nh+ns)=trace(1:ns)
    WRITE(20, pos=ipos) sudata(1:ns+nh)
ENDDO

CLOSE(10)
CLOSE(20)
DEALLOCATE(sudata, trace)
END PROGRAM
```