

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA



LEONARDO VIANA DE ALBUQUERQUE MELLO

**UM ESTUDO INTRODUTÓRIO SOBRE EFEITO *GHOST*: SUA
ORIGEM, SEUS IMPACTOS NAS FREQUÊNCIAS E NA RESOLUÇÃO
SÍSMICA.**

MONOGRAFIA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

**Niterói, RJ
2020**

LEONARDO VIANA DE ALBUQUERQUE MELLO

**UM ESTUDO INTRODUTÓRIO SOBRE EFEITO *GHOST*: SUA
ORIGEM, SEUS IMPACTOS NAS FREQUÊNCIAS E NA RESOLUÇÃO
SÍSMICA**

Monografia apresentada à Universidade Federal Fluminense como requisito parcial do Curso de Graduação em Geofísica para obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

Orientador

Prof. Marco Antonio Cetale Santos

**Niterói, RJ
2020**

LEONARDO VIANA DE ALBUQUERQUE MELLO

**UM ESTUDO INTRODUTÓRIO SOBRE EFEITO *GHOST*: SUA ORIGEM, SEUS
IMPACTOS NAS FREQUÊNCIAS E NA RESOLUÇÃO SÍSMICA.**

Monografia apresentada à Universidade Federal Fluminense como requisito parcial do Curso de Graduação em Geofísica para obtenção do título de Bacharel em Geofísica.

Aprovado em: ___ / ___ / ___ pela banca examinadora abaixo:

Prof. Marco Antonio Cetale Santos, DSc. (Orientador)
GISIS / GGO / UFF

Danielle Martins Tostes, DSc.
GISIS / GGO / UFF

Felipe Vieira Capuzzo, MSc.
GISIS / GGO / UFF

**Niterói, RJ
2020**

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, obrigatoriamente, agradeço à minha mãe, Valéria Viana, cujo espírito materno, com suas peculiaridades, permeou toda a trajetória até a realização deste trabalho, e que sacrificou um pedaço de sua vida para dar toda a base que me permitiu chegar até aqui e conquistar as minhas metas com minhas próprias pernas. Agradeço também pela ajuda acadêmica desempenhada como orientadora de formatação 24h.

Em segundo lugar, agradeço à minha avó, Ignez Viana, que além de todo o apoio incondicional como matriarca da família, além do incalculável apoio financeiro ao longo desta trajetória universitária, sempre me apoiou no que foi necessário, tendo apenas fé nas minhas capacidades e meus objetivos.

Agradeço também a meu pai, Evandro Mello, de cujas contribuições, a maior foi algo que talvez possa parecer sutil, mas é, sem dúvidas, imprescindível a qualquer alma científica: incentivou em mim, desde cedo, o espírito cientista que há em toda criança, alimentando a curiosidade, incentivando a busca por entender como as coisas funcionam, valorizando o conhecimento. Do quebra-cabeças que se monta hoje, há esta pecinha cuja fabricação passou, principalmente, pelas mãos dele lá atrás.

Agradeço a Marcelly Ricci, minha amada companheira, com a qual descobri uma infinidade de afetos, novas emoções, que me acompanhou até aqui e me apoiou durante esse tempo de formas que talvez não se tenha como explicar aqui.

Agradeço enormemente a Thiago Moreira pela grande ajuda com formatação, treino, revisão e teoria, além de me emprestar alguns livros usados aqui.

Agradeço a Fernando Vizeu pela enorme ajuda com python, sem a qual a realização deste trabalho não seria possível.

Agradeço a Felipe Capucci, agora Capuzzo, pela enorme ajuda com teoria e ideias ao longo da confecção deste trabalho, também sem a qual este não seria possível.

Agradeço ao meu orientador Marco Cetale por ter apoiado e estimulado a realização deste trabalho quando estive meio sem direção.

Agradeço a Ana Carolina Dominguez pela enorme ajuda que me deu com os dados da Spectrum no PIBIC, de onde saiu a ideia de realizar este trabalho.

Gostaria de agradecer ao professor Antônio Fernando Freire, meu orientador de PIBIC, que acreditou em mim, me deu todo o suporte necessário para ir em busca do programa de bolsas e que deu a tacada inicial que culminou com a realização deste trabalho.

Não poderia deixar de registrar minha profunda gratidão a Ana Paula Serrano, secretária de graduação da Geofísica, por ter me salvado diversas vezes e resolver

questões burocráticas que pareciam impossíveis. Sem ela, com toda a certeza, esse trabalho demoraria alguns semestres a mais.

Também gostaria de agradecer a Spectrum Geo, agora TGS Spectrum, por fornecer os dados usados neste trabalho a UFF e, claro agradecer também a própria UFF por toda a estrutura e suporte que fornece aos estudantes.

Não poderia deixar de agradecer também aos ex-presidentes que, diferente do atual, lutaram por investimentos no ensino superior público, sem o qual não há ciência no Brasil e, logo, não há progresso. Sem esses, sem dúvida, este trabalho e outros tantos não seriam possíveis.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a todos os meus amigos que fazem parte da minha vida e do meu ser e que, de uma forma ou de outra, tem uma enorme influência neste trabalho.

A todos esses citados deixo meus mais afetuosos e sinceros agradecimentos.

RESUMO

O imageamento sísmico é uma das mais importantes etapas do processo de pesquisas sobre o interior da Terra e de exploração de hidrocarbonetos, tanto em reservatórios marítimos quanto em terra. A sísmica marinha apresenta um efeito em particular chamado efeito *ghost*. Este trabalho foi dedicado a estudar este efeito após a observação do mesmo em dados sísmicos da região de Ultra Fronteira da Bacia de Campos e Bacia de Santos, fornecidos pela empresa Spectrum Geo à UFF. Por isto, foi feita uma revisão teórica sobre como este acontece e, para compreender como ele influencia o espectro de frequências de um dado, foi feita uma revisão sobre teoria de sinais abordando a Transformada de Fourier e convolução. Com esta revisão foi possível simular a ocorrência do efeito *ghost* nos dados de referência. Ao longo dos anos, diferentes métodos de aquisição com objetivo de atenuar este têm sido propostos. Por isto, este trabalho fará uma revisão sobre estes métodos analisando-os sob a ótica da bibliografia levantada. Um desses métodos de aquisição estudados foi simulado a fim de observar o funcionamento do mesmo no espectro de frequências de um levantamento. De forma a complementar o estudo, foi feita uma filtragem com o intuito de atenuar o efeito *ghost* presente nos dados da Spectrum Geo. Esta filtragem foi gerada com base em uma modelagem feita através da simulação do *ghost* em uma *wavelet* de Ricker sintética para ser, então, aplicada a um traço e à *wavelet* estimada do dado real. No domínio da frequência, esta filtragem teve sucesso em recuperar frequências perdidas pelo efeito *ghost*. No domínio do tempo, entretanto, essa filtragem gerou distorções na forma da onda a nível de tirar a simetria da mesma, portanto gerando resultados não satisfatórios neste dado já processado.

Palavras-chave: Efeito *ghost*, Sísmica, Bacia de Santos, Bacia de Campos.

ABSTRACT

Seismic imaging is one of the most important steps on the process of Earth's interior and hydrocarbon research, for both onshore and offshore reservoirs. Marine seismic has an effect in particular named ghost. This work is dedicated on studying this ghost effect after it was detected on seismic data from de Ultra-Border region of Campos Basin and Santos Basin, acquired by the company Spectrum Geo and given to UFF. For this reason, a theoretical review was made on how it happens and, to understand how it affects the frequency spectrum of a data, a review was made on signal theory approaching the Fourier Transform and convolution. With this review, it was possible to simulate the occurrence of the ghost effect on the reference data. Over the years, different acquisition methods aiming to mitigate this effect have been proposed. For this reason, this work will review these methods, analyzing them from the perspective of the studied concepts. One of these studied acquisition methods was simulated in order to observe its functioning in the frequency spectrum of a survey. As a complement to this work, a filter was generated for mitigating the ghost effect present in these Spectrum Geo data. This filtering was made based on a modeling obtained by simulating the ghost effect in a synthetic Ricker wavelet, then it was applied to a trace and to the estimated wavelet from the real data. In the frequency domain, this filtering was successful in recovering frequencies lost by the ghost effect. In the time domain, however, this filtering created distortions in the waveform at the level of removing its symmetry, thus providing unsatisfactory results on this already processed data.

Keywords: Ghost Effect, Seismic, Santos Basin, Campos Basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Área da parte do levantamento realizado pela Spectrum Geo (2016). Fonte: Autor.	13
Figura 2: Trecho de uma linha do levantamento da Spectrum Geo onde é possível observar o topo do sal e uma minibacia possivelmente associada ao mesmo. Fonte: Autor.	14
Figura 3: Desenho esquemático do efeito <i>ghost</i> , onde r_0 representa o sinal primário e r_1 , r_2 e r_3 representam as trajetórias da onda para cada tipo de <i>ghost</i> . Fonte: Offshore Magazine (2015) e adaptado pelo autor.	15
Figura 4: Exemplo da convolução de um sinal $x(t) = (1, \frac{-1}{2})$ com outro sinal $h(t) = (1, \frac{1}{2})$, gerando o <i>output</i> . Fonte: Yilmaz (2008).	18
Figura 5: Filtro <i>ghost</i> , ou $g(t)$, com <i>notch</i> em 94 Hz. Fonte: Tenghamn, Vaage e Borresen (2007), adaptado pelo autor.	19
Figura 6: Desenho esquemático do critério de Rayleigh. Fonte: Kallweit e Wood (1983).	23
Figura 7: Desenho esquemático do critério de Rayleigh. Fonte: Kallweit e Wood (1983) e adaptado pelo autor.	24
Figura 8: Exemplo do funcionamento do critério de Ricker no caso da sísmica. Fonte: Kallweit e Woods (1983) e adaptado pelo autor.	24
Figura 9: Desenho esquemático do método de aquisição proposto por Soubaras (2013). Fonte: Soubaras (2013) e adaptado pelo autor.	26
Figura 10: Desenho esquemático de um levantamento de sensores com profundidades diferentes. Fonte: van den Berg e Fokkema (2013).	27
Figura 11: Combinação dos espectros do hidrofone e do sensor de velocidade. Fonte: Tenghamn, Vaage e Borresen (2007), adaptado pelo autor.	28
Figura 12: Desenho esquemático do método proposto por Parkes e Hegna (2011). Fonte: Parkes e Hegna (2011) e adaptado pelo autor.	28
Figura 13: a) Onda seno de frequência de 25; b) mesma onda de 25 Hz defasada em 20 ms; c) polaridade invertida após a defasagem. Fonte: Autor.	32
Figura 14: a) Onda de 50 Hz; b) a mesma onda defasada em 20 ms. Fonte: Autor	33
Figura 15: <i>Wavelet</i> de Ricker com polaridade invertida. Fonte: Autor	34
Figura 16: Espectro de frequências da <i>wavelet</i> de Ricker. Fonte: Autor.	35
Figura 17: Espectro de Frequências da <i>wavelet</i> de Ricker com <i>ghost</i> simulado por $g_1(t)$ em a), $g_2(t)$ em b) e $g_3(t)$ em c). Fonte: Autor.	36
Figura 18: Gráfico da variação da profundidade x <i>offset</i> . Fonte: Autor.	37
Figura 19: Diferentes <i>notches</i> e picos para diferentes tempos de atraso do <i>ghost</i> . Fonte: Autor.	38

Figura 20: Sobreposição do espectro dos <i>ghosts</i> de cada receptor do levantamento simulado. Fonte: Autor.	38
Figura 21: <i>Wavelet</i> real estimada através do empilhamento do horizonte do fundo marinho após <i>flattening</i> . Fonte: Autor.	39
Figura 22: Espectro de frequências da <i>wavelet</i> estimada. Fonte: Autor.	40
Figura 23: Série de refletividades estimada. Fonte: Autor.	40
Figura 24: Espectro de frequências da série de refletividades estimada. Fonte: Autor.	41
Figura 25: <i>Wavelet</i> de Ricker com <i>ghost</i> simulado por $g_2(t)$ em tempo. Fonte: Autor.	42
Figura 26: Espectro de frequências da <i>wavelet</i> com <i>ghost</i> simulado usada para modelagem do filtro de forma. Fonte: Autor.	42
Figura 27: Gráfico do espectro de frequências do filtro de forma. Fonte: Autor.	43
Figura 28: Gráfico do espectro de frequências da <i>wavelet</i> real estimada filtrada. Fonte: Autor.	43
Figura 29: <i>Wavelet</i> real estimada filtrada em tempo. Fonte: Autor.	44
Figura 30: Traço escolhido para aplicação do filtro. Fonte: Autor.	45
Figura 31: traço filtrado. Fonte: Autor.	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 BASE DE DADOS	13
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1 REFLEXÃO <i>GHOST</i>	17
3.2 TRANSFORMADA DE FOURIER	17
3.3 CONVOLUÇÃO	18
3.3.1 PROPRIEDADE COMUTATIVA	18
3.3.2 PROPRIEDADE ASSOCIATIVA	18
3.3.3 PROPRIEDADE DISTRIBUTIVA	19
3.4 INFLUÊNCIA DO <i>GHOST</i> NO ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS	19
3.5 O TRAÇO SÍSMICO	20
3.6 FILTRO DE FORMA	20
3.7 <i>WAVELET</i> DE RICKER	21
3.8 SINAL SENOIDAL	22
3.9 RESOLUÇÃO SÍSMICA	22
3.9.1 CRITÉRIO DE RAYLEIGHT	22
3.9.2 CRITÉRIO DE RICKER	23
3.9.3 CRITÉRIO DE WIDESS	25
3.9.4 RESOLUÇÃO TEMPORAL	25
4 FORMAS DE ATENUAR O <i>GHOST</i> DURANTE A AQUISIÇÃO	26
5 METODOLOGIA	29
5.1 VISUALIZAÇÃO DO EFEITO NAS FREQUÊNCIAS	29
5.2 SIMULAÇÃO A OCORRÊNCIA DE <i>GHOST</i> NOS DADOS REAIS	29
5.3 SIMULAÇÃO DE UM MÉTODO DE AQUISIÇÃO	30
5.4 ANÁLISE DO <i>GHOST</i> NO CASO REAL	30
5.5 MODELAGEM E APLICAÇÃO DO FILTRO	31

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
6.1 VISUALIZAÇÃO DO EFEITO NAS FREQUÊNCIAS	32
6.2 SIMULAÇÃO A OCORRÊNCIA DE <i>GHOST</i> NOS DADOS REAIS	32
6.3 SIMULAÇÃO DE UM MÉTODO DE AQUISIÇÃO	37
6.4 ANÁLISE DO <i>GHOST</i> NO CASO REAL	39
6.5 MODELAGEM E APLICAÇÃO DO FILTRO	41
7 CONCLUSÕES	47
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1 INTRODUÇÃO

A configuração geológica das bacias de Campos e Santos proporcionou a formação do grande *play* petrolífero conhecido como pré-sal, descoberto em 2005, que já se tornou a principal fonte de petróleo no Brasil.

A importância econômica e estratégica desta grande descoberta para o país é inquestionável. Todo seu processo de descobrimento envolveu um grande desenvolvimento de tecnologias para superar o limite do conhecimento que se tinha à época. Agora, após esta grande descoberta, surge um novo campo de potencial ainda pouco conhecido: as Bacias de Ultra Fronteira.

Em 2016, a empresa Spectrum Geo realizou um levantamento nesta região de Ultra Fronteira com o intuito de identificar as estruturas em subsuperfície ainda pouco conhecidas. Estes dados foram fornecidos à Universidade Federal Fluminense para serem usados em trabalhos acadêmicos. Durante um dos trabalhos realizados com estes dados, foi identificada a presença de uma faixa de frequências dos dados muito atenuada, que poderia estar causando problemas na interpretação sísmica. Essa atenuação foi identificada como possivelmente associada ao efeito *ghost*. Este efeito é inerente à sísmica marinha e tem como uma das principais características a atenuação de uma ou mais faixas de frequências no espectro do dado.

Inicialmente, o que motivou a realização deste trabalho foi a correção deste efeito. Para tal, foi necessário rever os diversos conceitos teóricos acerca dele para que fosse possível modelar uma filtragem que pudesse recuperar frequências atenuadas. Após realizar esta filtragem, baseada em modelo de *ghost* sintético, observou-se um certo ganho na faixa de frequências atenuadas. No domínio do tempo, no entanto, percebeu-se que esta filtragem gerou distorções na forma da onda, fazendo com que esta perdesse sua simetria. Do ponto de vista da resolução sísmica, a simetria da onda é essencial para os principais critérios aqui estudados. Isso, então, invalida a aplicabilidade do filtro para este caso. Por isto este trabalho focou em fazer um estudo teórico sobre o efeito *ghost*, observando-o e analisando-o em um caso real sob a ótica da teoria aqui elucidada. A aplicação da filtragem, portanto, ficou como um complemento ao estudo.

Ao longo dos anos, novos métodos de aquisição sísmica têm sido propostos visando atenuar o efeito *ghost*. A teoria revisada neste trabalho server também para

explicar esses métodos. Por isto este trabalho também fará uma abordagem sobre os mesmos e, ao final, simulará um dos métodos estudados, também como um complemento ao estudo.

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso, portanto, é fazer um estudo introdutório sobre o efeito *ghost* sob a ótica da teoria de sinais, abordando métodos de solução deste efeito durante o processo de aquisição e analisando o impacto que causa no conteúdo de frequências e na resolução sísmica. De forma a complementar o estudo, foram utilizados os dados reais de motivação deste estudo para analisar a ocorrência e desdobramentos deste efeito e, ao fim, foi feita uma tentativa de corrigi-lo com a modelagem de um filtro de forma, que foi utilizada como objeto de estudo de caso.

Este trabalho foi organizado de forma que no capítulo 2 será apresentada a base de dados, onde os dados da Spectrum Geo são apresentados com destaque para as principais características geométricas a serem utilizadas ao longo deste trabalho. Em seguida, no capítulo 3 será apresentada a fundamentação teórica, onde o efeito *ghost* é elucidado, assim como os principais conceitos da teoria de sinais que o explicam. Nesta parte do texto também é feito um estudo sobre resolução sísmica. Com os conceitos teóricos em torno do efeito *ghost* já elucidados, serão apresentados, no capítulo 4, diversos métodos de aquisição sísmica que visam atenuar o efeito *ghost* durante o processo de aquisição. Com isto, no capítulo 5 será apresentada a metodologia seguida para a realização deste trabalho, onde as operações realizadas são descritas em detalhes. Após isto serão apresentados os resultados, a partir dos quais será feita uma discussão sobre os mesmos, no capítulo 6, para, enfim, apresentar as conclusões no capítulo 8.

2 BASE DE DADOS

Os dados reais de referência deste trabalho são de um levantamento feito pela empresa Spectrum Geo (agora TGS Spectrum) na região de Ultra-Fronteira da Bacia de Campos e da Bacia de Santos (Figura 1) no ano de 2016. São dados *post-stack* migrados em tempo (PSTM).

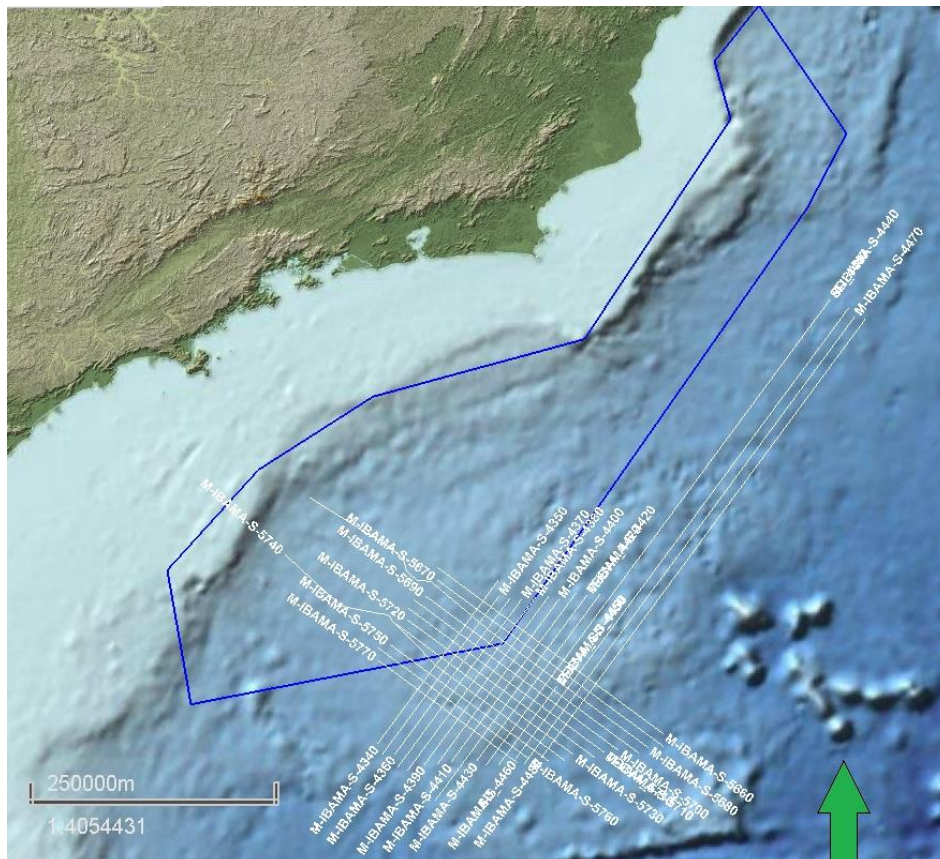


Figura 1: Área da parte do levantamento realizado pela Spectrum Geo (2016). Fonte: Autor.

Este levantamento visou imagear estruturas em subsuperfície de uma região ainda pouco conhecida da fronteira marinha brasileira. Com ele foi possível observar estruturas referentes a movimentações de sal, como mini-bacias, falhas e movimentos de massa de origem halocinética. Por questões de sigilo comercial, estes dados foram cortados em 500 ms abaixo do fundo do mar, sendo ainda possível identificar, em alguns pontos, o topo do sal (Figura 2).

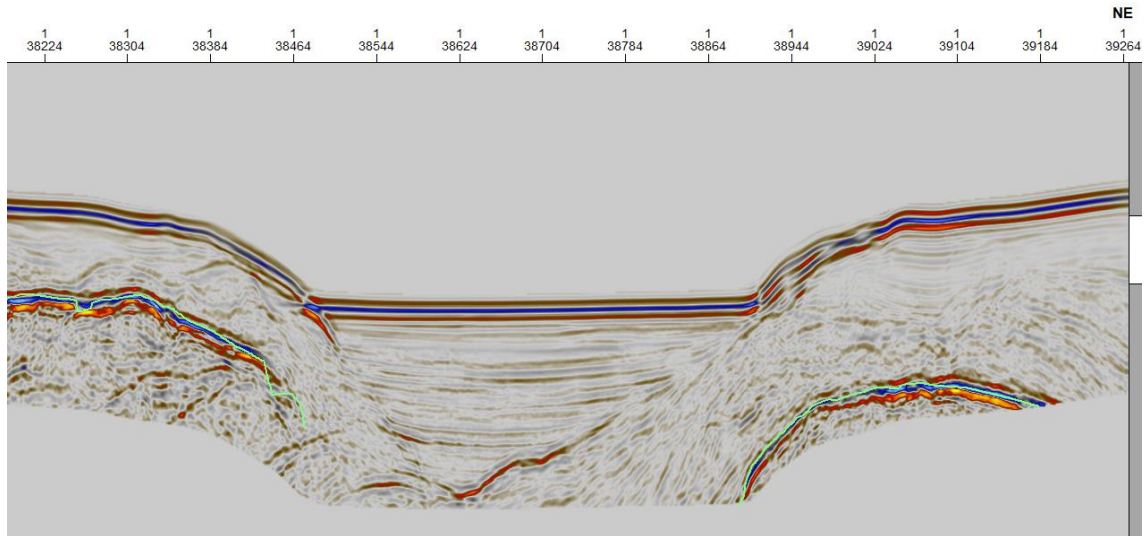


Figura 2: Trecho de uma linha do levantamento da Spectrum Geo onde é possível observar o topo do sal e uma mini-bacia possivelmente associada ao mesmo. Fonte: Autor.

Para este trabalho, as características geométricas do levantamento serão de extrema importância e estão apresentadas na tabela 1.

Intervalo de disparo	25 m
Número de canais	960
Comprimento do cabo	1200 m

Taxa de amostragem (processado)	4 ms
Profundidade da fonte	8 m
Profundidade do receptor	15 m

Tabela 1: Principais características geométricas do levantamento a utilizadas neste trabalho.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico serão abordados os principais conceitos teóricos usados como base para a realização dos processos descritos na metodologia deste trabalho.

Primeiro será descrito o que é e como funciona o efeito *ghost*. Em seguida, será feita uma breve revisão sobre a teoria de sinais para, então, compreender como este efeito opera no domínio da frequência. Esta revisão sobre teoria de sinais será necessária, também, para se compreender os conceitos em torno da estimativa do filtro a ser aplicado, assim como de outros processos descritos na metodologia. Será também feita uma revisão sobre resolução sísmica para compreender como o impacto do *ghost* no espectro de frequências pode interferir na resolução sísmica. Com isso, será realizada uma abordagem sobre alguns métodos de aquisição sísmica que visam atenuar o efeito causado pelo *ghost* no espectro de frequências. Por fim, será realizada uma revisão sobre os principais aspectos a serem considerados para a modelagem de um filtro a ser aplicado nos dados de referência.

3.1 REFLEXÃO *GHOST*

A reflexão *ghost* pode ser entendida como uma reflexão gerada pelo abrupto contraste de velocidade que ocorre na interface água-ar (JOVANOVIĆ, SUMNER e AKINS-EASTERLING, 1983). Quando a onda sísmica chega por baixo, a variação de pressão hidrostática é detectada pelos hidrofones. Essa onda continua a se propagar até a superfície da água, é refletida para baixo com polaridade invertida e é novamente detectada pelos hidrofones. A Figura 3 esquematiza esse evento.

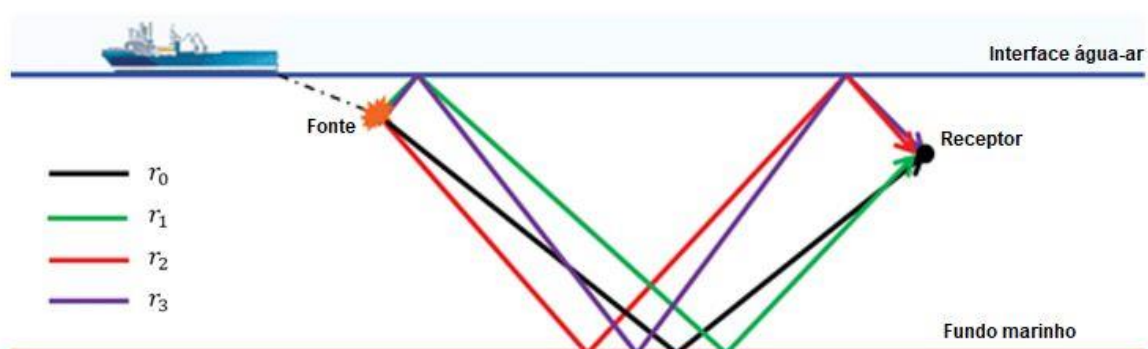


Figura 3: Desenho esquemático do efeito *ghost*, onde r_0 representa o sinal primário e r_1 , r_2 e r_3 representam as trajetórias da onda para cada tipo de *ghost*. Fonte: Offshore Magazine (2015) e adaptado pelo autor.

A relação entre o sinal primário e os diferentes *ghosts* é definida por Jovanovich, Sumner e Akins-Easterling (1983) como:

$$r_0^2 = x^2 + (2H - d - g)^2, \quad (1)$$

$$r_1^2 = x^2 + (2H + d - g)^2, \quad (2)$$

$$r_2^2 = x^2 + (2H - d + g)^2, \quad (3)$$

$$r_3^2 = x^2 + (2H + d + g)^2, \quad (4)$$

onde r_0 representa a distância percorrida pelo sinal primário, r_1 representa a distância percorrida pelo *ghost* 1, r_2 é referente ao *ghost* 2 e r_3 referente ao *ghost* 3; x representa a posição do receptor, que varia para cada *offset*, H representa a profundidade da interface refletora, e d e g representam as profundidades da fonte e do receptor, respectivamente.

Com base nas equações de (1), (2), (3) e (4) espera-se que o tempo de atraso de cada *ghost*, assim como o tempo de chegada do sinal primário, aumente de acordo com o *offset*. Para se descobrir o tempo de atraso Δt de cada *ghost*, é necessário encontrar a diferença entre a distância pela reflexão primária e o respectivo *ghost*:

$$r_1^2 - r_0^2 = x^2 - x^2 + (2H + d - g)^2 - (2H - d - g)^2 \quad (5)$$

$$r_1^2 - r_0^2 = (2H + d - g)^2 - (2H - d - g)^2 \quad (6)$$

Portanto, a diferença entre r_1 e r_0 depende somente de H , d e g . Como o ponto de reflexão no fundo do mar do *ghost* não é exatamente o mesmo do sinal primário, H não seria um valor constante em um fundo marinho real, mas neste trabalho, inicialmente, será considerada a situação ideal de um fundo marinho plano, portanto H será considerado constante. d e g são valores constantes nos dados de referência deste trabalho. Isto implica que a diferença entre r_1 e r_0 seja constante para qualquer *offset*. Logo, a diferença de tempo de chegada entre *ghost* e sinal primário deve ser também constante em qualquer *offset*. Para compreender o que é o espectro de frequências de um dado e como esse atraso da reflexão *ghost* influencia no espectro, é necessário rever alguns conceitos sobre teoria de sinais apresentados nos próximos tópicos. Esses conceitos também serão utilizados para explicar os processos descritos na metodologia deste trabalho.

3.2 TRANSFORMADA DE FOURIER

A Transformada de Fourier converte sinais no domínio do tempo em representações no domínio da frequência (ou espectrais) (HSU, 2012). Seja $x(t)$ um sinal não periódico de duração finita. A função $X(\omega)$, denominada transformada de Fourier de $x(t)$, é expressa por:

$$X(\omega) = F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega_0 t} dt, \quad (7)$$

onde a frequência fundamental ω_0 é dada por:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} = 2\pi f_0, \quad (8)$$

onde T_0 representa o período fundamental. De forma análoga, $x(t)$ pode ser entendido como a transformada de Fourier inversa de $X(\omega)$:

$$x(t) = F^{-1}\{X(\omega)\} = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega_0 t} d\omega \quad (9)$$

A equação (7) será usada neste trabalho para transformar séries no domínio do tempo para o domínio da frequência. Analogamente, a equação (9) será usada para transformar séries no domínio da frequência para o domínio do tempo. As filtragens no traço e na *wavelet*, por exemplo, serão realizadas em frequência e transformadas de volta para o domínio do tempo para fins de visualização.

3.3 CONVOLUÇÃO

As informações apresentadas neste subtópico sobre convolução e suas propriedades foram retiradas, em sua maioria, do livro de Hayes (1999). Em alguns momentos, porém, haverá informações de outros autores, que serão devidamente citados. Este conceito de convolução, bem como suas propriedades, serão utilizados constantemente nas etapas descritas na metodologia deste trabalho.

A relação entre um sinal de entrada $x(n)$ com um sinal de saída $y(n)$ é dada pela soma convolucional de $x(n)$ com um sistema $h(n)$:

$$y(n) = x(n) * h(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)h(n-k), \quad (10)$$

onde * denota a operação de convolução. A Figura 4 mostra um exemplo de como funciona esta operação.

Tabela de Convolução:

	1	$-\frac{1}{2}$		Saída
$\frac{1}{2}$	1			1
	$\frac{1}{2}$	1		0
		$\frac{1}{2}$	1	$-\frac{1}{4}$

Figura 4: exemplo da convolução de um sinal $x(t) = (1, \frac{-1}{2})$ com outro sinal $h(t) = (\frac{1}{2}, 1)$, gerando o *output*. Fonte: Yilmaz (2008).

Uma convolução pode ainda ser descrita como multiplicação das transformadas de Fourier de dois sinais (OPPENHEIM, 2008):

$$Y(e^{j\omega}) = X(e^{j\omega})H(e^{j\omega}), \quad (11)$$

onde $Y(e^{j\omega})$ representa a transformada de Fourier do sinal de saída $y(n)$, $X(e^{j\omega})$ a transformada de Fourier do sinal de entrada e $H(e^{j\omega})$ a do sistema. Esta relação é fundamental para este trabalho, pois todas as operações de convolução foram realizadas no domínio da frequência.

A convolução é um operador linear, portanto tem uma série de propriedades importantes que serão apresentadas a seguir.

3.3.1 PROPRIEDADE COMUTATIVA

Esta propriedade pressupõe que não importa a ordem em que duas sequências são convolidas. Ou em termos matemáticos:

$$x(n) * h(n) = h(n) * x(n) \quad (12)$$

3.3.2 PROPRIEDADE ASSOCIATIVA

Esta propriedade estabelece que dois sistemas em série podem ser descritos como um único sistema que é igual à convolução dos mesmos. Matematicamente falando:

$$\{x(n) * h_1(n)\} * h_2(x) = x(n) * \{h_1(n) * h_2(x)\} \quad (13)$$

3.3.3 PROPRIEDADE DISTRIBUTIVA

Esta propriedade preconiza que dois sistemas em paralelo podem ser escritos como um único sistema que é igual à soma de ambos:

$$x(n) * \{h_1(n) + h_2(n)\} = x(n) * h_1(n) + x(n) * h_2(n) = x(n) * h_{eq}(n), \quad (15)$$

onde

$$h_{eq}(n) = h_1(n) + h_2(n). \quad (16)$$

3.4 INFLUÊNCIA DO *GHOST* NO ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS

Rosa (2010) define a reflexão *ghost* como uma múltipla que atua, matematicamente, como o resultado da operação de filtragem com um operador $g(t)$:

$$g(t) = (1, 0, \dots, 0, a), \quad (17)$$

onde a representa a amplitude, que dependerá do coeficiente de reflexão e da dispersão esférica da onda.

O resultado dessa reflexão é a introdução de uma série de picos e *notches* no espectro de frequências do dado medido. O primeiro *notch* ocorre em zero Hertz e os demais *notches* ocorrem nos múltiplos inteiros de uma frequência específica (TENGHAMN *et al.*, 2007), como mostra a Figura 5.

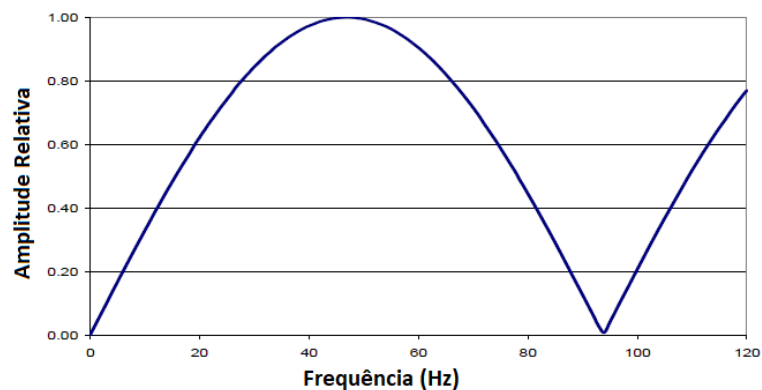


Figura 5: Filtro *ghost*, ou $g(t)$, com *notch* em 94 Hz. Fonte: Tenghamn, Vaage e Borresen (2007), adaptado pelo autor.

Rosa (2010) ainda observa que, em um hidrofone, que mede a variação de pressão, os *ghosts* da fonte e do receptor aparecem com a polaridade oposta à do sinal primário. Já para o caso de um geofone, que mede a velocidade das partículas, o *ghost* é visto com a mesma polaridade da fonte.

3.5 O TRAÇO SÍSMICO

Um traço sísmico s_t consiste de um pulso sísmico p_t convolvido com uma série de refletividades r_t acrescido de um ruído n_t (PORSANI e URSIN, 1998). Pode ser definido matematicamente por (Rosa, 2010):

$$s_t = p_t * r_t + n_t \quad (18)$$

No domínio da frequência, pode ser escrito como (Rosa, 2010):

$$S(\omega) = P(\omega)R(\omega) + N(\omega), \quad (19)$$

de onde podemos tirar que:

$$\frac{N(\omega) + S(\omega)}{P(\omega)} = R(\omega), \quad (20)$$

onde $S(\omega)$, $P(\omega)$, $R(\omega)$ e $N(\omega)$ são as transformadas de s_t , p_t , r_t e n_t , respectivamente.

A equação (20) será utilizada neste trabalho a fim de se estimar uma série de refletividades $R(\omega)$ a partir de um traço do dado real e a *wavelet* estimada.

3.6 FILTRO DE FORMA

Rosa (2010) explica que na aplicação de um filtro de forma d_t , busca-se obter uma determinada forma de onda w_t a partir de um sinal s_t já conhecido. Para isto, é necessário calcular o filtro d_t tal que:

$$s_t * d_t = w_t \quad (21)$$

ou no domínio da frequência:

$$S(\omega)D(\omega) = W(\omega). \quad (22)$$

Com base nesta premissa, para este trabalho foi gerado um filtro de forma conforme a equação (22) onde $S(\omega)$ é referente a uma onda sintética com *ghost* simulado, $W(\omega)$ uma onda sintética sem efeito *ghost*, e $D(\omega)$ é o filtro a ser determinado que, ao ser aplicado em $S(\omega)$ removerá o efeito *ghost* e devolverá o sinal $W(\omega)$. Desta forma:

$$D(\omega) = \frac{W(\omega)}{S(\omega)}. \quad (23)$$

3.7 A WAVELET DE RICKER

A *wavelet* de Ricker é representativa de uma onda sísmica propagando por um meio viscoelástico homogêneo. Matematicamente é a segunda derivada da função Gaussiana e é, portanto, simétrica no domínio do tempo (Wang, 2015):

$$w(t) = (1 - \omega_p^2 t^2) e^{-\frac{1}{4} \omega_p^2 t^2}, \quad (24)$$

onde ω_p é a frequência com mais energia (ou maior amplitude) e t é o tempo em segundos.

Na realidade, entretanto, o sinal sísmico frequentemente não é simétrico e se aproxima da primeira derivada da função Gaussiana ou de várias outras derivadas que fornecem um espectro de amplitudes semelhante. O espectro de frequências de uma *wavelet* de Ricker e de outras derivadas da Gaussiana é assimétrico (Wang, 2015).

Para análise geofísica, valores como frequência central ou largura de banda podem ser usados para descrever a resolução sísmica e mudanças nessas quantidades podem ser usadas para medir coeficiente de atenuação da subsuperfície (Wang, 2015).

3.8 SINAL SENOIDAL

Um sinal senoidal será utilizado neste trabalho para gerar ondas de diferentes frequências e observar como estas se sobrepõem quando defasadas de um certo Δt . O sinal senoidal pode ser expresso como:

$$x(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi), \quad (25)$$

onde A é a amplitude, que no caso deste trabalho será igual a 1, ω_0 é, novamente, a frequência em radianos e φ é o ângulo de fase (Hwei, 2012).

3.8 RESOLUÇÃO SÍSMICA

O conceito de resolução sísmica é fundamental para compreender o impacto causado pelo efeito *ghost* na interpretação sísmica. Por isso este tópico abordará conceitos importantes retirados do trabalho de Kallweit e Wood (1983) onde os autores citam três importantes critérios para se compreender a capacidade da resolução temporal (T_r) da sísmica. Esses critérios são: Critério de Rayleigh, Critério de Ricker e Critério de Widess.

3.8.1 CRITÉRIO DE RAYLEIGH

Em uma analogia com a óptica, uma fonte pontual equivale a um pico de reflexão (*spike*), o instrumento óptico é análogo a Terra e os padrões de difração equivalem a uma *wavelet* banda-limitada. O poder de resolução do instrumento óptico é sua capacidade de produzir imagens distintas de objetos próximos um ao outro. Os padrões de difração impõem um limite superior para a resolução de forma análoga a uma *wavelet* sísmica. Na situação ideal de aplicação das leis geométricas da óptica, o instrumento óptico poderia focar luz paralela em uma imagem pontual. Essa situação seria análoga a ter um *spike* para uma *wavelet* sísmica. O princípio de Huygens, no entanto, produz um padrão de difração onde a intensidade do máximo central possui largura finita inversamente proporcional à separação entre os objetos. Assim, a imagem de dois objetos irá colapsar a uma única imagem não resolvida

quando a separação entre eles for menor que a largura do máximo central, como mostra a Figura 6.

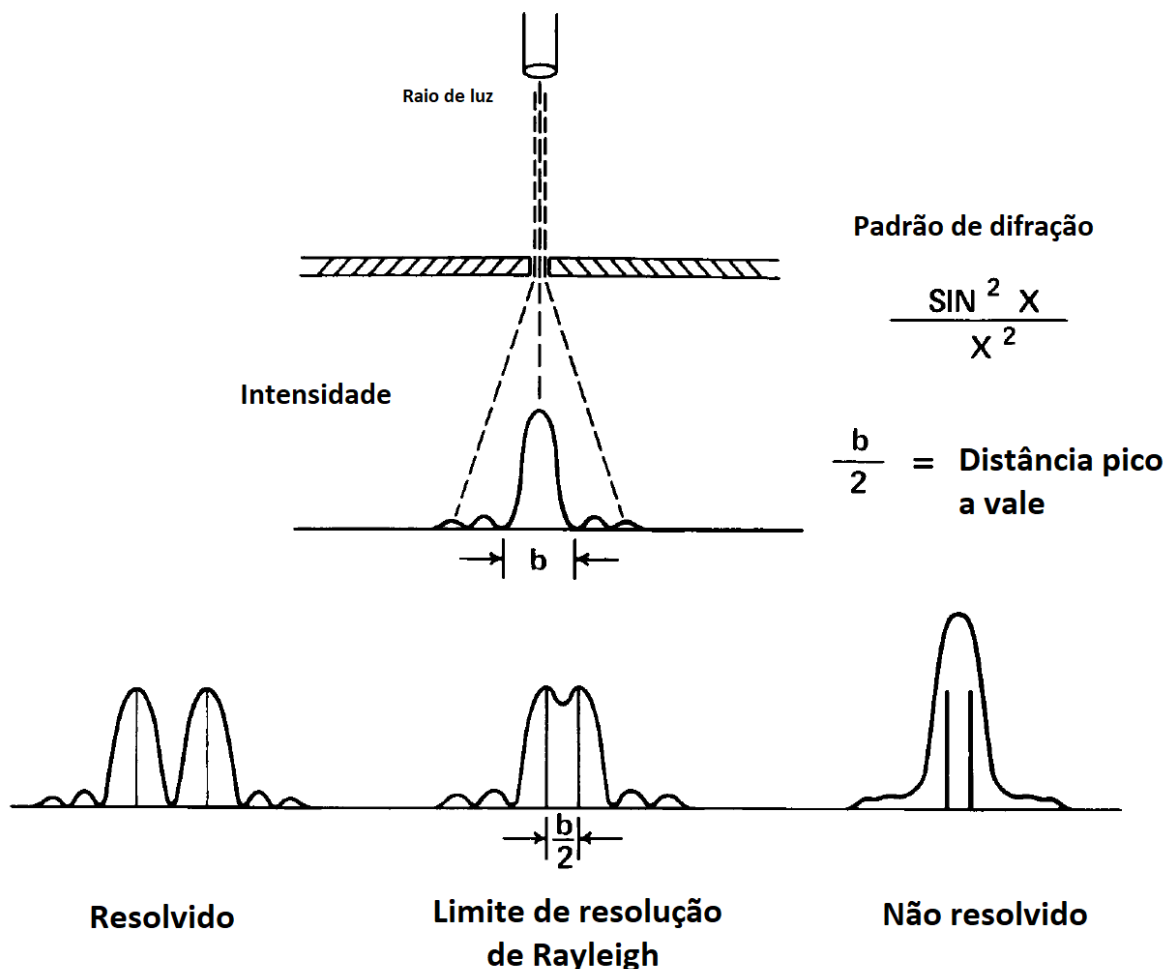


Figura 6: Desenho esquemático do critério de Rayleigh. Fonte: Kallweit e Wood (1983).

Rayleigh, então, estabelece o limite de resolução como a separação de pico a vale ($b/2$) do padrão de difração. Em outras palavras, duas fontes pontuais podem ser resolvidas quando sua separação exceder a distância pico a vale do padrão de difração. Analogamente, objetos são ditos não resolvidos quando a separação entre eles for menor que a distância pico a vale ($b/2$).

3.8.2 CRITÉRIO DE RICKER

Ricker definiu o limite de resolubilidade como a separação onde a onda composta apresenta curvatura zero no máximo central (*flat spot*) (Figura 7). Essa

separação seria igual à distância entre os pontos de inflexão do máximo central da *wavelet* a ser convolvida.

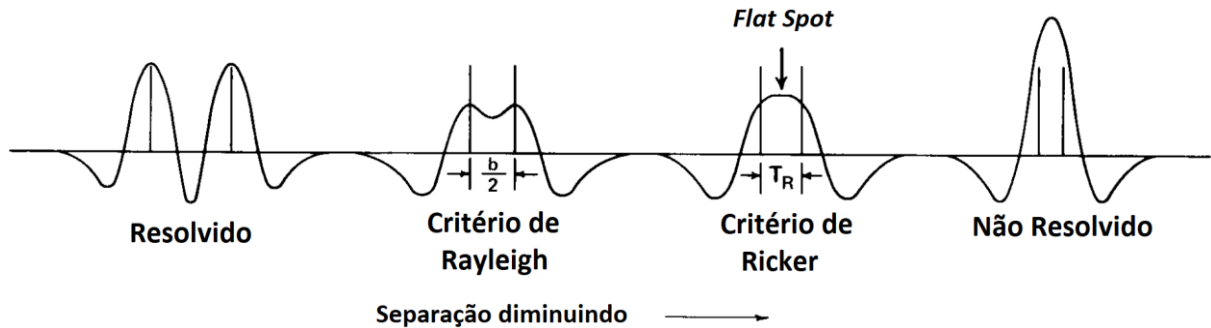


Figura 7: Desenho esquemático do critério de Rayleigh. Fonte: Kallweit e Wood (1983) e adaptado pelo autor.

A Figura 8 exemplifica como funciona a observação de Ricker para o caso da sísmica, onde os picos são referentes à refletividade gerada nas interfaces entre uma camada que vai se afinando e suas vizinhas.

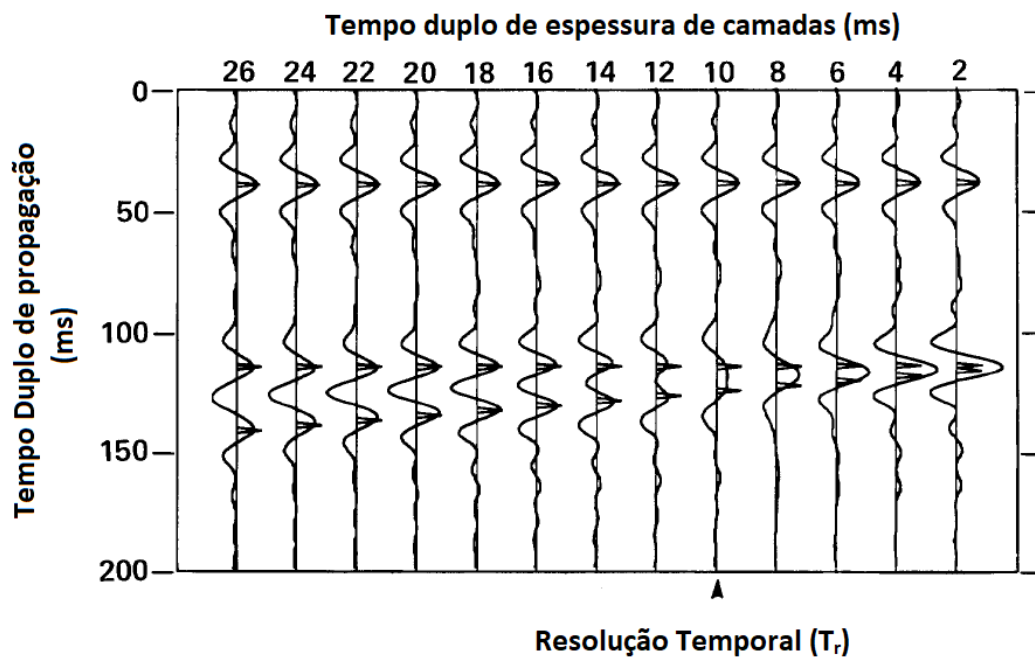


Figura 8: Exemplo do funcionamento do critério de Ricker no caso da sísmica. Fonte: Kallweit e Woods (1983) e adaptado pelo autor.

3.8.3 CRITÉRIO DE WIDESS

Enquanto o critério de Ricker se aplicava para amplitudes iguais de mesma polaridade, Widess estudou o caso de amplitudes iguais com polaridades invertidas. Conforme a separação diminui, há um ponto onde a onda composta se estabiliza como uma réplica da derivada da onda. Widess define que o limite de separação para estabilização da *wavelet* é igual a 1/8 do comprimento de onda da frequência dominante. Assim, camadas mais finas que 1/8 desse comprimento de onda podem ser resolvidas, a princípio, por mudanças de amplitude na reflexão composta.

3.8.4 RESOLUÇÃO TEMPORAL

A resolução temporal pode ser expressa em termos de frequência de pico f_p (ou frequência dominante). A frequência de pico é definida como a frequência de maior amplitude do espectro. Para uma *wavelet* de Ricker, a resolução temporal T_r é definida como:

$$T_r = \frac{1}{3f_p}, \quad (26)$$

e a espessura de afinamento é dada por:

$$\frac{b}{2} = \frac{1}{2.6f_p}. \quad (27)$$

4 FORMAS DE EVITAR O *GHOST* DURANTE A AQUISIÇÃO

Tendo compreendido como o efeito *ghost* acontece e como este opera no domínio da frequência, fica mais fácil entender, do ponto de vista teórico, como é possível evitar os principais impactos deste efeito. Este tópico abordará métodos de aquisição que visam superar a perda de frequências causada pelo *ghost* na soma dos traços de um levantamento, dos quais, um será utilizado como referência para a simulação a ser feita neste trabalho.

Soubaras (2013) desenvolveu um método de aquisição sísmica marinha em que a profundidade dos hidrofones varia de acordo com o *offset*, em um cabo de perfil curvo. Esta curva é definida pelos parâmetros z_0 , s_0 e h_0 que representam a profundidade do receptor, inclinação da parte inicial do cabo e a distância horizontal. A Figura 9 é um desenho esquemático deste método. Nota-se que a inclinação do perfil muda conforme varia o afastamento entre fonte e receptor.

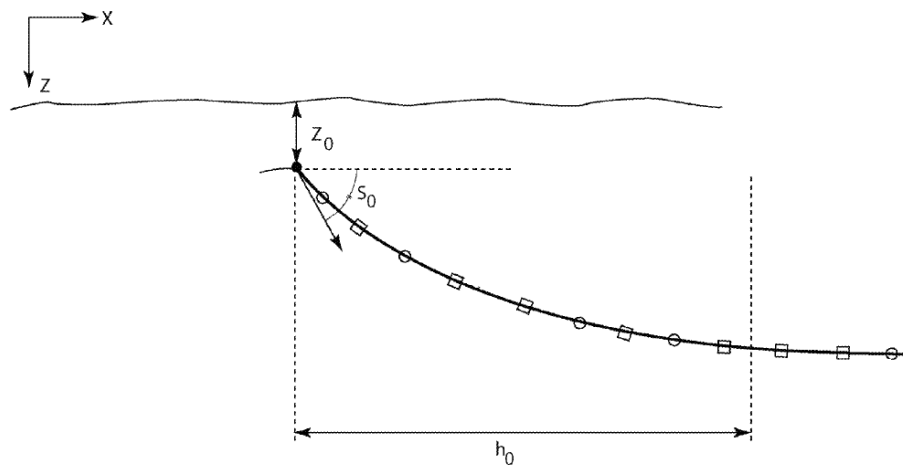


Figura 9: Desenho esquemático do método de aquisição proposto por Soubaras (2013). Fonte: Soubaras (2013) e adaptado pelo autor.

Observando as equações (1), (2), (3) e (4), percebe-se que este método se baseia em alterar o valor de g , fazendo com que haja uma variação do tempo de atraso do *ghost* para cada afastamento. Assim, seriam gerados diferentes operadores $g(t)$.

van den Berg e Fokkema (2013) criaram um método de aquisição baseado na decomposição do dado adquirido usando sensores a profundidades diferentes,

medindo o mesmo parâmetro em campo de onda ascendente e descendente, sendo o ascendente referente ao sinal sem *ghost*, conforme demonstrado na Figura 10. A partir daí, pode ser determinado um campo de onda livre de múltiplas a partir desta decomposição, independente de conhecimento prévio da forma da *wavelet* da fonte.

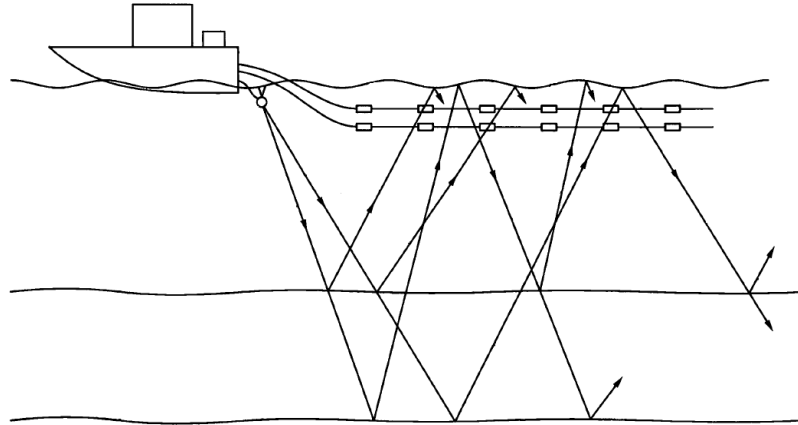


Figura 10: Desenho esquemático de um levantamento de cabos com profundidades diferentes. Fonte: van den Berg e Fokkema (2013).

Tenghamn, Vaage e Borresen (2007) sugerem a utilização de um sensor de velocidade de partículas posicionado junto ao hidrofone, pois estes gerariam sinais de polaridade oposta em resposta ao sinal *ghost*, e, por consequência, ambos se cancelariam. A Figura 11 mostra como fica o espectro de frequências de um dado adquirido por este método, onde a linha vermelha representa o espectro de frequências medido pelo sensor de velocidade, a linha azul pelo hidrofone e a linha verde é a soma de ambos os espectros.

Parkes e Hegna (2011) propõem uma configuração de aquisição baseada em subfontes posicionadas em profundidades específicas e disparadas em intervalos de tempo específicos, de forma que os *ghosts* se tornem complementares. A Figura 12 mostra esse esquema de um disparo com duas fontes a profundidades diferentes, com seus respectivos operadores *ghost* $g(t)$ e os espectros de frequência dos mesmos isolados e sobrepostos. Vale observar que o intervalo entre disparos costuma ser muito menor que 1 s, portanto os receptores estariam essencialmente na mesma posição e a geologia iluminada seria exatamente a mesma.

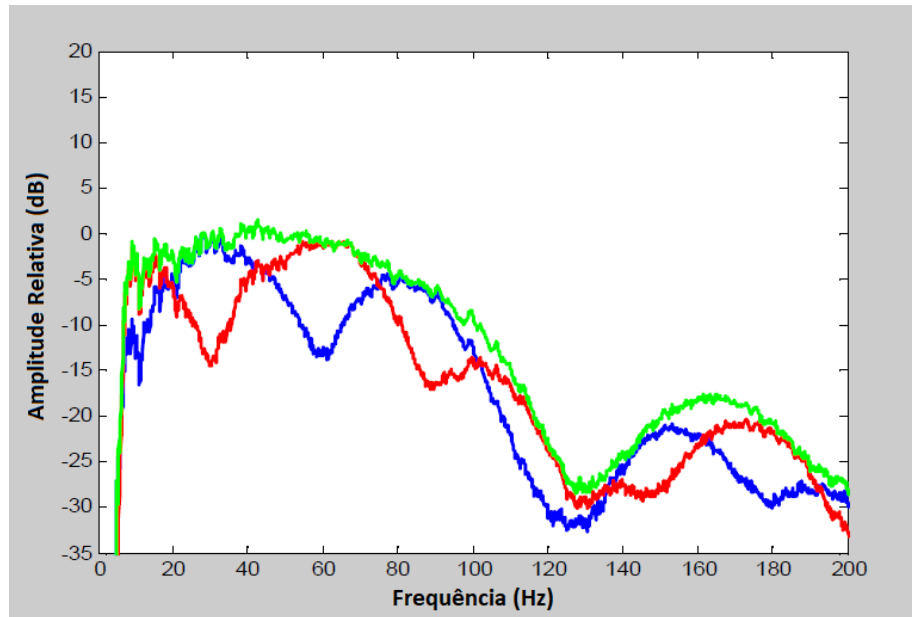


Figura 11: combinação dos espectros do hidrofone e do sensor de velocidade.
 Fonte: Tenghamn, Vaage e Borresen (2007), adaptado pelo autor.

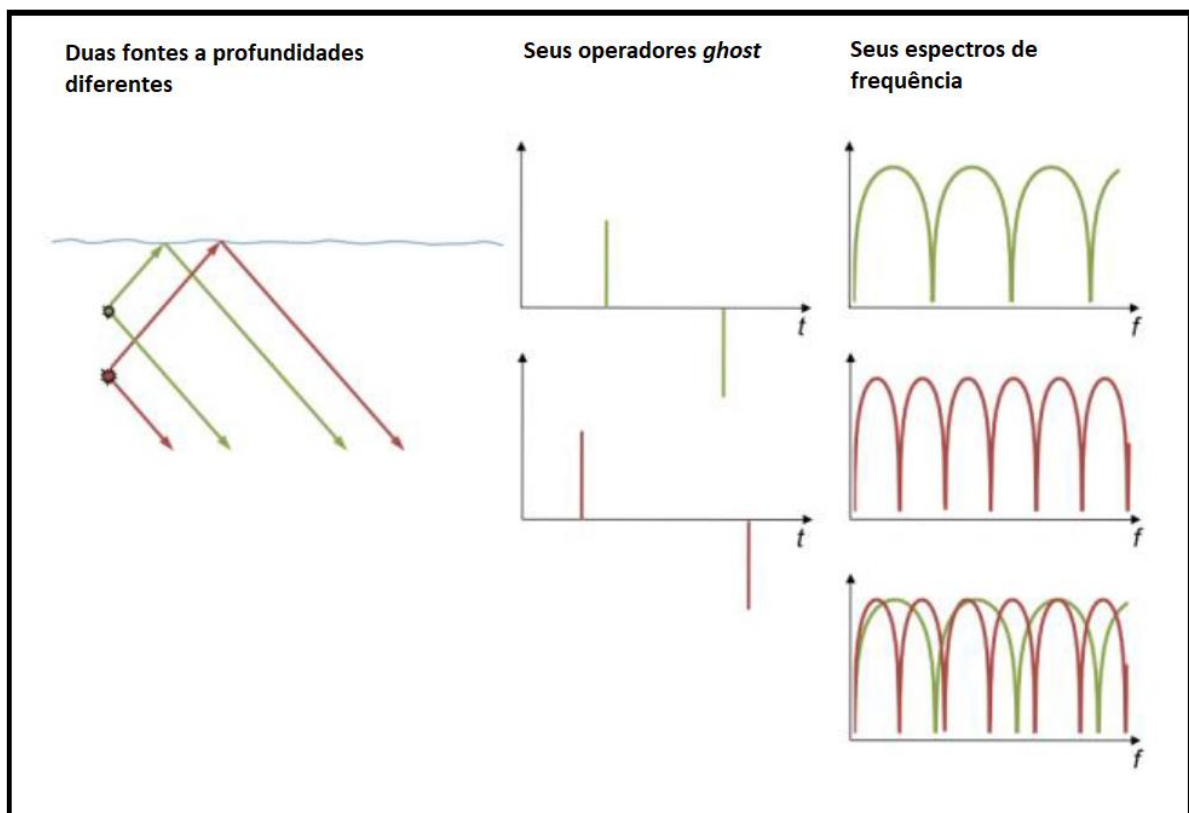


Figura 12: Desenho esquemático do método proposto por Parkes e Hegna (2011).
 Fonte: Parkes e Hegna (2011) e adaptado pelo autor.

5 METODOLOGIA

Para a realização das etapas aqui descritas, foram utilizados algoritmos gerados em linguagem Python, com as bibliotecas *numpy* e *scipy* para cálculos, *matplotlib* para geração dos gráficos e *seggyio* para a leitura de arquivo formato SEGY.

5.1 VISUALIZAÇÃO DO EFEITO NAS FREQUÊNCIAS

A fim de se analisar como o *ghost* atua em frequências específicas, gerando picos e *notches* pela sobreposição destas, primeiro, para efeitos de visualização, foi necessário transformar a equação (25) em uma função seno, adicionando-se uma fase $\varphi = \frac{\pi}{2}$, de forma que:

$$x(0) = A\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0 = A\sin(0). \quad (28)$$

Assim:

$$x(t) = A\cos(\omega_0 t + \varphi) = A\sin(\omega_0 t). \quad (29)$$

Foram geradas, então, ondas seno de 25 Hz e 50 Hz, com base nesta equação (29). Essas ondas foram defasadas em 20 ms para então terem suas polaridades invertidas, como acontece com a onda nos *ghosts* da fonte e dos receptores, demonstrando como se comporta cada frequência para um determinado tempo de atraso.

5.2 SIMULAÇÃO A OCORRÊNCIA DE *GHOST* NOS DADOS REAIS

Para simular a ocorrência do efeito *ghost* nos dados reais da Spectrum Geo, foi gerada uma *wavelet* de Ricker sintética com frequência de pico em 35 Hz, amostrada em 4 ms. Com base nas equações (1), (2), (3) e (4), foram calculados r_0 , r_1 , r_2 , r_3 dos dados de referência. Com esses valores, utilizando uma velocidade do

som na água do mar de 1500 m/s, foram calculados os atrasos Δt_1 , Δt_2 e Δt_3 de cada *ghost*. A partir destes foi possível gerar um operador $g_n(t)$, $n = 1, 2, 3$, da forma 17. Para o valor de a do vetor (17) foi considerada uma dispersão esférica somada à reflexão não completa da onda na superfície, totalizando uma perda de 5%. Cada vetor $g_n(t)$ foi convolvido, em frequência, com a mesma *wavelet* Ricker sintética a fim de simular o impacto causado pelo efeito *ghost* nas frequências dos dados de referência.

5.3 SIMULAÇÃO DE UM MÉTODO DE AQUISIÇÃO

Para simular um dos métodos de aquisição para atenuação de *ghost* foi escolhido o método de cabo de perfil curvo sugerido por Soubaras (2010), por ter sido o primeiro método estudado para este trabalho, a fim de que cada *ghost* tenha valores de tempo de atraso diferentes. Então foram gerados diversos operadores $g(t)$ que foram convolvidos com a *wavelet* de Ricker e em seguida empilhados para observar a sobreposição dessas reflexões no espectro de frequências.

5.4 ANÁLISE DO GHOST NO CASO REAL

Para observar a ocorrência do efeito *ghost* nos dados reais de referência deste trabalho, foi necessário estimar a *wavelet* desses dados. Esta estimativa foi feita através de um algoritmo que carregou uma das linhas do levantamento e, ao lê-las, identificou o pico referente ao fundo do mar ao comparar o valor de cada amostra ao de suas vizinhas. Ao identificar este pico a cada traço, colocou-os no mesmo tempo (*flatening*) para então empilhá-los. Com isso foi calculada a transformada de Fourier desta *wavelet* estimada para observar o efeito do *ghost* no espectro de frequências. Utilizando da equação (20), foi escolhido um traço da mesma linha do levantamento para se estimar sua série de refletividades, que foi também representada em frequência.

5.5 MODELAGEM E APLICAÇÃO DO FILTRO

As *wavelets* sintéticas geradas anteriormente, com *ghost* e sem *ghost*, foram utilizadas para modelar um filtro de forma que cause o efeito inverso ao *ghost*, amplificando as frequências atenuadas e atenuando frequências que foram amplificadas, com base na equação (23). No contexto das equações (22) e (23), a *wavelet* sem *ghost* representa $W(\omega)$, a onda com o *ghost* simulado representa $S(\omega)$ e o filtro de forma a ser determinado representa $D(\omega)$. Em razão dos resultados, foi utilizado apenas o *ghost* simulado por $g_2(t)$, que passou posteriormente por pequenos ajustes, foi utilizado para estimar o filtro de forma.

Após a estimativa deste filtro, o mesmo foi aplicado na *wavelet* real dos dados de referência, com o mesmo intuito de amplificar frequências atenuadas pelo efeito *ghost* e atenuar as frequências amplificadas. Ao observar o funcionamento na *wavelet* original, o filtro foi aplicado em um traço dos dados de referência para gerar um novo traço

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo mostrará os resultados obtidos após a realização das etapas descritas na Metodologia, a partir dos quais serão feitas também as discussões

6.1 VISUALIZAÇÃO DO EFEITO NAS FREQUÊNCIAS

Observando as figuras 13a) e 13c), fica nítido que há um alinhamento entre os picos da onda de período igual a 40 ms (frequência de 25 Hz) e a mesma quando é defasada em 20 ms (metade de seu período), e tem sua polaridade invertida, simulando um *ghost* da fonte ou dos receptores. Assim, haverá a soma construtiva (amplificação) desta frequência para estes dois tipos de *ghost*.

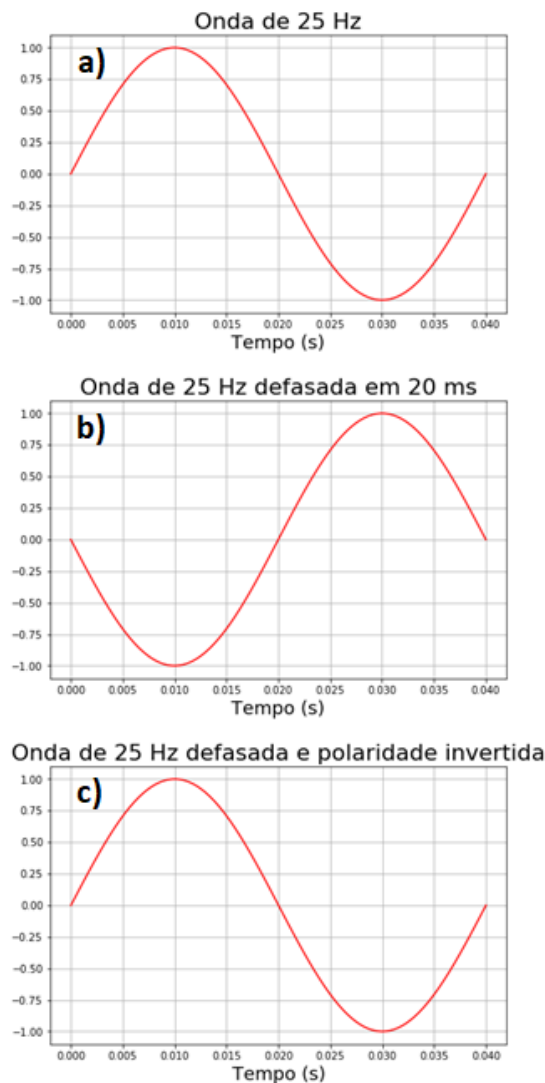


Figura 13: a) Onda seno de frequência de 25; b) mesma onda de 25 Hz defasada em 20 ms; c) polaridade invertida após a defasagem. Fonte: Autor.

A Figura 14 segue a mesma lógica da Figura 13, porém aplicando a defasagem de 20 ms à uma onda de período igual a 20 ms (frequência de 50 Hz). Nesta figura é possível notar o alinhamento entre o pico da onda de 50 Hz em a) com o vale da onda em c), que simula um *ghost* de polaridade invertida. Com isto é possível visualizar que ocorrerá uma atenuação desta frequência por interferência destrutiva nesta situação.

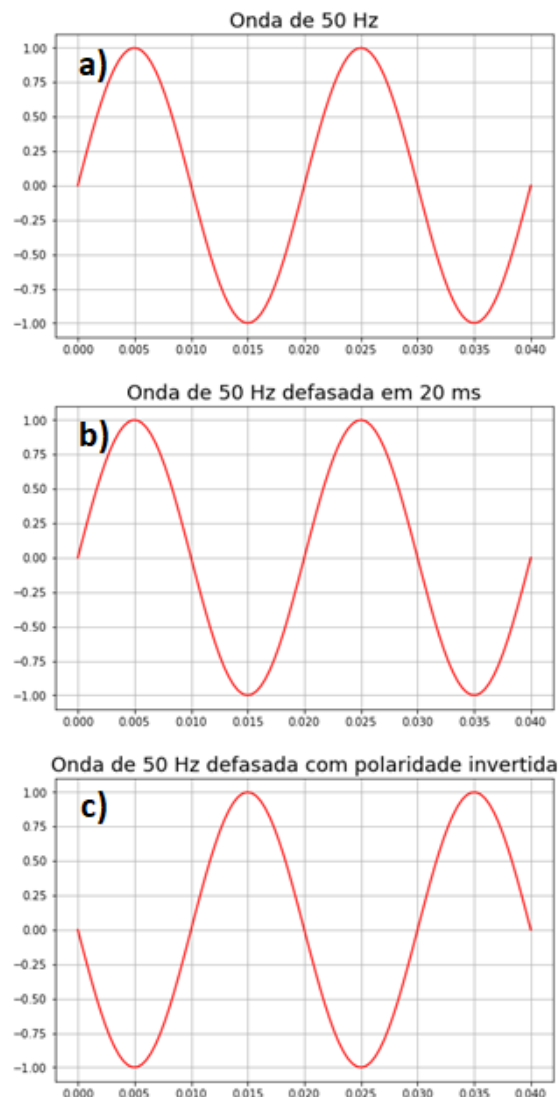


Figura 14: a) Onda seno de 50 Hz; b) a mesma onda de 50 Hz defasada em 20 ms; c) polaridade invertida após a defasagem. Fonte: Autor.

A partir das figuras 13 b) e 14 b) também é possível perceber que as ondas quando são defasadas mas sem terem suas polaridades invertidas, simulando,

portanto, um *ghost* de fonte e receptor, as frequências sofrerão o efeito inverso daquilo demonstrado em ambas as figuras no índice c).

6.2 SIMULAÇÃO A OCORRÊNCIA DE *GHOST* NOS DADOS REAIS

A *wavelet* de Ricker gerada com base na equação (24) está representada na Figura 15 no domínio do tempo, onde nota-se a perfeita simetria da mesma neste domínio. Esta *wavelet* que foi utilizada para as simulações de *ghost* e geração de filtro.

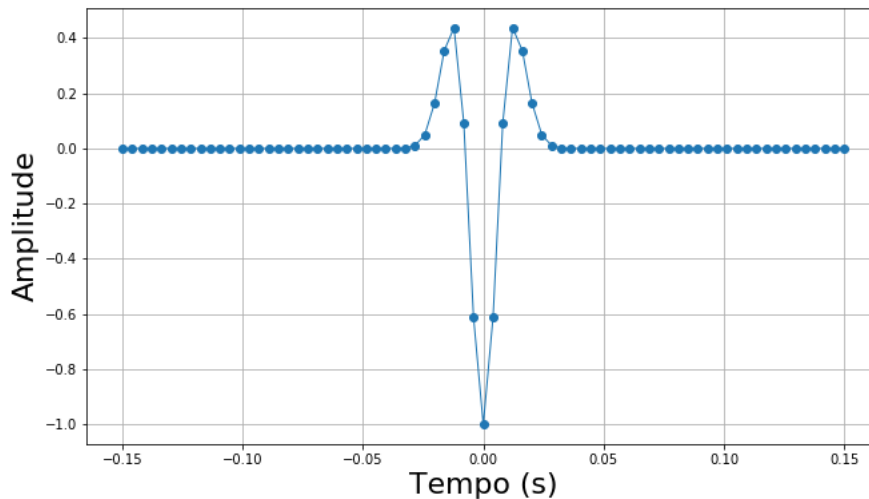


Figura 15: *wavelet* de Ricker sintética com polaridade invertida. Fonte: Autor.

O espectro de frequências dessa mesma *wavelet* de Ricker está demonstrado na Figura 16. Como previsto por Wang (2015), o mesmo não apresenta simetria. O tempo de atraso Δt obtido de cada *ghost* está representado na tabela 2 junto com seus respectivos operadores $g(t)$ associados. É importante ressaltar que os valores de Δt_1 e Δt_3 nessa tabela foram arredondados para a amostra mais próxima, ou seja, 12 ms e 32 ms, respectivamente.

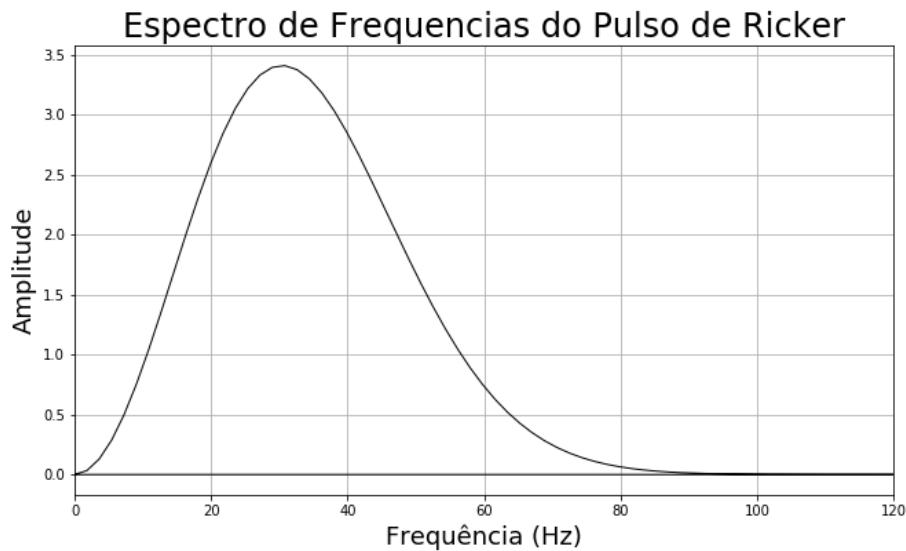


Figura 16: Espectro de frequências da *wavelet* de Ricker sintética. Fonte: Autor.

Δt_1	10,6 ms	$g_1(t) =$	(1, 0, 0, 0, -0.95, 0, 0, 0, 0)
Δt_2	20,0 ms	$g_2(t) =$	(1, 0, 0, 0, 0, -0.95, 0, 0, 0)
Δt_3	30,6 ms	$g_3(t) =$	(1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.95)

Tabela 2: Tempos de atraso de cada *ghost* e seus respectivos operadores $g(t)$.

A Figura 17 mostra o resultado da convolução dos operadores $g(t)$ com a *wavelet* de Ricker simulada, e corrobora as observações feitas a partir das figuras 13 e 14. Na Figura 17a) há um *notch* em 83 Hz que é pouco perceptível pois o conteúdo de frequências desta *wavelet* de Ricker já é quase nulo nesta faixa. No entanto, neste mesmo item a) é perceptível também que há um aumento da maior amplitude do espectro da *wavelet* de Ricker original, de 3,5 na Figura 16, frente a 6,2 na Figura 17a). Nos itens b) e c) os *notches* e ampliações de frequências mais baixas já são mais perceptíveis. É importante notar que no caso de $g_3(t)$ os *notches* ocorrem nas frequências cujos períodos são iguais a metade do período de atraso do *ghost* e as ampliações ocorrem nas frequências de período igual ao atraso. Isto ocorre porque neste tipo de *ghost* a polaridade da onda é invertida duas vezes ao refletir na interface água-ar, tornando-se igual a polaridade da onda original. Em uma analogia com a Figura 13, a frequência de 25 Hz ficaria como no item b) quando defasada em 20 ms com mesma polaridade, alinhando seus picos com os vales da onda não defasada, anulando-se. Por outro lado, a onda de 50 Hz seria medida

como o item b) da Figura 14, somando seus picos aos picos da onda não defasada. Nota-se que a amplificação em 25 Hz nos itens b) e c) da Figura 17 é tamanha que a frequência de pico da Ricker, que antes era de 35 Hz, passa para a faixa dos 25 Hz.

Do ponto de vista da resolução sísmica, esta redução da frequência de pico f_p aumenta o valor de T_r da equação 26, assim como o de $b/2$ na equação 27. A consequência disto é que a espessura de camadas que podem ser resolvidas aumenta, perdendo definição de refletores mais finos. Além disto, uma consequência direta do impacto do *ghost* seria a perda completa de visualização de refletores cujos picos (em frequência) sejam em 50 Hz, já que na convolução no domínio da frequência haveria multiplicação por valores muito próximos de zero.

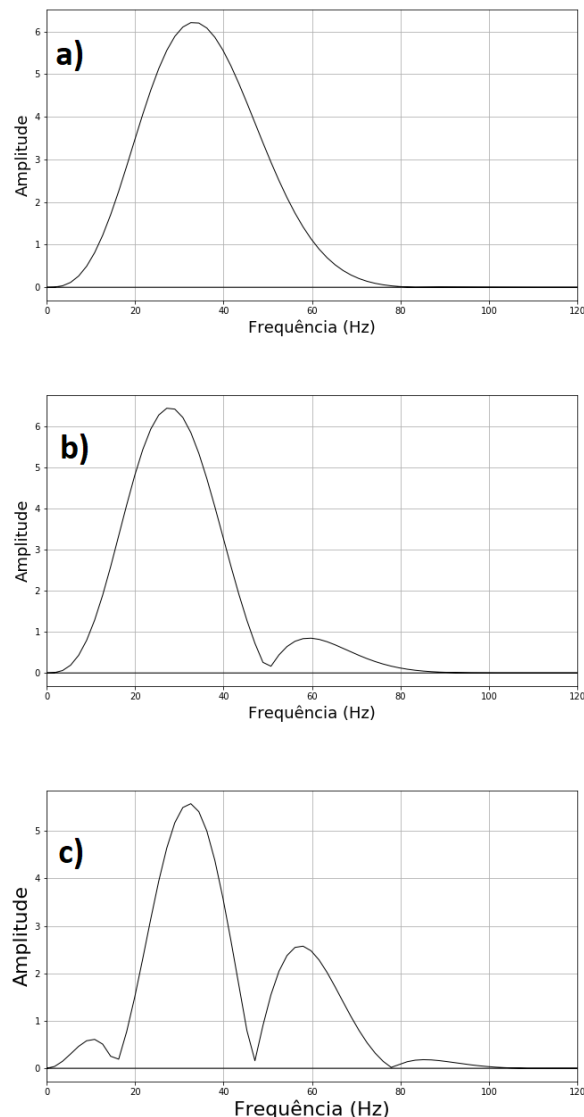


Figura 17: Espectro de Frequências da *wavelet* de Ricker com *ghost* simulado por $g_1(t)$ em a), $g_2(t)$ em b) e $g_3(t)$ em c). Fonte: Autor

6.3 SIMULAÇÃO DE UM MÉTODO DE AQUISIÇÃO

A variação de profundidade ao longo do *offset* em um cabo de perfil curvo, conforme proposto por Soubaras (2010), utilizada para simulação está demonstrado na Figura 18.

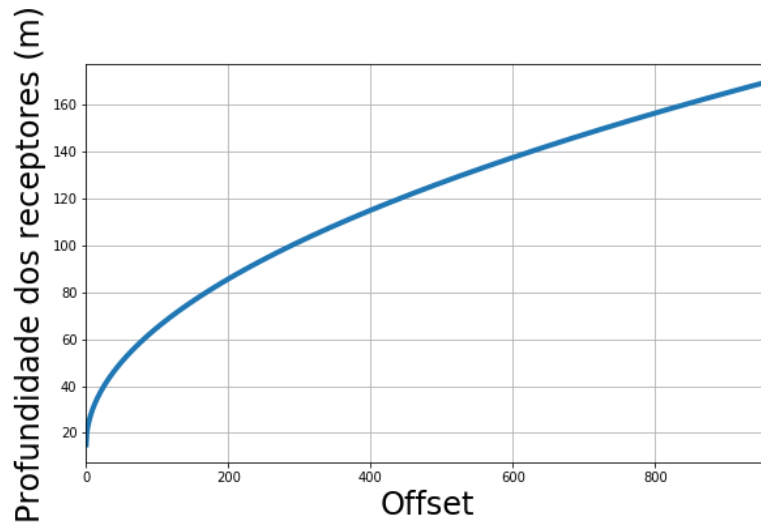


Figura 18: Gráfico da variação da profundidade x *offset*. Fonte: Autor.

A modelagem do método de aquisição de cabo com perfil curvo se mostrou de simples compreensão sob o ponto de vista do conteúdo de frequências. A Figura 19 mostra como os *notches* acontecem em frequências diferentes para diferentes *offsets*, sobrepondo-se picos a vales uns dos outros. Ao final, somam-se numa média mais bem distribuída, como na Figura 20. Sob a ótica das equações de Jovanovich, este método se baseia em atribuir valores diferentes para g em cada *offset*, fornecendo diferentes tempos de atraso. Os outros métodos abordados neste trabalho também funcionam com base em diferentes valores de tempo de atraso. O método proposto por van den Berg e Fokkema (2013) se baseia em dois valores diferentes de d para cada hidrofone de forma que os picos gerados pelo *ghost* em um dos hidrofones se alinhe com o *notch* do hidrofone complementar. O método de Parkes e Hegna (2011) funciona de maneira análoga, com a diferença que são duas fontes a profundidades diferentes, ao invés de hidrofones. Essas fontes, disparadas com um intervalo de tempo específico, também gerarão picos alinhados com os *notches* dos disparos complementares.

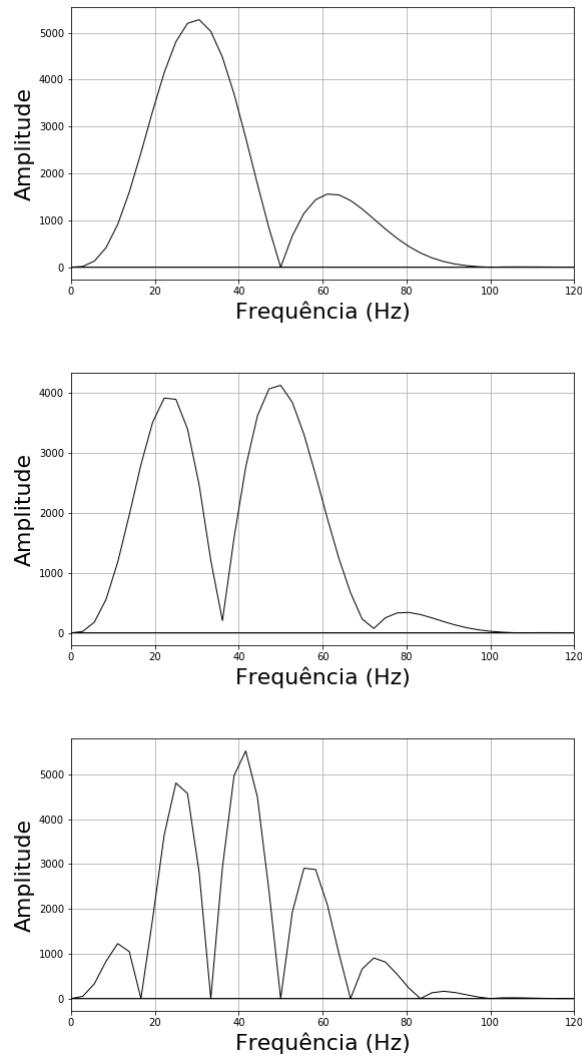


Figura 19: diferentes *notches* e picos para diferentes tempos de atraso do *ghost*.
 Fonte: Autor

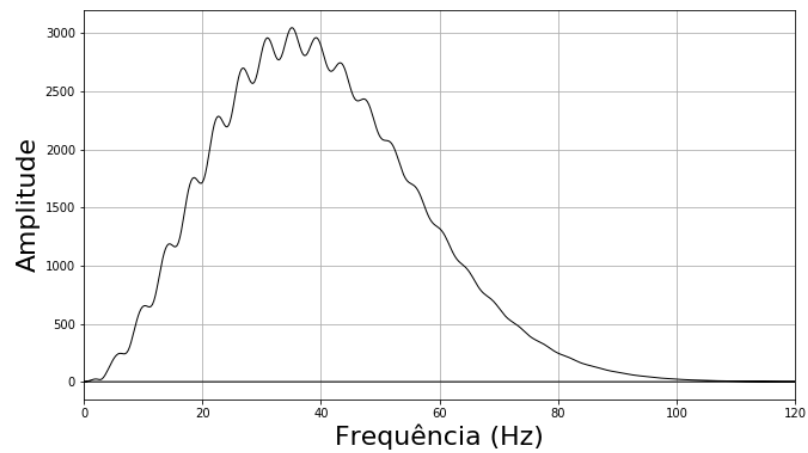


Figura 20: Sobreposição do espectro dos *ghosts* gerada pelo empilhamento dos traços de um mesmo CMP do levantamento simulado. Fonte: Autor.

6.4 ANÁLISE DO *GHOST* NO CASO REAL

A *wavelet* estimada dos dados de referência está apresentada em tempo na Figura 21. Percebe-se que se aproxima de uma *wavelet* de Ricker e está bastante simétrica no tempo. Um detalhe importante desta *wavelet* são os lóbulos laterais que a mesma apresenta após a amostra 25.

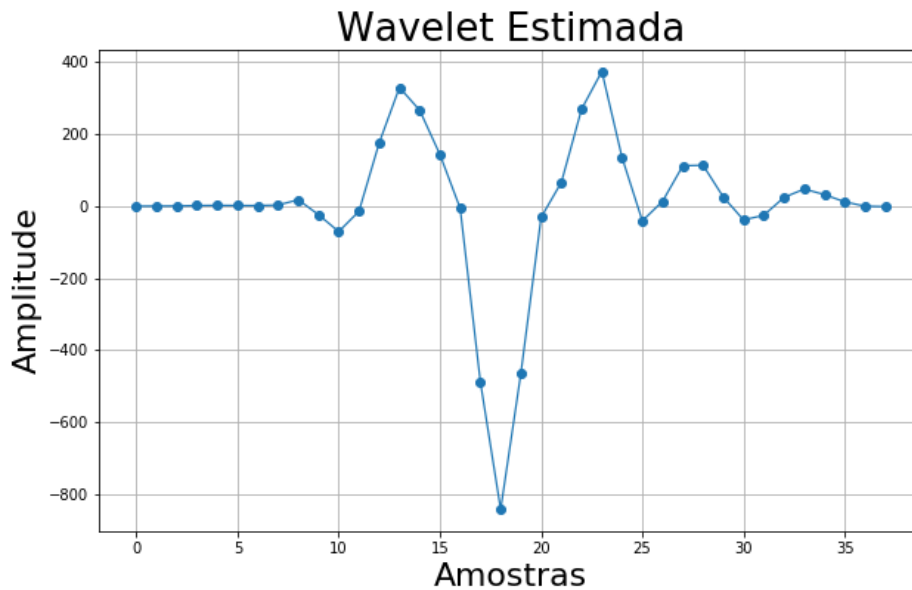


Figura 21: *Wavelet* real estimada através do empilhamento do horizonte do fundo marinho após *flattening*. Fonte: Autor.

A Figura 22, mostra a mesma *wavelet* estimada no domínio da frequência. É evidente a perda de frequências causadas pelo *ghost* na faixa de 53 Hz e, conforme dito anteriormente, este espectro se aproxima ao espectro da *wavelet* de Ricker com $g_2(t)$. Por isto apenas a Ricker com $g_2(t)$ simulado foi utilizada para modelar um filtro a ser aplicado na *wavelet* real do dado.

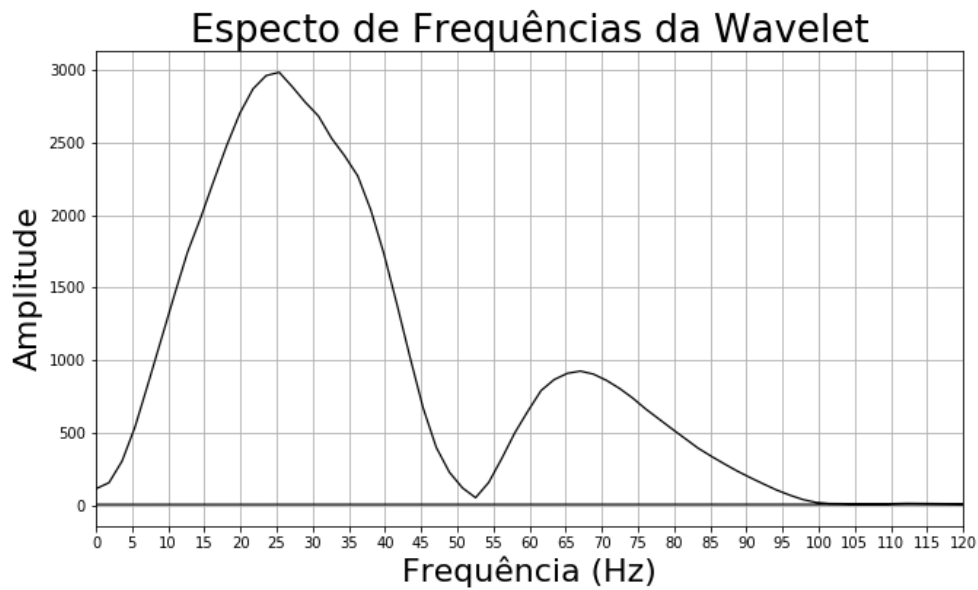


Figura 22: Espectro de frequências da *wavelet* real estimada por empilhamento do horizonte referente ao fundo marinho. Fonte: Autor.

A série de refletividades obtida está demonstrada, no domínio do tempo, na Figura 23. Esta série não apresentou valores muito discrepantes em relação aos demais, portanto pode ser considerada estável e útil para ser analisada em termos de frequências.

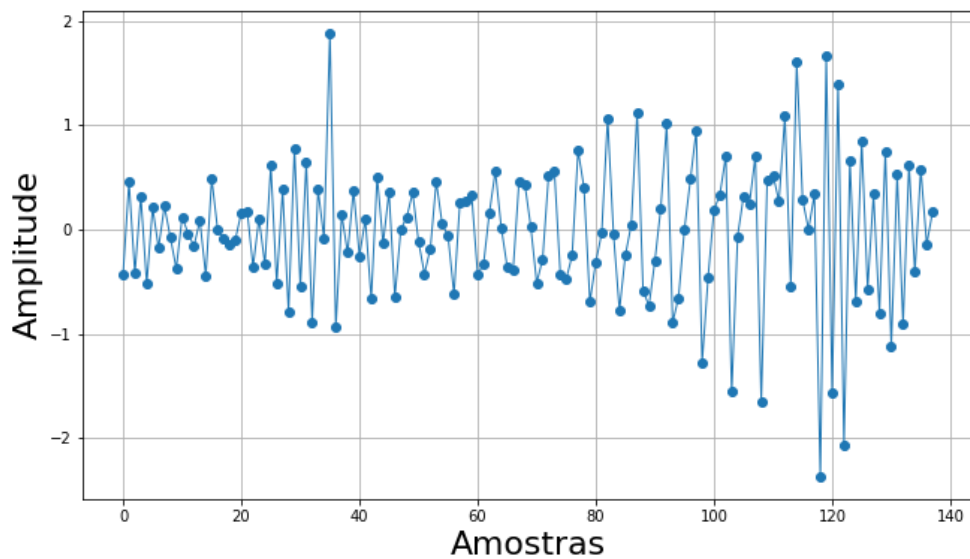


Figura 23: Série de refletividades estimada. Fonte: Autor.

Esta mesma série de refletividades está representada no domínio da frequência na Figura 24 a seguir. É nítido que há um pico discrepante na frequência de 53 Hz, pois esse valor de amplitude é obtido pela divisão por números próximos a zero na faixa de 53 Hz, conforme a equação 23.

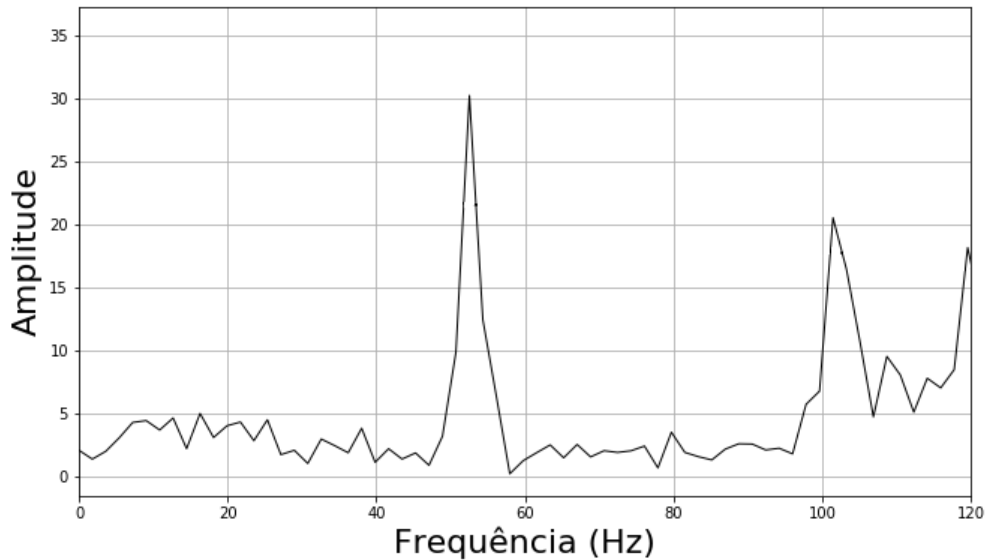


Figura 24: Espectro de frequências da série de refletividades estimada. Fonte: Autor.

6.5 MODELAGEM E APLICAÇÃO DO FILTRO

Para a modelagem do efeito *ghost* nos dados reais de referência, apenas a modelagem de $g_2(t)$ aproximou o espectro de frequências sintético (Figura 17b) ao espectro do dado original (Figura 22). Isto pode ocorrer devido a alguma etapa durante o processamento que foi eficaz em remover os demais *ghosts*, mas que não contemplou o *ghost* de 20 ms de atraso. No domínio do tempo, porém, observando a Figura 25, fica claro que a *wavelet* simulada com *ghost* não se assemelha tanto à *wavelet* estimada (Figura 21). Como resultado, seria de se esperar que a aplicação do filtro à onda gerasse distorções na forma da mesma.

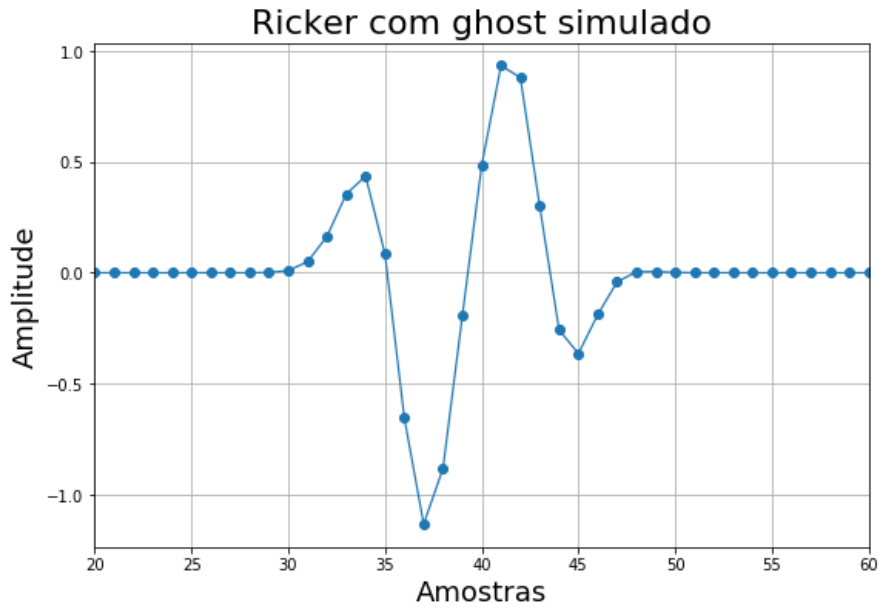


Figura 25: *Wavelet* de Ricker sintética com *ghost* simulado por $g_2(t)$ em tempo. Fonte: Autor.

A Figura 26 mostra o espectro de frequências desta *wavelet*. Percebe-se que com o ajuste feito, o *notch* simulado se aproximou mais aos 53 Hz, como no dado real. Este ajuste foi a adição de um valor 0.35 na sexta amostra do vetor $g_2(t)$, de forma que $g'_2(t) = (1, 0, 0, 0, 0, -0.95, 0.3)$, pois assim a simulação do *ghost* aproximou mais o espectro de frequências àquele do caso real dos dados da Spectrum Geo.

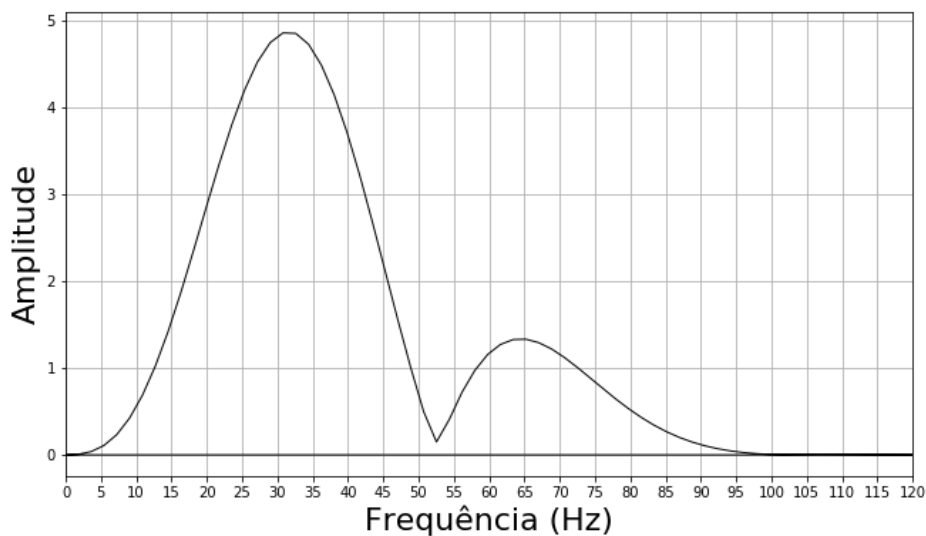


Figura 26: Espectro de frequências da *wavelet* sintética com *ghost* simulado usada para modelagem do filtro de forma. Fonte: Autor.

O filtro obtido a partir desta simulação está apresentado em frequência na Figura 27. Nota-se a amplificação deste para a frequências em torno de 53 Hz.

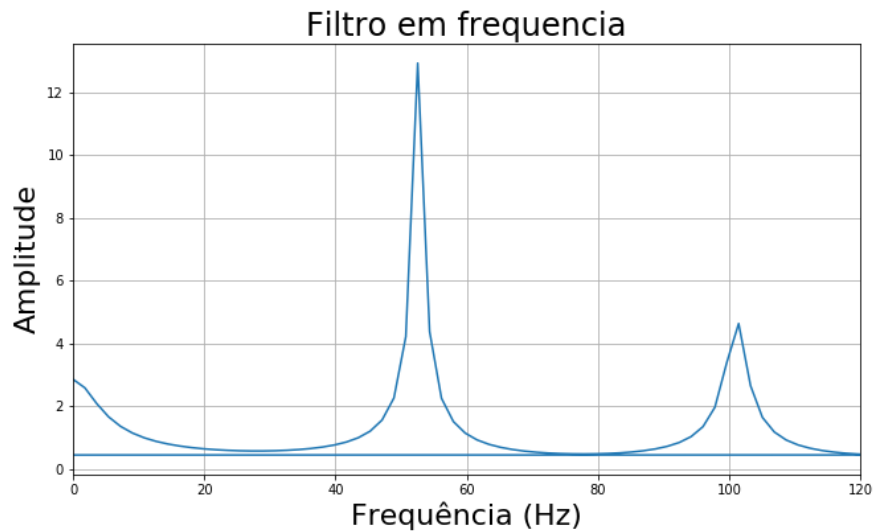


Figura 27: Gráfico do espectro de frequências do filtro de forma. Fonte: Autor.

A aplicação deste filtro $D(\omega)$ na *wavelet* $S(\omega)$ do dado real, no domínio da frequência, está apresentada na Figura 28. É possível perceber que há uma amplificação das frequências atenuadas, que vão de valores próximos a zero na Figura 22 para em torno de 500 na Figura 28. Também há uma atenuação das frequências ao redor de 30 Hz.

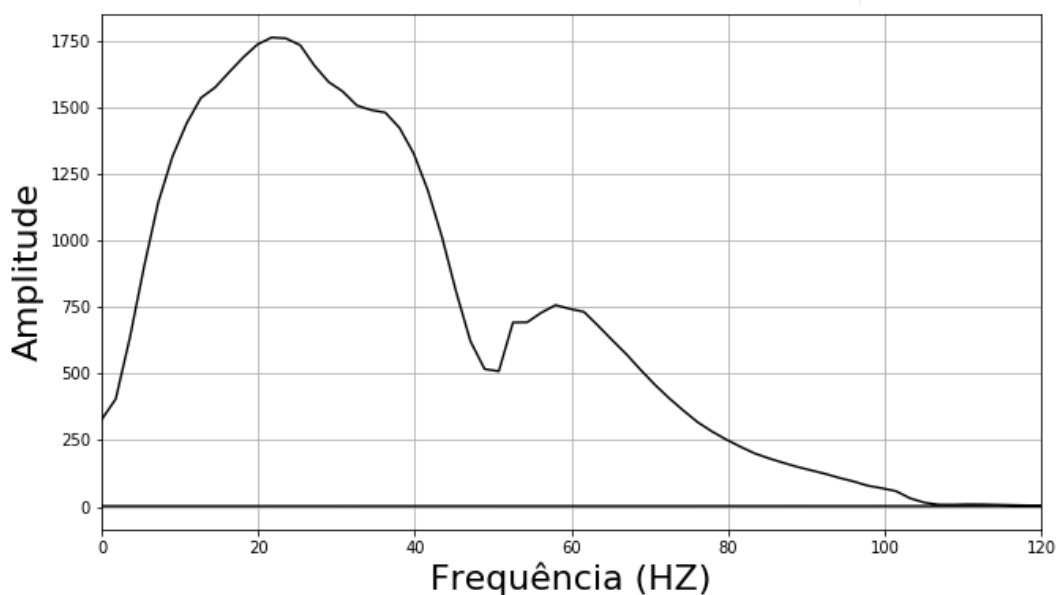


Figura 28: Gráfico do espectro de frequências da *wavelet* real estimada filtrada. Fonte: Autor.

Já no domínio do tempo, é possível perceber que a aplicação do filtro gerou distorções na *wavelet* do dado real, perdendo simetria em tempo e gerando ondulações, como mostra a Figura 29.

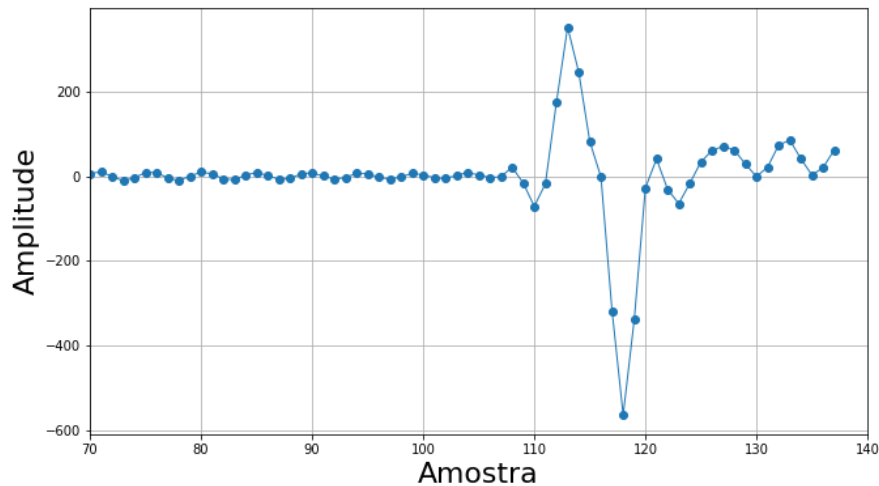


Figura 29: *Wavelet* real estimada filtrada em tempo. Fonte: Autor.

O filtro, no caso sintético, foi gerado para transformar uma onda não simétrica no tempo de volta em uma *wavelet* de Ricker simétrica no tempo. Quando esse filtro foi aplicado ao dado real tirou a simetria da onda no tempo. No domínio da frequência, por outro lado, a aplicação do filtro ao dado real não gerou distorções, sendo, na verdade, possível recuperar frequências perdidas no *notch*.

Um ponto importante a se levantar é que a modelagem do *ghost* (aqui se inclui apenas o que se assemelhou ao espectro da *wavelet* real) gerou um *notch* em 50 Hz referente a um atraso de 20 ms. No espectro de frequências da *wavelet* estimada, porém, o *notch* está mais próximo de 53 Hz, o que justificou os ajustes feitos na modelagem para a geração do filtro. Isto pode ocorrer porque, sendo um dado já empilhado, o valor de H nas equações (1), (2), (3) e (4) pode sofrer grandes variações para grandes *offsets*, já que, como visto na Figura 1, o ponto de reflexão do *ghost* na interface alvo não é exatamente o mesmo do sinal primário. Isso geraria diferentes valores de Δt e posicionaria os *notches* em outras frequências. Desta forma, ao empilhar os traços, o *notch* “migraria” para outras frequências. Além disto, podem ter sido seguidos procedimentos durante o processamento dos dados que alteraram a banda de frequências do dado empilhado. Portanto, esta forma de atenuar o efeito *ghost* poderia ter um resultado melhor se a *wavelet* fosse estimada

com o dado pré-*stack*, para cada *offset*, assim, seria possível modelar o *ghost* com mais precisão e um filtro seria modelado para cada traço antes do empilhamento.

Voltando à ótica da resolução sísmica, a aplicação do filtro na *wavelet* estimada, embora tenha sido capaz de atenuar frequências da faixa de 15 Hz a 30 Hz, não o fez de forma a aumentar a frequência de pico. A consequência direta disso é que o valor de $b/2$ não diminuiu. Sendo assim, a aplicação do filtro não foi capaz de afinar a espessura entre refletores que podem ser diferenciados. Por outro lado, no domínio do tempo, a *wavelet*, como já mencionado, perdeu a simetria e, como os critérios citados por Kallweit e Wood (1983) se aplicam a *wavelets* simétricas no tempo, mesmo que o filtro melhorasse a resolução sísmica no espectro de frequências, não seria possível fazer uma análise do ganho de resolução com a aplicação do mesmo.

Por fim, ao aplicar o filtro no traço mostrado na Figura 30, é possível observar que, assim como ocorreu na *wavelet*, o filtro gerou algumas distorções no traço, como mostra a Figura 31. Neste caso, essas distorções foram tão impactantes que o pico referente ao fundo do mar, que é nítido na Figura 30 (em torno da amostra 17), ficou praticamente indetectável na figura 31.

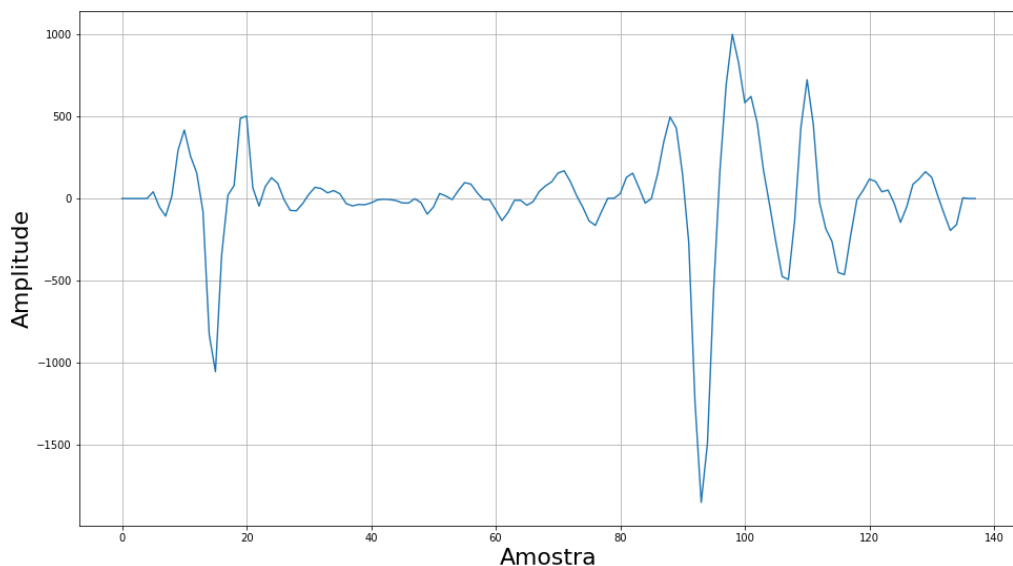


Figura 30: Traço escolhido para aplicação do filtro. Fonte: Autor.

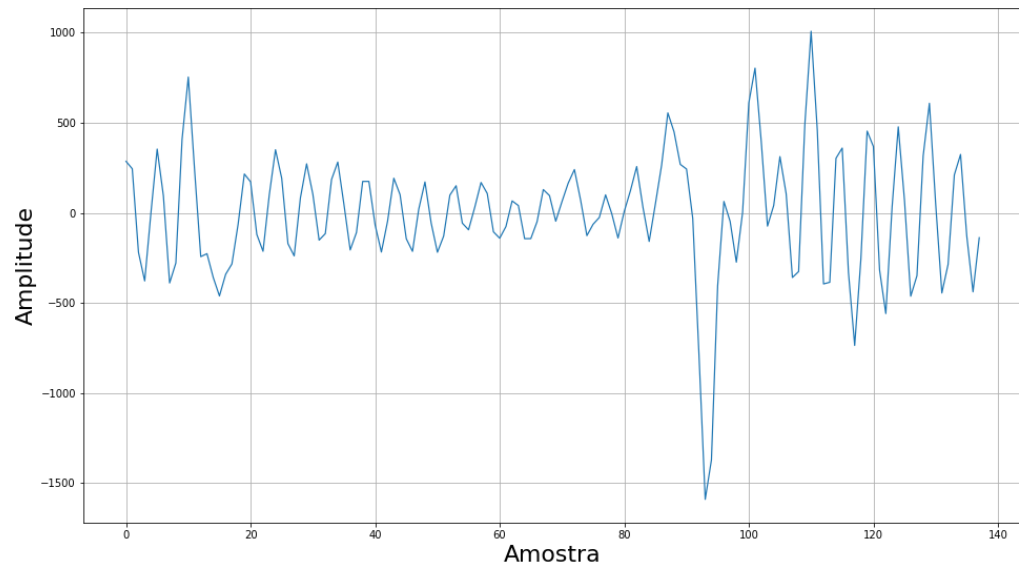


Figura 31: Traço filtrado. Fonte: Autor.

7 CONCLUSÕES

A ocorrência do efeito *ghost* é inevitável em uma aquisição sísmica marinha. Seus impactos na interpretação sísmica podem ser severos, pois, como demonstrado, o mesmo tem a capacidade de tornar o levantamento quase completamente cego para algumas bandas de frequência e, além disto, pode diminuir consideravelmente a frequência de pico de uma *wavelet*, conseqüentemente diminuindo também o poder de resolução da sísmica.

Por outro lado, este trabalho mostrou que o *ghost* é consideravelmente fácil de ser solucionado. Com uma breve simulação de um tipo de levantamento, foi demonstrado como o processo de aquisição por si só é capaz de atenuar os efeitos desta reflexão *ghost*, formando um espectro de frequências mais homogêneo, sem *notches* ou ampliações de outras frequências.

A modelagem de um filtro para ser aplicado ao dado real já empilhado se mostrou promissora no sentido de recuperar frequências. No entanto, no domínio do tempo, o mesmo gerou distorções a ponto de tirar a simetria da *wavelet*, portanto não apresentou um resultado prático para ser aplicado ao levantamento a fim de recuperar as frequências perdidas pelo efeito *ghost*.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HAYES, Monson H., **Digital Signal Processing**, 1999.

HSU, Hwei. **Sinais e Sistemas**. Bookman, 2012.

JOVANOVIĆ, Dushan B., SUMNER, Roger D., AKINS-EASTERLING, Sharon L. **Ghosting and marine signature deconvolution: A prerequisite for detailed seismic interpretation**. Geophysics, vol. 48, 1983.

KALLWEIT, R. S. & WOOD, L. C. **The limits of resolution of zero-phased wavelets**. Geophysics, vol. 47 (1982).

OPPENHEIM, Alan V., SCHAFER, Ronald W., BUCK, John R. **Discrete-Time Signal Processing**. Prentice Hall, 2008.

Offshore Magazine, 2015. Disponível em:

<https://www.offshore-mag.com/geosciences/article/16758271/processingbased-broadband-enhances-image-quality-in-frontier-areas>

PARKES, Gregg & HEGNA, Stian, PGS. **A marine seismic acquisition system that provides a full 'ghost-free' solution**. SEG San Antonio Annual Meeting, 2011

PORSANI, Milton J. & URSIN, Bjorn – **Mixed-phase deconvolution**. Geophysics, 1998.

ROSA, André Luiz Romanelli. **Análise do Sinal Sísmico**. SBGf 2010.

SOUBARAS, Robert, **Method and Apparatus for Deghosting Seismic Data**. United States Patent, Patent, 2013.

TENGHAMN, Rune, VAAGE, Svein & BORRESEN, Claes, PGS. **A Dual-Sensor Towed Streamer; Its Viable Implementation and Initial Results.** SEG Annual Meeting (2007).

WANG, Yanghua. **Frequencies of the Ricker wavelet.** Geophysics, vol. 80. 2015.

YILMAZ, Öz. **Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data.** Society of exploration geophysicists, 2008.