



Estudo e Implementação da Inversão da Forma de Onda Completa (FWI)

Fábio de Andrade Barboza *Hervé Cédric Yviquel*

Relatório Técnico - IC-PFG-24-10
Projeto Final de Graduação
2024 - Julho

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO

The contents of this report are the sole responsibility of the authors.
O conteúdo deste relatório é de única responsabilidade dos autores.

Estudo e Implementação da Inversão da Forma de Onda Completa (FWI)

Fábio de Andrade Barboza*

Hervé Cédric Yviquel*

Resumo

O conhecimento detalhado da subsuperfície terrestre é de extrema importância para áreas como a exploração de recursos naturais, a realização de estudos ambientais e o planejamento da infraestrutura. Este trabalho explora a Inversão da Forma de Onda Completa (FWI), uma técnica de imageamento geofísico capaz de gerar modelos detalhados da subsuperfície terrestre a partir de dados de propagação de ondas sísmicas coletados na superfície. Também é abordada a simulação da propagação de ondas, fundamental para o imageamento geofísico, e a implementação experimental da FWI utilizando a infraestrutura de computação do Laboratório de Sistemas de Computação (LSC) do Instituto de Computação (IC) da Unicamp. A modelagem sísmica e a simulação de dados sísmicos complementam a análise. Conclui-se com uma discussão sobre melhorias futuras, incluindo a execução paralela e distribuída da aplicação e o emprego de técnicas de aprendizado de máquina para aprimorar a qualidade dos modelos gerados pela aplicação.

1 Introdução

A exploração de recursos naturais como petróleo, gás natural e reservatórios subterrâneos de água, a realização de estudos ambientais, e o planejamento de infraestrutura são algumas das atividades que dependem fortemente do conhecimento detalhado da subsuperfície terrestre.

O Projeto Devito, um pacote Python desenvolvido para a implementação eficiente de computações de estênceis otimizadas, surge como uma ferramenta poderosa para facilitar essas atividades, permitindo a criação de modelos geofísicos detalhados e precisos a partir de definições de problemas simbólicos de alto nível.

Neste trabalho, será explorada a técnica de imageamento geofísico chamada Inversão da Forma de Onda Completa (FWI), que se baseia na geração iterativa de um modelo da subsuperfície terrestre a partir de dados de propagação de ondas sísmicas coletados na superfície.

Além disso, será abordada também a simulação da propagação de ondas, um componente fundamental do imageamento geofísico, e será discutida a implementação experimental da FWI, utilizando a infraestrutura de computação disponível no Laboratório de Sistemas de

*Instituto de Computação, Universidade Estadual de Campinas, 13081-970 Campinas, SP. Pesquisa desenvolvida com o suporte financeiro da PETROBRAS-CENPES/CEPETRO/FUNCAMP (Convênio 5872).

Computação (LSC) do Instituto de Computação (IC) da Unicamp. O estudo da modelagem sísmica e da simulação da obtenção de dados sísmicos complementar a análise, proporcionando uma visão abrangente das técnicas e ferramentas envolvidas na geração de modelos precisos da subsuperfície terrestre.

O trabalho será concluído com uma discussão sobre os próximos passos para a melhoria e evolução das técnicas apresentadas, incluindo a distribuição da aplicação para execução paralela e o uso de aprendizado de máquina para aprimorar a qualidade das imagens geradas.

Este trabalho está dividido da seguinte forma: a seção 2 apresenta o Projeto Devito, um pacote de ferramentas para resolução de problemas simbólicos de alto nível amplamente utilizado por aplicações geofísicas; a seção 3 explica o processo de imageamento geofísico, com ênfase no funcionamento da FWI e na simulação da propagação de ondas através de modelos de velocidade; a seção 4 analisa uma implementação das aplicações de modelagem, simulação de propagação de ondas e FWI; a seção 5 descreve a execução de duas implementações da FWI; a seção 6 indica possíveis direções para continuação da pesquisa, e o trabalho é concluído na seção 7.

2 Projeto Devito

O Projeto Devito é um pacote Python para implementar de maneira eficiente computações de estênceis otimizadas a partir de definições de problemas simbólicos de alto nível. O pacote emprega geração de código automática, inclusive de diretivas MPI, e compilação *just-in-time* para executar computações de maneira eficiente em diversas plataformas, como CPUs e GPUs.

As principais aplicações que podem se beneficiar da utilização das ferramentas do pacote são aquelas que envolvem o cálculo de diferenças finitas, bem como tarefas de processamento de imagens e aprendizado de máquina.

O principal objetivo de uso do pacote Devito é a criação de *kernels* de propagação de ondas em problemas de inversão sísmica. Em outras palavras, o pacote otimiza amplamente o cálculo numérico de soluções da equação diferencial da onda, permitindo uma fácil implementação de simuladores de propagação de onda, e é amplamente utilizado para construir aplicações geofísicas que envolvem a propagação de ondas, como simulações e imageamento geofísico, por exemplo [1, 10, 14, 15].

3 Imageamento geofísico

O imageamento geofísico é uma disciplina crucial no estudo e na exploração das estruturas e propriedades da subsuperfície terrestre. Utilizando princípios físicos e matemáticos, essa técnica permite a criação de modelos detalhados e precisos do interior da Terra, essenciais para diversas aplicações, como exploração de recursos naturais, estudos ambientais e planejamento de infraestrutura, a partir de dados coletados na superfície terrestre. Uma das principais aplicações que produzem essas imagens é chamada de "Inversão da forma de onda completa", ou FWI.

3.1 Inversão da forma de onda completa (FWI)

A Inversão de Forma de Onda Completa, ou FWI, é uma técnica avançada muito promissora devido capacidade de resolver detalhes finos e estruturas complexas na subsuperfície, porém com elevado custo de operações computacionais e de memória. Baseando-se nas ondas sísmicas registradas em receptores geofísicos localizados na superfície terrestre, a FWI utiliza métodos de otimização para ajustar modelos geológicos às formas precisas das ondas registradas, permitindo a reconstrução detalhada de propriedades como velocidade de onda e distribuição de material subsuperficial. Essa abordagem não apenas melhora a resolução das imagens obtidas, mas também oferece insights valiosos para a exploração de recursos naturais e estudos de impacto ambiental.

De maneira simples, a FWI requer duas entradas: 1) dados reais coletados na superfície; e 2) um modelo estimado da subsuperfície. A Figura 1 apresenta o esquema de aquisição dos dados reais.

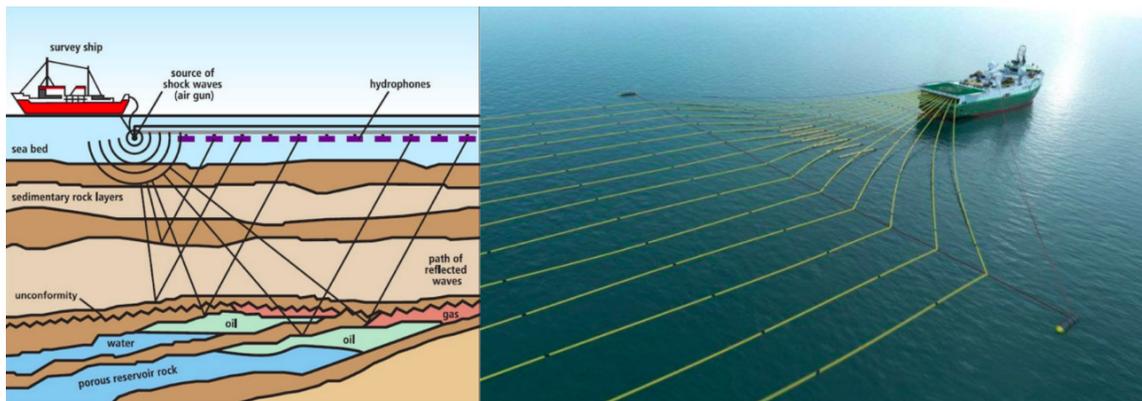


Figura 1: Esquema de aquisição de dados para o imageamento geofísico - Fonte: [6].

O processo de coleta dos dados inicia-se com uma fonte de ondas sísmicas, como um canhão de ar, por exemplo, emitindo ondas em direção à subsuperfície. As ondas propagam-se pelas camadas e parte delas é refletida de volta para a superfície cada vez que atravessam uma interface entre duas camadas da subsuperfície. As reflexões são então captadas por geofones ou hidrofones posicionados na superfície.

A FWI simula então a propagação de ondas sísmicas no modelo estimado da subsuperfície, compara os dados simulados com os dados reais coletados e realiza algumas alterações a atualizações no modelo estimado com o objetivo de deixar o modelo estimado mais parecido com a subsuperfície terrestre. Este processo de simulação-comparação-atualização é repetido uma série de vezes, até que a simulação da propagação das ondas sísmicas pelo modelo estimado produza dados satisfatoriamente próximos dos dados reais coletados, e o modelo estimado atualizado será uma imagem com alto grau de fidelidade em relação à subsuperfície terrestre.

Para garantir este alto grau de fidelidade, é necessário uma imensa quantidade de dados reais, e também que a resolução do modelo seja alta através de uma grande quantidade de pontos de discretização. Isto faz com que a técnica da FWI seja extremamente custosa

computacionalmente, e necessite de uma grande quantidade de memória. A técnica vem ganhando cada vez mais popularidade com a popularização de aceleradores de *hardware* como GPUs e TPUs, dispositivos especializados em computações paralelas, que podem acelerar significativamente a aplicação [3, 5, 6, 16, 17, 22, 23, 24].

3.2 Simulação de propagação de ondas

Um dos componentes fundamentais do imageamento geofísico é a simulação da propagação de ondas. As ondas são perturbações que se propagam no espaço e no tempo, transportando energia. A propagação das ondas pode ser descrita na física pela seguinte equação:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 u \quad (1)$$

A Equação 1 descreve ondas em um escalar através de uma função $u = u(x_1, \dots, x_n; t)$ dependente de uma variável t representando o tempo, e de uma ou mais variáveis espaciais x_1, \dots, x_n ; c é a velocidade de propagação da onda no meio. A função escalar u representa um deslocamento do repouso, como a pressão de um gás, por exemplo; o termo da esquerda da Equação 1 representa a taxa de aceleração desse deslocamento; já o termo da direita, que contém o operador Laplaciano espacial (∇^2), representa a taxa de deslocamento de um ponto \mathbf{x} nas n dimensões.

Em um espaço tridimensional, a Equação 1 se torna:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

Simular a propagação de uma onda bidimensional envolve resolver numericamente a Equação 2, e portanto torna-se necessária a discretização do problema. As dimensões espaciais x , y e z podem ser representadas por uma matriz tridimensional, enquanto que matrizes diferentes representam variações na dimensão temporal t .

4 Análise da implementação

A parte experimental deste projeto foi desenvolvida utilizando a implementação da FWI feita pelo Dr. Allan da Silva Pinto no repositório Github do projeto "distributed-jax/devito-solvers"¹. O repositório permite a realização de três tarefas: 1) modelagem; 2) simulação da obtenção de dados sísmicos; e 3) FWI acústica [21].

Todos os experimentos foram realizados no *Cluster Sorgan*, acessado através da rede interna do Laboratório de Sistemas de Computação (LSC) do Instituto de Computação (IC) da Unicamp. Os experimentos foram realizados utilizando as GPUs NVIDIA Tesla P100 disponíveis.

¹Disponível em: <https://github.com/distributed-jax/devito-solvers/>

4.1 Modelagem

A modelagem sísmica é um script que produz modelos de velocidade sintéticos simples e complexos. Modelos de velocidade são úteis para a testagem e avaliação de aplicações geofísicas, uma vez que a obtenção de dados reais é custosa e difícil. Utilizando modelos sintéticos, é possível testar o funcionamento das aplicações inicialmente com modelos mais simples, como um modelo pequeno com camadas isotrópicas de velocidade (Figura 2), e em seguida com modelos complexos e que simulam propriedades geofísicas encontradas na subsuperfície terrestre.

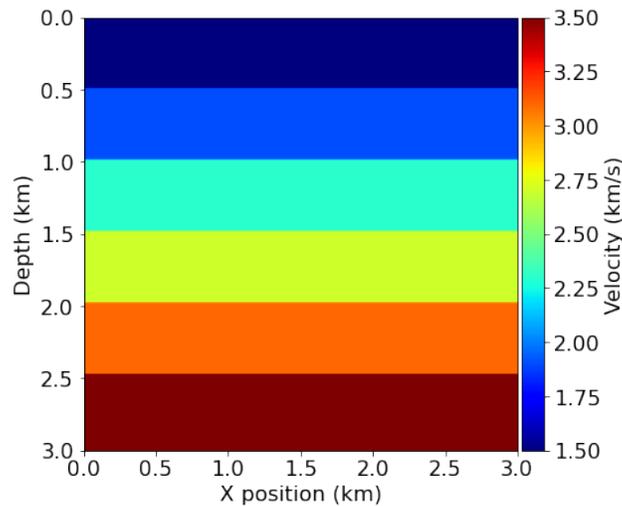


Figura 2: Modelo sintético de velocidade com camadas isotrópicas.

O modelo de velocidade sintético mais utilizado atualmente na indústria e na academia é o modelo "Marmousi", desenvolvido por pesquisadores no final dos anos 1980 e até hoje muito utilizado pois simula com muitos detalhes a composição da subsuperfície terrestre com suas muitas camadas e ângulos (Figura 3) [2].

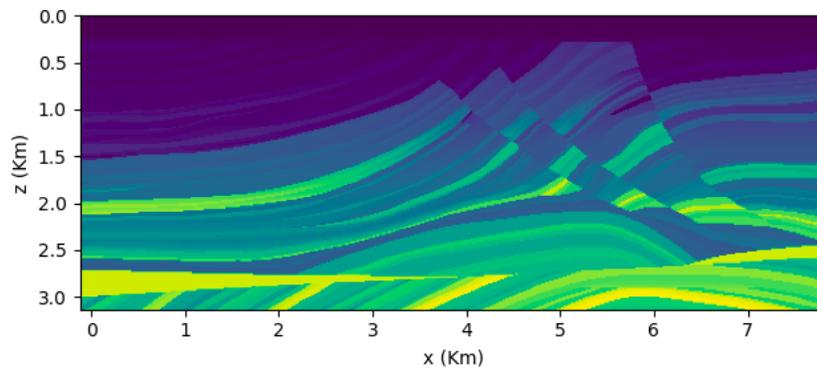


Figura 3: Modelo sintético de velocidade "Marmousi".

4.2 Simulação da obtenção de dados sísmicos

A simulação da obtenção de dados sísmicos nada mais é que a simulação da propagação de ondas sísmicas através de modelos de velocidade sintéticos. A simulação é iniciada com a injeção de uma fonte sísmica em algum ponto na parte superior do modelo de velocidade, geralmente um Pulso de Ricker, a segunda derivada da função Gaussiana, frequentemente utilizada na modelagem geofísica. A definição do Pulso de Ricker é dada pela Equação 3, para um instante t e uma frequência de pico f_M .

$$f(t) = (1 - 2\pi^2 f_M^2 t^2) e^{-\pi^2 f_M^2 t^2} \quad (3)$$

A Figura 4 apresenta um Pulso de Ricker com frequência de pico $f_M = 20Hz$ e duração de $150ms$.

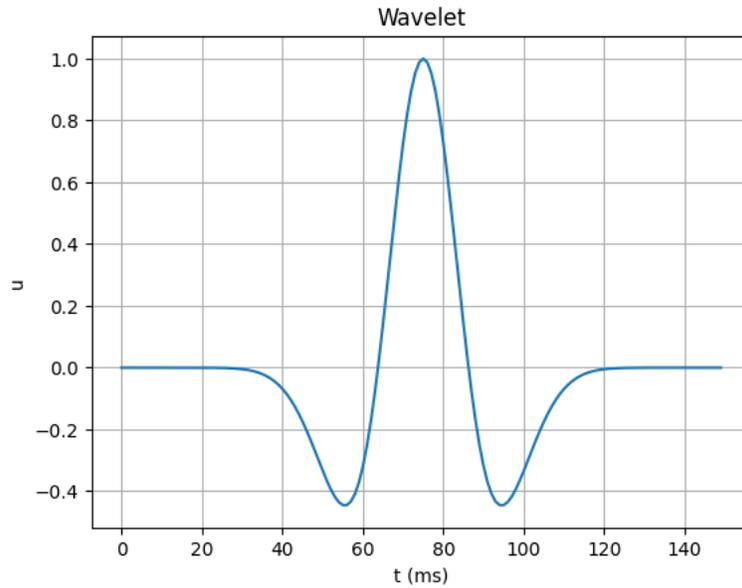


Figura 4: Pulso de Ricker.

Utilizando ferramentas de pacotes de simulação geofísica, como o Devito, a fonte é propagada ao longo de todo o modelo através da resolução numérica da equação da onda em várias iterações com pequenos intervalos temporais da ordem de milissegundos. A propagação é simulada por cerca de um a três segundos.

Nas fronteiras entre camadas no modelo de velocidade, parte da onda é refletida de volta à superfície e parte prossegue avançando pelo modelo, tal qual na obtenção de dados reais. O campo de onda no topo do modelo é registrado a cada iteração, do início ao fim da simulação, produzindo então um perfil de dados sísmicos conhecido como um *shot* como o da Figura 5.

Para tornar a simulação ainda mais realista, a posição da fonte é variada ao longo de uma série de pontos na superfície do modelo de velocidade, produzindo uma série de *shots*.

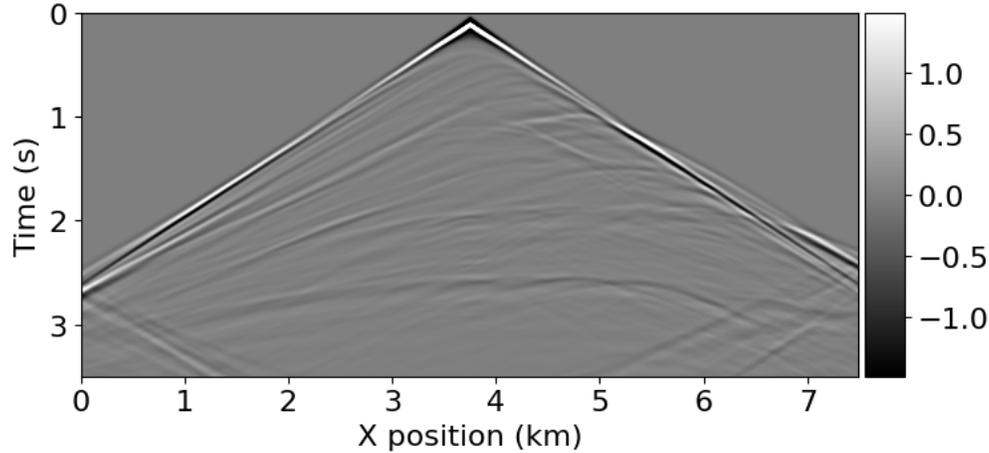


Figura 5: Perfil dos dados obtidos a partir do modelo "Marmousi".

Estes dados simulados podem ser utilizados para alimentar aplicações geofísicas, tais quais a FWI, para avaliar seu funcionamento e sua precisão.

4.3 Inversão da forma de onda completa (FWI)

A FWI é uma aplicação que tenta resolver o problema de otimização de minimizar a diferença entre um campo de onda observado e um campo de onda estimado.

A primeira etapa da aplicação é a criação de um modelo sintético da subsuperfície conhecido como "modelo real", e simulação da obtenção de dados reais através da propagação de uma série de fontes sísmicas ao longo do modelo, produzindo um conjunto de dados sintéticos de diversos *shots*. Na indústria, estes dados, conhecidos como "campo de onda real", são coletados por geofones ou hidrofones e fornecidos à aplicação.

Em seguida, um filtro gaussiano é aplicado ao modelo de velocidade real para suavizá-lo e simplificá-lo, produzindo um novo modelo de velocidade conhecido como "modelo estimado". Na indústria, o modelo estimado é produzido por geofísicos com base no conhecimento que têm do local estudado e fornecido à aplicação, e contempla a sua previsão de como é a subsuperfície terrestre no local. O modelo estimado pode ser até mesmo a saída de outras aplicações de imageamento geofísico menos sofisticadas e cuja precisão deseja-se melhorar com a aplicação da FWI.

Possuindo então as duas entradas necessárias, nomeadamente os *shots* e o modelo estimado da subsuperfície, a aplicação prossegue então com a realização *de facto* da FWI. A propagação das ondas sísmicas é simulada ao longo do modelo estimado, produzindo um campo de onda estimado que é então comparado com o campo de onda real.

O objetivo da aplicação é minimizar a diferença entre os dois campos de onda; para isso, a aplicação, com base no gradiente dessa diferença, aplica uma série de atualizações e mudanças no modelo estimado de velocidade, idealmente deixando-o mais próximo do modelo real de velocidade.

O processo de simulação-comparação-atualização é repetido diversas vezes, visando sempre a redução da diferença entre os modelos real e estimado. Quando essa diferença é suficientemente pequena, a aplicação "converge" e é concluída, e o modelo estimado é então um modelo da subsuperfície que possui alta probabilidade de corresponder à estrutura real da subsuperfície terrestre, e pode ser utilizado e estudado por geofísicos. Nem sempre, contudo, o modelo estimado converge para o modelo real, a depender das condições da subsuperfície e da qualidade do modelo estimado inicial, e a aplicação é concluída após um número fixado de iterações [3, 5, 6, 16, 17, 22, 23, 24].

5 Execução da FWI

O primeiro contato com a implementação da FWI foi com o estudo do tutorial publicado no jornal "The Leading Edge" entre 2017 e 2018. O tutorial utiliza o pacote Devito em sua implementação e é dividido em três partes: 1) modelagem progressa, apresenta a criação de modelos de velocidade sintéticos, a simulação da propagação de ondas e a obtenção de dados sintéticos de *shots*; 2) modelagem adjunta, explica o cálculo dos gradientes da função-objetivo da FWI através da modelagem adjunta; e 3) otimização, demonstra a aplicação dos gradientes para atualizar o modelo de velocidade estimado e melhorar assim sua qualidade e precisão [11, 12, 13].

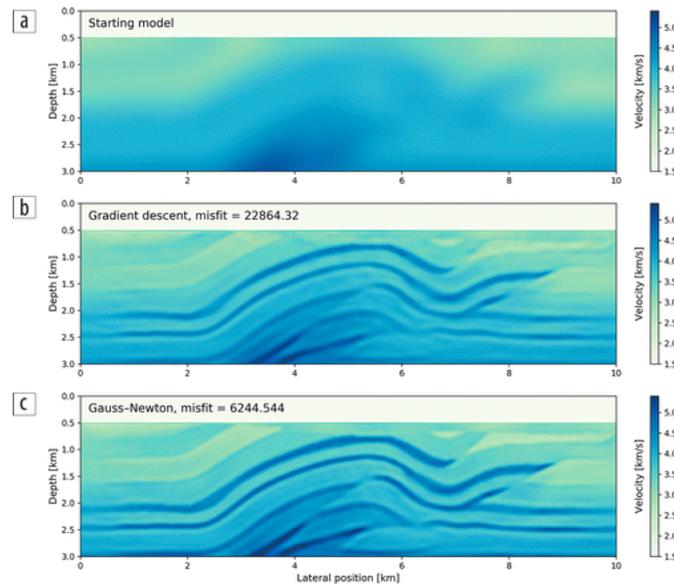


Figura 6: a) Modelo de velocidade estimado inicial; b) Modelo de velocidade final gerado pela FWI utilizando a descida do gradiente como otimização; c) Modelo de velocidade final gerado pela FWI utilizando o método de Gauss-Newton como otimização - Fonte: [13].

A Figura 6 apresenta o resultado final demonstrado pelos autores do tutorial, exibindo o modelo de velocidade estimado inicial utilizado pela aplicação, e os modelos de velocidade

finais produzidos pela FWI com a utilização de dois métodos diferentes de otimização do modelo com base nos gradientes da função-objetivo.

Em seguida, foi executada a implementação da FWI feita pelo Dr. Allan da Silva Pinto. Esta implementação também utiliza o pacote Devito, e realiza a criação do modelo (real) sintético de velocidade, obtenção dos dados sintéticos de *shots* através da propagação de fontes pelo modelo de velocidade real e aplicação da FWI ao modelo estimado derivado do modelo real [21].

A aplicação foi executada utilizando o modelo "Marmousi" como modelo de velocidade real para obtenção dos dados, e o modelo de velocidade estimado foi obtido aplicando-se um filtro gaussiano com desvio padrão 6. O filtro gaussiano é uma técnica de suavização de imagens que aplica uma função gaussiana a cada pixel, deixando a imagem "borrada". A transformação aplicada a cada pixel do modelo bidimensional é dada pela Equação 4.

$$G(x, z) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+z^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

A transformação $G(x, z)$ descreve a atualização do valor do ponto (\mathbf{x}, \mathbf{z}) no domínio discretizado segundo o desvio padrão da distribuição gaussiana σ .

O modelo utilizado é bidimensional e possui as dimensões (760×220) . Foram realizados 480 *shots* e executadas 10 iterações da FWI. O algoritmo foi executado em um nó com GPU NVIDIA Tesla P100 do *Cluster Sorgan*. O tempo médio de execução da aplicação foi de 6 horas e 18 minutos, totalizando uma média de aproximadamente 38 minutos por iteração e 4.75 segundos por *shot*, sendo que a simulação da propagação do campo de onda através dos modelos tanto real quanto estimado levou aproximadamente 1.2 segundo, e o cálculo dos gradientes levou aproximadamente 1.7 segundo para cada *shot*.

Iteração	Valor da função-objetivo
1	11987043.753527
2	196821617.743878
3	152698470.993635
4	141057754.180303
5	134795650.631713
6	132805696.668656
7	132420491.510418
8	132750364.500744
9	133417052.686536
10	134173143.592228

Tabela 1: Valores da função-objetivo da FWI por iteração

A Figura 7 apresenta os resultados obtidos da execução da aplicação, e permite a comparação do resultado final da FWI tanto com o modelo de velocidade real quanto com o modelo de velocidade estimado inicial, e a Tabela 1 apresenta os valores da função-objetivo da FWI calculados após cada iteração.

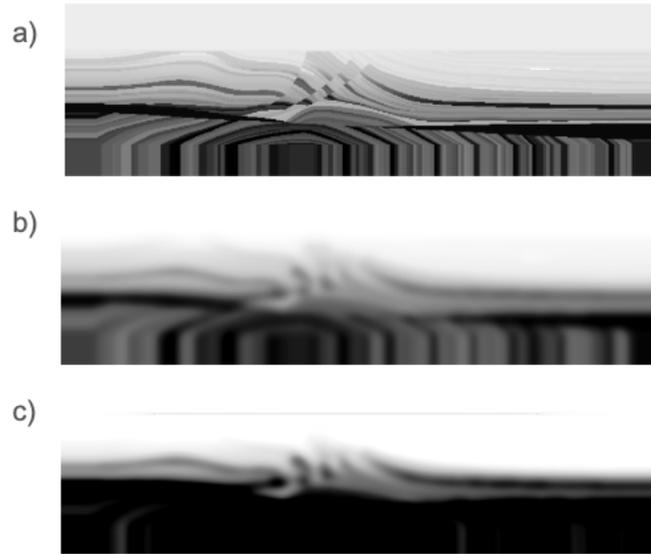


Figura 7: a) Modelo de velocidade real; b) Modelo de velocidade estimado inicial; c) Modelo de velocidade final gerado pela FWI.

Nota-se que na metade superior das imagens da Figura 7 houve uma melhora na qualidade do modelo estimado inicial para o modelo final gerado pela , e as interfaces podem ser melhor distinguidas; na parte inferior das imagens, contudo, nota-se que houve uma degradação da qualidade do modelo. Esta degradação deve-se ao fato de que algoritmos de imageamento geofísico baseados na propagação de ondas não são capazes de identificar com clareza e precisão interfaces com graus de inclinação elevados, como ocorre em depósitos de sal [4, 5, 19].

Analisando a Tabela 1, que apresenta os valores da função-objetivo da FWI ao longo das iterações, nota-se o impacto dessa degradação da primeira para a segunda iteração, com um aumento do valor da função-objetivo; nas iterações seguintes, contudo, ocorreu a redução progressiva dos valores da função-objetivo, indicando o funcionamento do algoritmo da FWI. Ao final da décima iteração, percebe-se ainda valores muito elevados da função objetivo, indicando que não houve uma convergência clara da aplicação, ainda que a metade superior do modelo final tenha apresentado melhor definição que a metade superior do modelo estimado inicial.

6 Próximos passos

O próximo passo mais direto da pesquisa seria a atualização da implementação da FWI para melhorar a convergência e estabilidade do algoritmo. Diversas pesquisas sugerem técnicas criativas que auxiliam a FWI a produzir modelos mais precisos e detalhados do solo, desde a utilização de novas técnicas de normalização e otimização, como a aplicação da norma

k-support para reduzir o *overfitting* e melhorar a robustez da FWI face aos ruídos de fundo [8], e também a aplicação de algoritmos de traçado de raio (ou *ray tracing*) e de iluminação para realizar um pré-condicionamento espacial do modelo e assim reduzir significativamente o erro do modelo final gerado pela aplicação [20, 25].

Uma outra possibilidade para a continuação da pesquisa seria a distribuição da aplicação, de modo que a simulação de vários *shots* fosse feita em paralelo por várias GPUs, reduzindo assim o tempo de execução cada iteração e, por consequência, o tempo total de execução da aplicação.

Conforme discutido em [18], são possíveis duas técnicas de distribuição da aplicação FWI: 1) a distribuição centralizada dinâmica, que envolve cada nó realizando, a cada iteração, a simulação de um subconjunto de *shots*, e todos os resultados são agregados por um nó central, que calcula então a diferença entre o campo de onda real e o campo de onda estimado, realiza a atualização do modelo estimado e comunica o novo modelo aos demais nós; e 2) a distribuição descentralizada estática, em que cada nó possui seu próprio modelo estimado local e cada nó realiza, a cada iteração, a simulação de um subconjunto de *shots* e calcula a diferença entre o campo de onda real e o campo de onda estimado para o seu subconjunto de *shots*, de maneira que todos os resultados sejam reduzidos (através de funções como **MPI_Allreduce**) e propagados para todos os nós, que atualizam então seus modelos estimados locais.

Os autores argumentam que a distribuição centralizada dinâmica é adequada apenas em situações em que a quantidade de nós é pequena e tamanho do modelo também é pequeno, uma vez que há um gargalo de comunicação entre o nó principal e todos os nós trabalhadores, enquanto que a distribuição descentralizada estática apresentou resultados de aceleração próximos do ideal para todos os tamanhos de modelo e quantidades de nós, uma vez que a comunicação acontece apenas uma vez ao final de cada iteração, e afirmam ainda que a vantagem do esquema cresce com o aumento do número de nós disponíveis.

Outra possibilidade de avanço na pesquisa seria a aplicação de modelos de aprendizado de máquina e aprendizado profundo em conjunto com a FWI para melhorar ainda mais a qualidade das imagens geradas, uma prática que têm se tornado cada vez mais popular e se mostrado extremamente promissora na produção de modelos mais detalhados da subsuperfície terrestre de maneira eficiente [7, 9, 26].

7 Conclusões

Aplicações de imageamento geofísico são algumas das mais custosas aplicações científicas em termos de quantidade de operações, tempo de execução e quantidade de memória necessários para execução. Para que sejam viáveis, estas aplicações precisam ser executadas em grandes *clusters* munidos de muitos nós e aceleradores de *hardware*, como GPUs e TPUs, de modo que esteja disponível toda a memória necessária à aplicação e aproveite-se todo o paralelismo de dados característico dessas aplicações.

O imageamento geofísico é de extrema importância para diversas atividades, como a exploração de recursos naturais, estudos ambientais e planejamento de infraestrutura. Dada esta importância, é essencial a geração de modelos cada vez mais sofisticados e detalhados

da subsuperfície terrestre a partir de dados coletados na superfície. A geração de modelos precisos está se tornando uma realidade graças aos avanços tecnológicos, como o desenvolvimento de aceleradores de *hardware* que permitem a execução de aplicações complexas e custosas de maneira viável em supercomputadores.

Dois grandes aprendizados foram obtidos no decorrer deste projeto: 1) o estudo e a compreensão da teoria e do funcionamento da FWI, aplicação cada vez mais utilizada na geofísica para produção de mapas da subsuperfície terrestre a partir de dados coletados na superfície, com foco na análise do paralelismo de dados que ela oferece, bem como o estudo da modelagem sísmica e da simulação da propagação de ondas sísmicas através de modelos de velocidade; e 2) o primeiro contato com um *cluster* de computação de alto desempenho, a partir de um estudo de como funciona o desenvolvimento de aplicações científicas custosas computacionalmente e de utilização prática de um *cluster* para submissão de *jobs* e análise dos resultados.

Referências

- [1] George Bisbas et al. *Automated MPI code generation for scalable finite-difference solvers*. 2023. DOI: 10.48550/ARXIV.2312.13094. URL: <https://arxiv.org/abs/2312.13094>.
- [2] A. Brougois et al. “Marmousi, model and data”. Em: *EAGE Workshop - Practical Aspects of Seismic Data Inversion*. European Association of Geoscientists & Engineers, 1990. DOI: 10.3997/2214-4609.201411190. URL: <http://dx.doi.org/10.3997/2214-4609.201411190>.
- [3] Jessé Costa. *Aspectos da modelagem e inversão de dados sísmicos*. Mai. de 2021. URL: https://drive.google.com/file/d/1ADgEsG7681WC1Sd4d_UfhEcZXB3UFPPfb/view?pli=1.
- [4] Ehsan Jamali Hondori et al. “Full-Waveform Inversion for Imaging Faulted Structures: A Case Study from the Japan Trench Forearc Slope”. Em: *Pure and Applied Geophysics* 178.5 (abr. de 2021), pp. 1609–1630. ISSN: 1420-9136. DOI: 10.1007/s00024-021-02727-w. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00024-021-02727-w>.
- [5] L.F. Kallivokas et al. “Site characterization using full waveform inversion”. Em: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 47 (abr. de 2013), pp. 62–82. ISSN: 0267-7261. DOI: 10.1016/j.soildyn.2012.12.012. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.12.012>.
- [6] Gustavo Leite. *AWAVE introduction and Nsight profiling*. Jun. de 2020. URL: https://drive.google.com/file/d/1U0mbry__qAdbadCz4797ZZM82Gvr9KiD/view.
- [7] Hanyang Li et al. “Full-waveform inversion with adversarial losses via deep learning”. Em: *Journal of Applied Geophysics* 205 (out. de 2022), p. 104763. ISSN: 0926-9851. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2022.104763. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104763>.

- [8] Jiahang Li, Hitoshi Mikada e Junichi Takekawa. *Improved full-waveform inversion for seismic data in the presence of noise based on the K-support norm*. 2022. DOI: 10.48550/ARXIV.2212.07074. URL: <https://arxiv.org/abs/2212.07074>.
- [9] Bin Liu et al. “Deep-learning seismic full-waveform inversion for realistic structural models”. Em: *GEOPHYSICS* 86.1 (jan. de 2021), R31–R44. ISSN: 1942-2156. DOI: 10.1190/geo2019-0435.1. URL: <http://dx.doi.org/10.1190/geo2019-0435.1>.
- [10] M. Louboutin et al. “Devito (v3.1.0): an embedded domain-specific language for finite differences and geophysical exploration”. Em: *Geoscientific Model Development* 12.3 (2019), pp. 1165–1187. DOI: 10.5194/gmd-12-1165-2019. URL: <https://www.geosci-model-dev.net/12/1165/2019/>.
- [11] Mathias Louboutin et al. “Full-waveform inversion, Part 1: Forward modeling”. Em: *The Leading Edge* 36.12 (dez. de 2017), pp. 1033–1036. ISSN: 1938-3789. DOI: 10.1190/tle36121033.1. URL: <http://dx.doi.org/10.1190/tle36121033.1>.
- [12] Mathias Louboutin et al. “Full-waveform inversion, Part 2: Adjoint modeling”. Em: *The Leading Edge* 37.1 (jan. de 2018), pp. 69–72. ISSN: 1938-3789. DOI: 10.1190/tle37010069.1. URL: <http://dx.doi.org/10.1190/tle37010069.1>.
- [13] Mathias Louboutin et al. “Full-waveform inversion, Part 3: Optimization”. Em: *The Leading Edge* 37.2 (fev. de 2018), pp. 142–145. ISSN: 1938-3789. DOI: 10.1190/tle37020142.1. URL: <http://dx.doi.org/10.1190/tle37020142.1>.
- [14] Fabio Luporini et al. “Architecture and Performance of Devito, a System for Automated Stencil Computation”. Em: *ACM Trans. Math. Softw.* 46.1 (abr. de 2020). ISSN: 0098-3500. DOI: 10.1145/3374916. URL: <https://doi.org/10.1145/3374916>.
- [15] Fabio Luporini et al. *devitocodes/devito: v4.8.2*. 2023. DOI: 10.5281/ZENODO.8322938. URL: <https://zenodo.org/record/8322938>.
- [16] R. Gerhard Pratt. “Seismic waveform inversion in the frequency domain, Part 1: Theory and verification in a physical scale model”. Em: *GEOPHYSICS* 64.3 (mai. de 1999), pp. 888–901. ISSN: 1942-2156. DOI: 10.1190/1.1444597. URL: <http://dx.doi.org/10.1190/1.1444597>.
- [17] R. Gerhard Pratt e Richard M. Shipp. “Seismic waveform inversion in the frequency domain, Part 2: Fault delineation in sediments using crosshole data”. Em: *GEOPHYSICS* 64.3 (mai. de 1999), pp. 902–914. ISSN: 1942-2156. DOI: 10.1190/1.1444598. URL: <http://dx.doi.org/10.1190/1.1444598>.
- [18] Carla Santana et al. “Workload scheduling comparison in a full waveform inversion distributed memory implementation”. Em: *Proceedings of the 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society - Expogef*. 16cisbgf. Brazilian Geophysical Society, 2019. DOI: 10.22564/16cisbgf2019.223. URL: <http://dx.doi.org/10.22564/16cisbgf2019.223>.

- [19] Adeilton Rigaud Lucas Santos, Reynam Da Cruz Pestana e Gary Corey Aldunate. “Seismic imaging of high slope structures using one-way wave equation migration techniques”. Em: *Revista Brasileira de Geofísica* 33.1 (nov. de 2015), p. 71. ISSN: 0102-261X. DOI: 10.22564/rbgf.v33i1.602. URL: <http://dx.doi.org/10.22564/rbgf.v33i1.602>.
- [20] Peterson Nogueira Santos e Reynam C. Pestana. “Full waveform inversion using an efficient preconditioning method for the gradient vector applied for different source signatures”. Em: *Revista Brasileira de Geofísica* 34.3 (out. de 2016). ISSN: 0102-261X. DOI: 10.22564/rbgf.v34i3.857. URL: <http://dx.doi.org/10.22564/rbgf.v34i3.857>.
- [21] Allan da Silva Pinto. 2024. URL: <https://github.com/distributed-jax/devito-solvers>.
- [22] Albert Tarantola. “Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation”. Em: *GEOPHYSICS* 49.8 (ago. de 1984), pp. 1259–1266. ISSN: 1942-2156. DOI: 10.1190/1.1441754. URL: <http://dx.doi.org/10.1190/1.1441754>.
- [23] J. Virieux e S. Operto. “An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics”. Em: *GEOPHYSICS* 74.6 (nov. de 2009), WCC1–WCC26. ISSN: 1942-2156. DOI: 10.1190/1.3238367. URL: <http://dx.doi.org/10.1190/1.3238367>.
- [24] J. Virieux et al. “6. An introduction to full waveform inversion”. Em: *Encyclopedia of Exploration Geophysics*. Society of Exploration Geophysicists, jan. de 2014, R1–R1–40. DOI: 10.1190/1.9781560803027.entry6. URL: <http://dx.doi.org/10.1190/1.9781560803027.entry6>.
- [25] G. Yao et al. “Improved FWI Convergence Using Efficient Receiver-side Spatial Preconditioning Employing Ray Theory”. Em: *79th EAGE Conference and Exhibition 2017*. Paris2017. EAGE Publications BV, jun. de 2017. DOI: 10.3997/2214-4609.201701341. URL: <http://dx.doi.org/10.3997/2214-4609.201701341>.
- [26] Qili Zeng et al. “InversionNet3D: Efficient and Scalable Learning for 3-D Full-Waveform Inversion”. Em: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 60 (2022), pp. 1–16. ISSN: 1558-0644. DOI: 10.1109/tgrs.2021.3135354. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2021.3135354>.