LVI SBPO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
DE 04 ATÉ 07 NOVEMBRO 2024
FORTALEZA | CEARÁ

SSV Hints: Um *framework* de otimização interativa baseado na visualização do espaço de busca

Ennio W. L. Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins
Povoado Santa Teresa - Km 05, Zona Rural, Araguatins - TO, 77950-000
ennio.silva@ifto.edu.br

Hugo A. D. Nascimento, Humberto J. Longo, Juliana P. Felix
Universidade Federal de Goiás
Av. Esperança, Goiânia - GO, 74690-900
{hadn,longo,julianafelix}@ufg.br

RESUMO

A otimização interativa é uma abordagem poderosa e versátil para resolver problemas complexos e destaca-se por sua capacidade de envolver ativamente o usuário no processo de busca e decisão. Este artigo apresenta o *SSV Hints*, um *framework* generalista de otimização interativa baseado na visualização do espaço de busca. O *framework* proposto combina ações interativas e métodos computacionais que permitem aos usuários explorar as possíveis soluções, entender melhor o espaço de busca e encontrar uma solução adequada. Por meio de um estudo de caso, é demonstrada a aplicação prática do *SSV Hints* no problema de inversão sísmica, ilustrando como ele pode ser utilizado para explorar e analisar o espaço de busca interativamente. Além disso, são discutidas possíveis aplicações em outras áreas, bem como apresentadas sugestões para melhorias e expansões futuras.

PALAVRAS CHAVE. Otimização interativa, Visualização de Informação, Espaço de busca

ABSTRACT

Interactive optimization is a powerful and versatile approach to solving complex problems and stands out for its ability to involve the user in the search and decision process. This article presents *SSV Hints*, a generalist interactive optimization *framework* based on search space visualization. The proposed *framework* combines interactive actions and computational methods that allow users to explore possible solutions, better understand the search space and solve the desired problem. Through a case study, we demonstrate the practical application of *SSV Hints* to the seismic inversion problem, illustrating how it can be used to interactively explore and analyze the search space. Furthermore, we discuss possible applications of the *framework* in other areas, as well as suggestions for improvements and future expansions.

KEYWORDS. Interactive optimization, Information visualization, Search space.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193352
https://proceedings.science/p/193352?lang=pt-br

1. Introdução

Problemas de otimização do mundo real são comumente caracterizados por alta complexidade, envolvendo muitas variáveis, restrições e objetivos. De acordo com Cibulski et al. [2020], tais problemas podem ser influenciados por aspectos subjetivos, ou seja, critérios ou objetivos que são difíceis de serem modelados matematicamente e podem envolver preferências pessoais. Nesses casos, uma estratégia interessante para encontrar soluções em tempo computacional razoável é a combinação da interação humano-computador com algoritmos de otimização rápidos [Nascimento e Eades, 2005; Klau et al., 2010].

Por anos, a comunidade científica tem se dedicado ao estudo da otimização interativa para lidar com problemas altamente complexos. Segundo Cajot et al. [2019], a otimização interativa consiste em quatro componentes principais: um usuário, uma interface gráfica de usuário (GUI), um gerador de soluções e um analista ou tomador de decisão. Em uma fase preliminar, o usuário descreve o problema e os seus critérios, e o analista desenvolve o modelo. Dado o modelo, a fase de busca se inicia e, durante ela, o usuário requisita a geração de soluções através da interface. Normalmente, o processo começa gerando e apresentando uma ou várias soluções para que o usuário as possa explorar. Nessa etapa, o usuário pode interagir com as soluções expressando sua opinião por meio de interações com a GUI, que são usadas para direcionar os cálculos subsequentes para as áreas desejadas do espaço de busca. Esse processo se repete até que o usuário fique satisfeito com a solução encontrada.

Diversos estudos têm sido conduzidos apresentando sistemas ou *frameworks* aplicados a esse tipo de problema. Dentre os trabalhos existentes, destacam-se aqueles envolvendo problemas clássicos da computação, como o problema do caixeiro viajante e desenhos de grafos [Klau et al., 2002; do Nascimento e Eades, 2005], como também alguns que empregam jogos ou aprendizado de máquina para aplicações variadas [Holzinger et al., 2019]. Entretanto, as pesquisas reportadas na literatura que envolvem a participação humana no processo de otimização geralmente permitem a interação do usuário no aperfeiçoamento de uma única solução por vez, como é o caso de Klau et al. [2002]; do Nascimento e Eades [2005], ou de um conjunto reduzido de soluções que é gradativamente atualizado [Holzinger et al., 2019]. Uma alternativa explorada por outros autores consiste em ampliar essa interação, permitindo ao usuário ver e interagir com todo o espaço de busca do problema [Pu e Lalanne, 2000; Rafiq, 2012; Wesner, 2017; Cajot et al., 2019; Pan et al., 2020]. Isso ajuda o usuário a entender melhor a complexidade do problema e a identificar estratégias mais eficazes para resolvê-lo. Nesse contexto, as técnicas de visualização de informações têm se mostrado essenciais na representação e entendimento do espaço de solução.

Utilizando as vantagens propiciadas pelas técnicas de visualização de informação, Rafiq [2012] apresenta um sistema de otimização interativa que utiliza computação evolucionária para a resolução de um problema de design de barras de armadura para pilares biaxiais. O trabalho apresenta gráficos de dispersão bi e tridimensionais permitem ações interativas como rotação, zoom e seleção de soluções, possibilitando ao usuário obter detalhes e comparar soluções. Com o intuito de examinar uma superfície completa da função objetivo de instâncias do VRP (*Vehicle Routing Problem*) e do TSP (*Travelling Salesman Problem*), Rasku et al. [2013] construíram uma ferramenta de visualização do espaço de busca baseada na técnica *Multidimensional Scaling* (MDS). Já Wesner [2017] apresenta um método de otimização multiobjetivo que permite ao usuário selecionar as soluções de sua preferência utilizando gráficos de dispersão e diagramas de Venn. Cajot et al. [2019] propuseram uma metodologia de suporte à decisão aplicada a um problema de planejamento urbano, utilizando coordenadas paralelas e gráficos de dispersão em 3D para analisar os *trade-offs* das soluções obtidas. Mais recentemente, Park et al. [2021] apresentaram uma plataforma *web* de análise visual que simplifica o processo de ajuste de hiperparâmetros de redes neurais profundas,

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193352
https://proceedings.science/p/193352?lang=pt-br

utilizando técnicas de visualização como coordenadas paralelas e gráficos de dispersão para permitir aos usuários aperfeiçoar o espaço de busca.

Independente do tipo de interação propiciada pelas abordagens existentes, há uma predominância de trabalhos que focam em uma aplicação específica, sendo limitadas à interação com uma única solução, à quantidade de variáveis de decisão, ou na apresentação de interações voltadas a aspectos particulares do problema abordado. Verifica-se, assim, a necessidade de um *framework* que ofereça uma abordagem mais geral e flexível, capaz de ser adaptado a diferentes tipos de problemas e cenários. Neste sentido, o presente trabalho contribui com a área ao apresentar um *framework* generalista de otimização interativa, denominado *Search-Space Visualization Hints* (ou *SSV Hints*). A proposta do *SSV Hints* inova ao possibilitar o mapeamento e visualização do espaço de busca à medida que surgem novas soluções no processo de exploração. Inspirado no *framework User Hints*[do Nascimento e Eades, 2005], foram incorporadas ações interativas que permitem ao usuário criar novas soluções, compará-las, visualizá-las, e entender melhor a topologia do espaço de busca do problema estudado.

O restante deste trabalho está organizado como segue: na Seção 2, o *framework SSV Hints* é explanado. Na Seção 3, é apresentado um estudo de caso do uso do SSV Hints aplicado ao problema da Inversão Sísmica. Finalmente, na Seção 4, são feitas as considerações finais do trabalho, bem como sugeridos trabalhos futuros.

2. *SSV Hints*

Sob uma perspectiva de extensão do *framework User Hints* desenvolvido por do Nascimento e Eades [2005], o *SSV Hints*, *framework* proposto neste trabalho é ilustrado na Figura 1:

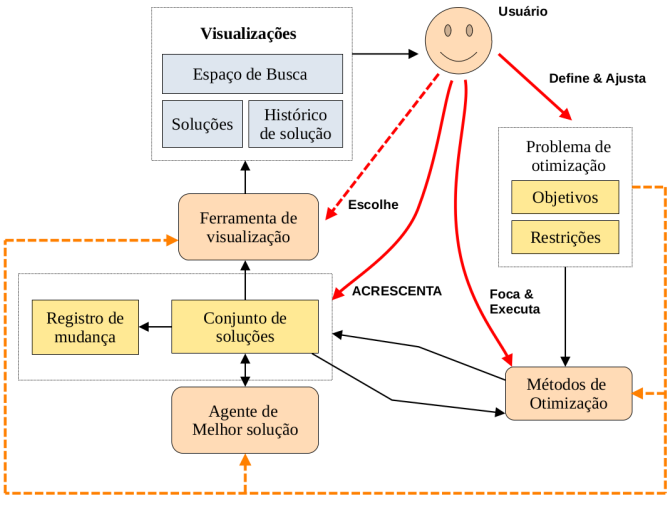


Figura 1: Estrutura do *SSV Hints*.

O *SSV Hints* é formado por 10 elementos: (1) um usuário que é especialista do domínio, (2) um conjunto de funções objetivo, (3) um conjunto de restrições, (4) um módulo com os métodos de otimização, (5) um conjunto de soluções (podendo ter soluções inviáveis) que é modificado a partir de ações interativas ou dos métodos de otimização, (6) um módulo de registro de mudança que é acionado a cada modificação no conjunto de soluções, (7) um conjunto de função de qualidade, (8) um agente de melhor solução, responsável por guardar a melhor solução ou o conjunto de soluções não-dominadas, (9) uma ferramenta de visualização encarregada de realizar por todo

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193352
https://proceedings.science/p/193352?lang=pt-br

o pipeline de construção da estrutura topológica do espaço de busca e (10) um módulo composto pela representação visual do espaço de busca, das soluções individualmente com seus detalhes e do histórico de criação das soluções.

Após a definição dos parâmetros, objetivos e restrições do problema, o processo de otimização segue-se:

(*i*) Um conjunto de soluções iniciais é gerado ou manualmente, pelo usuário, ou por métodos computacionais. Cada uma dessas soluções tem sua qualidade avaliada;

(*ii*) O agente de melhor solução é ativado: caso o problema seja mono-objetivo, ele guarda a melhor solução; no caso do problema ser multi-objetivo, uma ou mais soluções não-dominadas são armazenadas.

(*iii*) A ferramenta de visualização gera a estrutura topológica para representação visual do espaço de busca para o usuário, destacando a(s) melhor(es) solução(ões). Ele também produz visões focadas nas soluções e do histórico de sua criação.

(*iv*) O sistema espera as interações do usuário, que podem, de modo básico, se dá na forma de comunicação com todos os elementos do *framework*. Por exemplo, o usuário pode acionar um método de otimização para criar uma nova solução ou pode manualmente trabalhar sobre o conjunto de soluções para produzir novas. O desejável é que, mesmo que não representado na Figura 2, essa interação se dê por meio da manipulação direta das visualizações de informação criadas. Assim, a interação humana utiliza a ferramenta de visualização para entrada de dados como também a aciona para gerar *feedback*. Essa interação ocasiona ainda uma ação do agente de melhor solução quando a definição do problema ou o conjunto de soluções é modificado. As mudanças no conjunto de soluções refletem na modelagem e na representação visual do espaço de busca. É importante frisar também que toda alteração no conjunto de soluções deve ser anotada no registro de mudança, para fins de rastreamento da sua evolução temporal.

(*v*) A ação interativa do usuário pode ser repetida diversas vezes até que ele esteja satisfeito com as melhores soluções encontradas ou com o entendimento obtido do espaço de busca.

A seguir, são detalhadas as ações possíveis de serem executadas pelo usuário, e o funcionamento dos demais elementos do *framework*.

2.1. Ações interativas

Na representação do *SSV Hints* na Figura 1, é possível verificar, por meio das setas vermelhas, as ações interativas que o usuário pode realizar durante o processo de otimização, sendo elas:

Define & ajusta – permite o usuário alterar a função objetivo e adicionar/remover restrições. Desta forma, o usuário pode inserir conhecimentos de domínio do problema e explorar diferentes tipos de solução.

Foca & executa – 'focar' significa aplicar um método a partir de uma solução ou mais soluções do conjunto de soluções, produzindo novas soluções. Por outro lado, 'executar' significa escolher um algoritmo e parametrizá-lo de acordo com as preferências do usuário para a construção de novas soluções.

Acrescenta – conjunto de ações interativas que o usuário pode utilizar para criação e adição de soluções no Conjunto de Soluções e, consequentemente, a exploração do espaço de busca do problema a ser resolvido. As ações disponíveis são descritas a seguir.

- **Criação de soluções** – o usuário pode criar uma quantidade específica de soluções, parametrizando-as de acordo com sua preferência. Essa ação pode ser realizada na produção de soluções iniciais, e também durante o processo de otimização.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193352
https://proceedings.science/p/193352?lang=pt-br

- **Interpolação entre soluções** – consiste em gerar um conjunto de soluções intermediárias para pares de soluções selecionadas, o que pode ser realizado, por exemplo, por meio de uma interpolação linear dos valores de suas variáveis. Esse processo ajuda a entender a relação entre as variáveis e a qualidade da solução, na medida em que as primeiras mudam gradualmente. Além disso, a interpolação produz novas soluções que refinam o espaço de solução, trazendo mais clareza sobre a função objetivo.
- **Combinação linear entre soluções** – esta ação pode ser realizada entre duas ou mais soluções. Quando realizada, um parâmetro escalar pode ser definido para potencializar elementos de uma solução em detrimento de outra. Assim como a interpolação, a combinação linear entre soluções tem como objetivo explorar áreas do espaço ainda desconhecidas.

As ações de criação, interpolação e combinação entre soluções aqui descritas criam novas soluções e modificam o conjunto de soluções. Toda modificação realizada no conjunto de soluções gera um registro de mudança. Esse registro guarda a data/hora que a solução foi criada, qual o método e/ou ação gerou essa solução e, caso exista, as soluções utilizadas para a criação dessa nova solução. A ideia é permitir a rastreabilidade das soluções durante o processo iterativo e interativo da otimização. Nesse contexto, o agente de melhor solução será responsável por identificar, durante a criação de novas soluções, as soluções com melhor qualidade. Se o problema em questão for multiobjetivo, há a possibilidade de apresentar um conjunto de soluções não-dominadas.

Escolhe – o usuário pode interagir com a ferramenta e escolher uma forma diferente para visualizar ou obter mais detalhes a respeito do espaço ou das soluções nele contidas.

Dentre as interações possíveis, há ações interativas de baixo nível, filtragem de dados, e seleção de soluções ou regiões específicas. No que diz respeito às ações interativas de baixo nível, a aplicação de rotação e *zoom-in/out* são operações naturais em vários tipos de representação visual. Através dessas ações, permite-se que o usuário explore diferentes ângulos e escalas da visualização, desde uma visão geral de uma grande seção do espaço de soluções, até um nível de detalhe mais fino. Desta forma, possibilita-se a identificação de padrões ou estruturas desse espaço.

A filtragem de dados e a seleção de uma ou mais soluções e/ou de uma região do espaço fazem sentido tanto em uma visualização bi quanto tridimensional. O filtro, por exemplo, pode ser baseado na qualidade (valor da função objetivo) e ser implementado por meio de um *slider*, um controle deslizante que permita ao usuário ajustar um valor em um intervalo. Já o processo de seleção de uma ou mais soluções pode ser efetuado por meio de cliques com o ponteiro do *mouse* sob as representações das soluções, ocasionando a mudança de suas respectivas cores a fim de indicar a efetividade da ação.

A seleção de uma solução pode ser adotada também como base para as ações de alto nível, como obter e mostrar informações mais descritivas de uma solução ou para apoiar as ações de comparações. A obtenção de detalhes de uma solução mostra os valores das suas variáveis e como eles afetam a qualidade dessa solução, ao passo que a comparação entre duas ou mais soluções, apoiada pelo seu detalhamento, ajuda a identificar o que faz uma solução ter uma qualidade melhor ou pior do que outra. Juntas, essas ações contribuem para o entendimento do porquê de algumas soluções estarem longe ou próximas uma das outras no espaço de solução e o que faz com que elas tenham a qualidade apresentada, permitindo, assim, uma compreensão da topologia do espaço de solução. Isso possibilita também "imaginar" novas soluções para o problema, as quais levariam possivelmente para regiões ainda não mapeadas

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193352
https://proceedings.science/p/193352?lang=pt-br

do espaço de solução.

2.2. Funções de qualidade

Funções de qualidade fazem parte implicitamente do *framework* e são utilizadas para calcular o atendimento de uma solução aos objetivos e às restrições do problema de otimização. Soluções que violam mais restrições normalmente recebem uma qualidade inferior quando comparadas àquelas que não o fazem. Para soluções viáveis, a sua qualidade pode ser definida pelo objetivo do problema (quando mono-objetivo) ou pela relação de dominância entre os elementos do conjunto de soluções. O *SSV Hints* prevê que o usuário pode alterar a definição do problema de otimização em tempo de execução, o que faz com que a qualidade de todas as soluções já construídas deva ser recalculada quando isso acontecer.

2.3. Métodos de otimização

Diversos métodos de otimização podem ser adotados no *framework*, incluindo métodos que constroem soluções com base na definição do problema e métodos que criam novas soluções a partir da modificação de uma ou mais soluções já existes, indo de métodos exatos (possivelmente focados em uma subparte do problema) a métodos aproximativos, heurísticos ou meta-heurísticos. As novas soluções criadas são sempre acrescentadas ao conjunto de soluções e as tais modificações são anotadas no registro de modificação.

2.4. Ferramenta de visualização

A ferramenta de visualização é responsável por todo o *pipeline* que gera a representação visual do espaço de busca, o detalhamento de solução, bem como seu histórico (vindo do registro de mudanças). Dependendo da maneira de implementação do sistema interativo e/ou problema estudado, essas três visualizações podem ser realizadas de maneira conjunta ou separada. O histórico de solução pode ser usado, inclusive, para demonstrar como os métodos de otimização e a ação humana permitem navegar pelo espaço de busca, escapando de mínimos locais e explorando regiões promissoras.

Para construir a topologia do espaço de solução e sua visualização, é necessário seguir uma sequência de passos detalhada. Primeiro, deve-se determinar uma medida de distância entre as soluções (usando suas variáveis), o que pode variar de acordo com o tipo de problema. Em seguida, calcula-se a qualidade de cada solução com base na definição do problema, atribuindo um valor que reflete o seu desempenho ou adequação.

Para a visualização dessa topologia, se o problema envolver muitas variáveis, pode ser aplicada uma redução de dimensionalidade (utilizando técnicas como a Análise de Componentes Principais ou *t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding*), projetando as soluções em um plano ou espaço 3D de menor dimensão. O próximo passo é a normalização dos dados, ajustando todas as dimensões e medidas para uma escala que promova uma representação visual consistente e comparável. Por fim, pode ser realizada também uma interpolação espacial, como a *krigagem*, para gerar uma região contínua que represente uma possível distribuição das qualidades das soluções na região do espaço desconhecida. Essa interpolação, combinada com uma representação visual da qualidade usando cores ou o atributo de altura de marcas visuais (em visualizações 3D), oferece uma percepção intuitiva da possível topologia do espaço de solução.

Assim, uma sequência de passos para a construção da topologia do espaço de solução para sua visualização pode ser: (1) cálculo da diferença entre as soluções, (2) cálculo da qualidade de cada solução, (3) redução de dimensionalidade, (4) normalização ou escalonamento, e (5) interpolação espacial.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193352
https://proceedings.science/p/193352?lang=pt-br

3. Estudo de caso

Para demonstração prática do *framework SSV Hints*, uma implementação dele foi realizada focada na resolução de problemas de inversão sísmica. Nesta seção, são apresentados os principais conceitos para entendimento desse problema e o sistema criado com base no *framework*, denominado *Seismic Inversion Hints*.

3.1. O Problema da Inversão Sísmica

Um dos principais desafios da indústria de petróleo e gás é a exploração de novos campos de hidrocarboneto e, por isso, vários métodos são empregados no estudo do subsolo terrestre com objetivos de analisar a viabilidade da exploração estimando os potenciais reservatórios, projetar a perfuração de poços e melhorar a produção dos reservatórios [Medeiros, 2005; Rocha, 2013].

Neste contexto, o método de reflexão sísmica tem sido amplamente empregado devido à sua capacidade de gerar uma imagem da subsuperfície [Revelo et al., 2018]. A técnica básica consiste em gerar ondas sísmicas por meio de explosivos, canhões de ar comprimido ou outra fonte sísmica e coletar as reflexões associadas às diversas interfaces em subsuperfície (refletores) usando receptores geofones ou hidrofones. O conjunto de dados obtidos é formado pelo tempo que cada onda levou entre a fonte e a captação pelos receptores e a sua respectiva amplitude. Os tempos de chegada de cada reflexão são relacionados às velocidades de propagação da onda em cada camada; a amplitude, por sua vez, está associada ao contraste de impedância acústica [Matos, 2004]. Juntamente com outros dados geofísicos, os dados sísmicos podem fornecer informações sobre a estrutura e a distribuição dos tipos de rocha, permitindo o imageamento da subsuperfície analisada na forma de modelos de velocidade, entre outros tipos de dados. De modo geral, este é o processo da Inversão Sísmica: transformar os dados sísmicos em parâmetros que permitam modelar as estruturas de uma subsuperfície [Rocha, 2013].

O problema de inversão sísmica caracteriza-se por ser contínuo, malposto e complexo, dada sua elevada quantidade de variáveis (alta dimensionalidade) e ausência de todas as informações necessárias para se encontrar com exatidão a estrutura da subsuperfície Revelo et al. [2018]; Siqueira et al. [2019]. Vários métodos já foram propostos na literatura para tratar da inversão sísmica, com destaque ao método de inversão da forma de onda completa (FWI, do inglês, *Full-Waveform Inversion*). Proposto por Tarantola [1984], o FWI tem como objetivo a obtenção de um modelo de velocidade (ou um par de modelos de velocidade e de densidade) que seja o mais próximo possível do real. Ele se constitui de um processo iterativo de minimização do erro entre os dados obtidos a partir da simulação do problema de propagação de onda (dados sintéticos) e os dados experimentais (dados observados). Em síntese, o FWI adota uma otimização não linear, multidimensional e que demanda elevado custo computacional. Conforme ilustra o fluxograma na Figura 2, o processo de inversão sísmica geralmente se inicia com a aquisição de dados sísmicos e a geração de um sismograma observado. Em seguida, constrói-se um modelo de velocidade inicial que passará por uma modelagem direta, a qual permitirá a obtenção de um sismograma calculado. É, então, realizada a comparação entre o sismograma observado e o sismograma calculado. A diferença entre esses sismogramas refere-se à medida de *desajuste* (ou, no inglês, de*misfit*) do modelo avaliado e evidencia a qualidade da solução representada por esse modelo.

Há diversas maneiras de se calcular o desajuste, sendo uma baseada na Norma L2, expressa na Equação (1), a mais comumente utilizada.

$$\Phi = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\left(d_i^{\text{observado}} - d_i^{\text{calculado}}\right)^2, \tag{1}$$

onde Φ é a função de *misfit*, $d_i^{\text{observado}}$ e $d_i^{\text{calculado}}$ são os dados dos sismogramas observados e calculados, respectivamente, no ponto i, e n é o número total de pontos de dados. Após o cálculo do

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193352
https://proceedings.science/p/193352?lang=pt-br

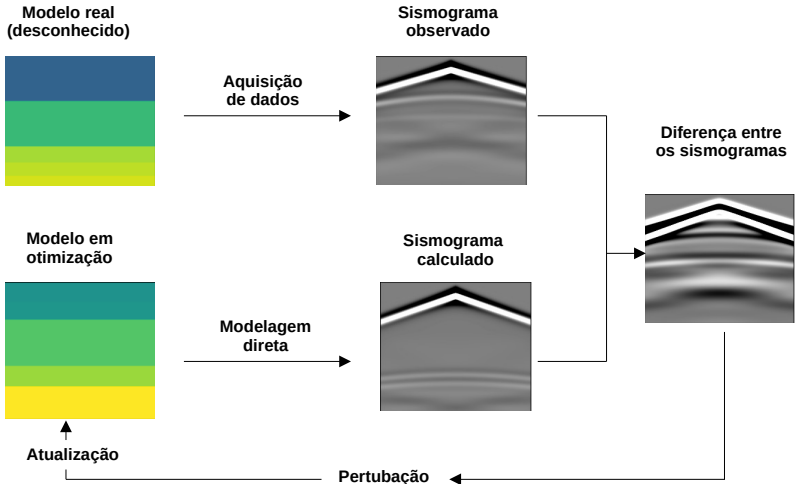


Figura 2: Processo iterativo do FWI.

desajuste, realiza-se uma modificação/atualização no modelo em otimização, e o processo continua até que o desajuste atinja o valor mínimo determinado pelo algoritmo de otimização.

Há, essencialmente, duas categorias de métodos para a solução deste problema: os métodos determinísticos e os estocásticos. Os métodos determinísticos, tradicionalmente, utilizam técnicas baseadas em derivadas para otimizar a função objetivo, o que demanda um alto custo computacional[1] e apresenta precisão limitada a mínimos locais. Estes métodos são interessantes, pois convergem rapidamente para um mínimo. Entretanto, ele precisam de um modelo inicial de boa qualidade para encontrar o mínimo global. Os métodos estocásticos, por sua vez, efetuam buscas no espaço global de modelos e, por isso, podem estimar um bom modelo mesmo sem ter uma estimativa inicial próxima ao mínimo global. Por outro lado, essa abordagem necessita geralmente de muitas iterações para convergência, fato que dificulta sua aplicação em inversões com muitos parâmetros.

3.2. Seismic Inversion Hints

O sistema *Seismic Inversion Hints* foi implementado em Python na versão 3.8 com auxílio da biblioteca Pyside 6 para a construção da interface de usuário e da API Devito desenvolvida por Louboutin et al. [2019] para realização de operações voltadas ao problema de inversão sísmica em uma abordagem de modelos de velocidade em camadas. A tela principal do sistema, ilustrada na Figura 3, é dividida em 4 partes: (1) Barra de ferramentas, (2) Espaço de Solução, (3) Estrutura da solução e (4) Detalhes do projeto e solução.

A barra de ferramentas (1) do sistema possui botões que possibilitam as ações interativas para criação de soluções, interpolação e combinação linear entre soluções, comparação entre soluções, análise de qualidade das soluções geradas na interpolação e troca da método de construção de estrutura topológica.

O espaço de solução (2) é a representação visual da estrutura topológica delineada pela ferramenta de visualização. Os pontos azuis simbolizam as soluções, o(s) ponto(s) em amarelo representa(m) a(s) melhor(es) solução(ões) e o(s) ponto(s) vermelho(s) representa(m) a(s) solução(ões) em destaque para obtenção de detalhes ou realização de alguma ação interativa. Para a construção deste espaço, o sistema permite a utilização de duas medidas de distância: uma baseada na diferença

[1]Métodos baseados em derivadas comumente realizam uma modelagem direta seguida de uma modelagem inversa que retro-propaga erros, integrando então os dois resultados. Isso significa que eles precisam guardar o campo de propagação de onda no tempo (o que consumir na casa de Terabytes para matrizes 3D de dimensão grande) ou têm que recalcular alguns desses campos de onda em tempo de execução.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193352
https://proceedings.science/p/193352?lang=pt-br

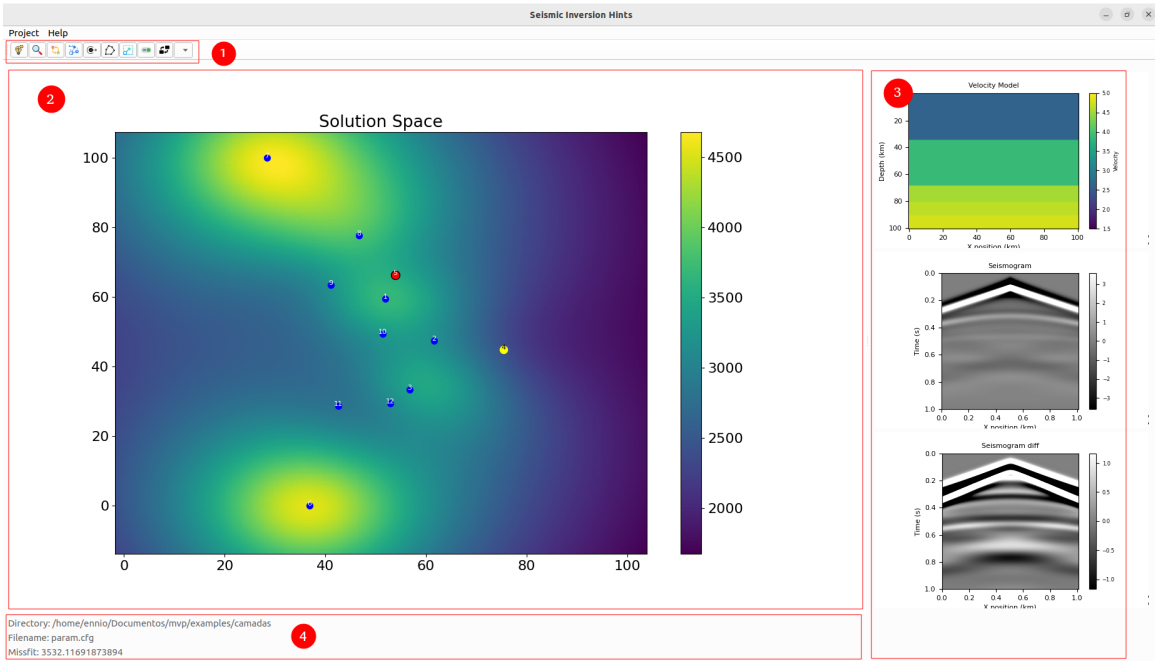


Figura 3: Tela principal - *Seismic Inversion Hints*.

entre os modelos de velocidade e outra baseada na diferença entre os sismogramas. A distância é computada pelo módulo da diferença ponto a ponto, seja sobre o modelo ou sismograma. A matriz de diferença serve como entrada para um método de redução de dimensionalidade que nos permite compreender mais facilmente a relação de distância entre as soluções. A técnica utilizada no *Seismic Inversion Hints* é o PCA e os valores obtidos nesse processo são normalizados antes da renderização. O espaço por sua vez é interpolado através da técnica de krigagem, que leva em consideração a qualidade das soluções nele contidas. As áreas mais escuras do espaço representam regiões que podem conter soluções com um *misfit* menor. Por outro lado, as áreas mais claras representam regiões com um *misfit* maior. O fato é, que por se tratar de um problema de minimização, na inversão sísmica o objetivo é encontrar soluções com o menor *misfit* possível e por isso as regiões escuras neste problema são mais promissoras.

A estrutura da solução (3) é ilustrada através da apresentação do modelo de velocidade, sismograma e a diferença do sismograma calculado para o sismograma observado. Essa seção permite ao usuário verificar as soluções de maneira visual e analisar o qual distante estão da solução ideal. Por último, nos detalhes do projeto e da solução (4), existem informações referentes do arquivo de configuração do projeto, bem como da qualidade e histórico da solução selecionada.

Tendo feito essa explanação geral do sistema, é importante detalhar a maneira com as ações interativas são realizadas. A primeira delas diz respeito à possibilidade do usuário realizar importação de um arquivo de configuração que traz detalhes a respeito dos objetivos e restrições do problema.

Para a criação das soluções iniciais, ação incluída dentro de ACRESCENTA, o usuário pode importar automaticamente a partir de um projeto criado anteriormente, ou pode adicioná-las manualmente por intermédio de um formulário. O formulário permite ao usuário escolher o tipo de solução que deseja criar, a quantidade de soluções e camadas (caso, o tipo de solução seja em camadas) e os parâmetros de velocidade mínima e máxima para o modelo de velocidade. A criação

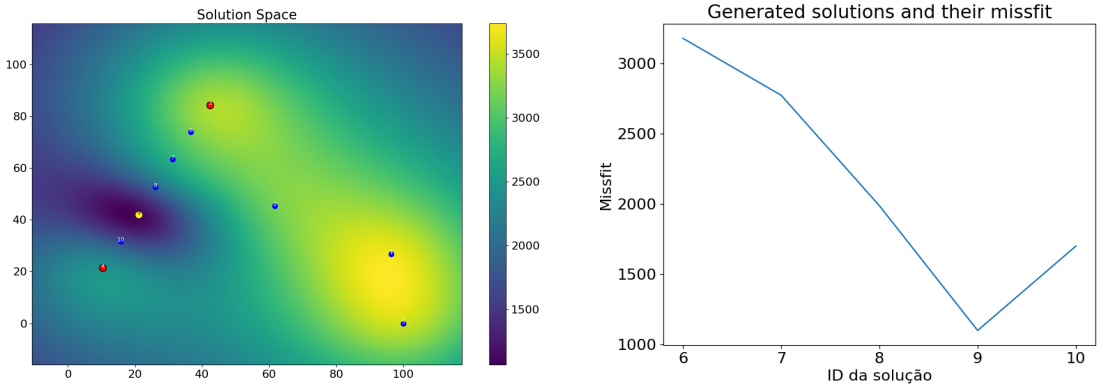
DOI: 10.59254/sbpo-2024-193352
https://proceedings.science/p/193352?lang=pt-br

das soluções impactam diretamente o conjunto de soluções e consequentemente a renderização por parte da Ferramenta de Visualização, que atualiza o espaço de busca. No que diz respeito a visualização do espaço de solução em si, há possibilidade a aplicação de *zoom-in/out* através do *scroll* do mouse. Essa ação permite ao usuário ampliar ou reduzir a área de visualização.

A partir da criação das soluções iniciais, o usuário pode então escolher algumas ações interativas. Para a comparação entre duas ou mais soluções, por exemplo, o usuário pode selecionar as soluções pressionando a tecla CRTL, clicando nas soluções desejadas e posteriormente no botão da barra de ferramentas que realiza essa operação. A visualização gerada permite ao usuário entender as diferenças entre os modelos de velocidade e tomar decisões com base nessa análise.

Outras ações interativas que o usuário pode escolher, são as operações de interpolação e combinação linear. No sistema, essas ações são divididas, sendo realizadas de forma separadas, porém possuem o mesmo parâmetro de entrada que é a quantidade de soluções que se deseja gerar. Uma vez realizada, essa operação possibilita o refinamento do espaço nessa determinada região e permite ao usuário analisar a variação da qualidade das soluções geradas. Na Figura 4 é ilustrado o resultado da interpolação entre duas soluções (3 e 4), e o gráfico que mostra a variação de *misfit* das 5 soluções geradas a partir dessa ação interativa. É possível notar que esse processo gerou uma solução nova que possui uma melhor qualidade, destacada em amarelo, denotando o papel do Agente de Melhor solução na identificação da melhor solução. É importante frisar aqui a atualização no conjunto de solução e como essa atualização impacta a visualização do espaço e também o registro de mudanças. Dentre outras ações interativas que o usuário pode realizar no *Seismic Inversion Hints* está a escolha da construção topológica a ser realizada na Ferramenta de visualização, que consiste em escolher a construção da matriz de diferenças entre soluções baseada no modelo de velocidade ou sismograma, e a possibilidade aplicar o método de otimização baseado em gradiente a partir de uma solução desejada.

O *Seismic Inversion Hints* apresenta-se como um sistema que implementa as ideias contidas no *framework SSV Hints* sob um problema contínuo. Uma característica interessante do *framework* proposto é a flexibilidade para aplicação em diversos problemas, sejam contínuos ou discretos. Outras áreas que podem se beneficiar da utilização desse *framework* estão relacionadas à logística, incluindo problemas discretos como o Problema do Caixeiro Viajante (TSP), o Problema de Roteamento de Veículos com Capacidades (CVRP), e a Programação de Horários (*Timetabling*).



(a) Inteporlação linear entre duas soluções.

(b) Variação de misfit das soluções obtidas.

Figura 4: Resultado de uma interpolação linear entre duas soluções.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193352
https://proceedings.science/p/193352?lang=pt-br

4. Conclusão

O objetivo deste estudo foi apresentar o *framework SSV Hints* como uma alternativa para otimização interativa baseada na visualização do espaço de solução. Através de um estudo de caso no contexto da inversão sísmica, pretendeu-se ilustrar como a combinação de visualização de informação, ações interativas e métodos computacionais pode facilitar a exploração e análise do espaço de solução de um problema de otimização. A aplicação prática apresentada por meio do sistema denominado *Seismic Inversion Hints* permite aos usuários não apenas navegar pelo espaço de busca, mas também entender as nuances das possíveis soluções. A interação direta com o sistema possibilita uma melhor compreensão do espaço e possíveis soluções, o que é crucial para resolver problemas de alta complexidade.

O *framework* foi construído sob uma abordagem generalista, mas demonstrado em um único estudo de caso. Embora isso forneça uma prova de conceito, é importante avaliar a aplicabilidade do *SSV Hints* a outras áreas, uma vez que a complexidade dos problemas pode variar significativamente entre diferentes domínios, o que pode exigir adaptações no *framework*.

Para futuras pesquisas, pretende-se explorar a aplicação do *SSV Hints* em outros campos, como bioinformática, engenharia, transporte e logística, para validar sua versatilidade e identificar possíveis ajustes necessários. Adicionalmente, estudos focados na usabilidade do *framework* e na experiência do usuário poderiam fornecer *insights* valiosos para melhorias. A integração de técnicas de aprendizado de máquina para aprimorar as sugestões interativas e a personalização do sistema com base no perfil do usuário também são caminhos promissores para expandir a aplicabilidade e eficácia do *SSV Hints*.

Referências

Cajot, S., Schüler, N., Peter, M., Koch, A., e Maréchal, F. (2019). Interactive optimization with parallel coordinates: Exploring multidimensional spaces for decision support. *Frontiers in ICT*, 5. ISSN 2297-198X. URL https://doi.org/10.3389/fict.2018.00032.

Cibulski, L., Mitterhofer, H., May, T., e Kohlhammer, J. (2020). Paved: Pareto front visualization for engineering design. *Computer Graphics Forum*, 39(3):405–416. URL https://doi.org/10.1111/cgf.13990.

do Nascimento, H. A. e Eades, P. (2005). User Hints: a framework for interactive optimization. *Future Generation Computer Systems*, 21(7):1177–1191. ISSN 0167-739X. URL https://doi.org/10.1016/j.future.2004.04.005.

Holzinger, A., Plass, M., Holzinger, K., Kickmeier-Rust, M., Crişan, G. C., Pintea, C.-M., e Palade, V. (2019). Interactive machine learning: experimental evidence for the human in the algorithmic loop. *The International Journal of Research on Intelligent Systems for Real Life Complex Problems*. URL https://doi.org/10.1007/s10489-018-1361-5.

Klau, G. W., Lesh, N., Marks, J., e Mitzenmacher, M. (2010). Human-guided search. *J. Heuristics*, 16(3):289–310. URL https://doi.org/10.1007/s10732-009-9107-5.

Klau, G. W., Lesh, N., Marks, J., Mitzenmacher, M., e Schafer, G. T. (2002). The HuGS platform: a toolkit for interactive optimization. In *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, AVI '02, p. 324—-330, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery. URL https://doi.org/10.1145/1556262.1556314.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193352
https://proceedings.science/p/193352?lang=pt-br

Louboutin, M., Lange, M., Luporini, F., Kukreja, N., Witte, P. A., Herrmann, F. J., Velesko, P., e Gorman, G. J. (2019). Devito (v3.1.0): an embedded domain-specific language for finite differences and geophysical exploration. *Geoscientific Model Development*, 12(3):1165–1187. URL 10.5194/gmd-12-1165-2019.

Matos, M. C. d. (2004). *Reconhecimento de Padrões Sísmicos Utilizando Análises Tempo-Frequência*. Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Medeiros, S. C. D. (2005). *Inversão de Parâmetros em Dados Sísmicos por Algoritmos Genéticos*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Nascimento, H. A. e Eades, P. (2005). User hints: a framework for interactive optimization. *Future Generation Computer Systems*, 21(7):1177–1191. ISSN 0167-739X. URL https://doi.org/10.1016/j.future.2004.04.005.

Pan, W., Sun, Y., Turrin, M., Louter, C., e Sariyildiz, S. (2020). Design exploration of quantitative performance and geometry typology for indoor arena based on self-organizing map and multi-layered perceptron neural network. *Automation in Construction*, 114:103163. ISSN 0926-5805. URL https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103163.

Park, H., Nam, Y., Kim, J.-H., e Choo, J. (2021). Hypertendril: Visual analytics for user-driven hyperparameter optimization of deep neural networks. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27(2):1407–1416. URL 10.1109/TVCG.2020.3030380.

Pu, P. e Lalanne, D. (2000). Interactive problem solving via algorithm visualization. In *IEEE Symposium on Information Visualization 2000. INFOVIS 2000. Proceedings*, p. 145–153. URL https://doi.org/10.1109/INFVIS.2000.885103.

Rafiq, Y. (2012). *A Practical Approach to Optimum Biaxial Column Design and Detailing Using Evolutionary Computing*, p. 2073–2083. American Society of Civil Engineers. URL 10.1061/9780784412367.182.

Rasku, J., Kärkkäinen, T., e Hotokka, P. (2013). Solution Space Visualization as a Tool for Vehicle Routing Algorithm Development. In *Proceedings of the Finnish operations research society 40th anniversary workshop (FORS40)*, volume 13, p. 9–12.

Revelo, D. E., Santos, R. S., e Ladino, O. M. (2018). FWI estocástico: Inversão da forma de onda com os métodos GA e PSO. *VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salinópolis*.

Rocha, M. S. Q. (2013). *Inversão do Traço Sísmico: O método e sua aplicação em Amberjack, Golfo do México*. Tese de Doutorado, Universidade Federal Fluminense.

Siqueira, R. L., Di Bartolo, L., e de Souza, B. (2019). Um tutorial de implementação da FWI e avaliação da influência do uso da diagonal da pseudo-hessiana. *16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*.

Tarantola, A. (1984). Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation. *Geophysics*, 49(8):1259–1266. ISSN 0016-8033. URL https://doi.org/10.1190/1.1441754.

Wesner, N. (2017). Multi-objective optimization via visualization. *Economics Bulletin*, 37(2): 1226–1233.

DOI: 10.59254/sbpo-2024-193352
https://proceedings.science/p/193352?lang=pt-br