



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE ENSINO SUPERIOR DO SERIDÓ
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO E TECNOLOGIA
BACHARELADO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO



Inversão de dados em eletorresistividade 1D usando o algoritmo de otimização global *Harris Hawks (HHO)*

Thâmerson Tomé Filgueiras Dutra

Caicó-RN
Dezembro de 2022

Thâmerson Tomé Filgueiras Dutra

Inversão de dados em eletrorresistividade 1D usando o algoritmo de otimização global *Harris Hawks (HHO)*

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Sistemas de Informação do Departamento de Computação e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Sistemas e Computação.

Orientador

Prof. Dr. Francisco Márcio Barboza

BSI – BACHARELADO DE SISTEMAS E INFORMAÇÃO
DCT – DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO E TECNOLOGIA
CERES – CENTRO ENSINO SUPERIOR DO SERIDÓ
UFRN – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

Caicó-RN

Dezembro de 2022

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Sistema de Bibliotecas - SISBI

Catálogo de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Setorial Prof^a. Maria Lúcia da Costa Bezerra - -CERES- - Caicó

Dutra, Thamerson Tome Filgueiras.

Inversão de dados em eletrorresistividade 1D usando o algoritmo de otimização global Harris Hawks (HHO) / Thamerson Tome Filgueiras Dutra. - Caicó, 2022.

40 f.: il.

Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Ensino Superior do Seridó. Departamento de Computação e Tecnologia. Bacharelado em Sistemas de informação.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Márcio Barboza.

1. Eletrorresistividade. 2. Inversão. 3. Harris Hawks. 4. Otimização Global. I. Barboza, Francisco Márcio. II. Título.

RN/UF/BS-CERES

CDU 004:621.3.011.22

Trabalho de conclusão de curso sob o título *Inversão de dados em eletrorresistividade 1D usando o algoritmo de otimização global Harris Hawks (HHO)* apresentada por Thâmerston Tomé Filgueiras Dutra e aceita pelo Bacharelado em Sistemas de Informação do Departamento de Computação e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, sendo aprovada por todos os membros da banca examinadora abaixo especificada:

Prof. Dr. Francisco Márcio Barboza
Presidente

DIMAp – Departamento de Informática e Matemática Aplicada
UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Renato Ramos Silva
Examinador

DG – Departamento de Geofísica
UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Msc. Jerbeson de Melo Santana
Examinador
PETROBRAS

Caicó-RN, 19 de Dezembro de 2022.

Inversão de dados em eletrorresistividade 1D usando o algoritmo de otimização global *Harris Hawks (HHO)*

Autor: Thâmerson Tomé Filgueiras Dutra

Orientador(a): Prof. Dr. Francisco Márcio Barboza

RESUMO

O problema de inversão (1D) em eletrorresistividade será tratado usando algoritmo de otimização global Harris Hawks(HHO), nas últimas duas décadas, os métodos de otimização global estão se tornando mais populares na geofísica, pois não requerem informações de gradiente e nenhum modelo inicial para obter um bom resultado para inferir características da distribuição de resistividade do subsolo. Neste trabalho, implementamos um algoritmo de otimização de Harris Hawks (HHO) que simula o comportamento de caça dos gaviões da espécie *Parabuteo unicinctus*, também conhecido como Falcão de Harris. Para demonstrar o funcionamento do HHO, foi testado em dados sintéticos com 5% de ruído gaussiano e dados reais. Os resultados obtidos se mostram aceitáveis e o algoritmo demonstrou ser robusto para a resolução do problema.

Palavras-chave: Eletrorresistividade, Inversão, Harris Hawks, Otimização Global.

Data inversion in 1D resistivity using Harris Hawks global optimization algorithm

Author: Thâmerison Tomé Filgueiras Dutra

Supervisor: Prof. Dr. Francisco Márcio Barboza

ABSTRACT

The problem of inversion (1D) in electroresistivity will be treated using Harris Hawks global optimization algorithm (HHO), in the last two decades, global optimization methods are becoming more popular in geophysics as they do not require gradient information and no initial model to obtain a good result for inferring characteristics of the underground resistivity distribution. In this work, we implemented a Harris Hawks optimization (HHO) algorithm that simulates the hunting behavior of hawks of the species *Parabuteo unicinctus*, also known as Harris's Hawk. To demonstrate how HHO works, it was tested on synthetic data with 5% of Gaussian noise and real data. The obtained results are acceptable and the algorithm proved to be robust for solving the problem.

Keywords: Electroresistivity, Harris-Hawks, Global Optimization.

Lista de figuras

1	Parâmetros usados para definição de resistividade	p. 13
2	Aplicação do método da eletroresistividade.	p. 14
3	Aplicação do método da eletroresistividade.	p. 15
4	Ataque surpresa	p. 17
5	Fases HHO.	p. 18
6	Comportamento de E durante duas execuções e 500 iterações.	p. 20
7	Exemplo de vetores globais no caso de cerco suave com mergulhos rápidos progressivos.	p. 23
8	Curva de ajuste médio, percebe-se que os pontos vermelhos corresponde a resistividade aparente observada, logo a linha azul representa a resistividade obtida na inversão, ajustando quase perfeitamente na média de 10 inversões.	p. 26
9	Modelo obtido a partir da inversão de resistividade da SEV usando o HHO. A linha tracejada em vermelho é referente ao modelo estimado, já a linha continua de cor azul é o modelo verdadeiro.	p. 27
10	Curva de convergência do HHO.	p. 28
11	Curva de ajuste médio do modelo 2, logo acima os pontos vermelhos são referentes a resistividade aparente observada, a linha de cor azul indica a resistividade aparente calculada.	p. 30
12	Modelo obtido através da inversão de uma SEV de 4 camadas usando o HHO, percebe-se que a linha tracejada de cor vermelha indica o modelo estimado, já a linha sólida de cor azul refere-se ao modelo verdadeiro.	p. 31
13	Curva de convergência.	p. 32

14	Curva de ajuste médio de dados reais, os pontos vermelhos indicam a resistividade aparente observada, já a linha de cor azul refere-se a resistividade calculada.	p. 34
15	Gráfico de Camadas do dado real, a linha azul indica as camadas e suas resistividades.	p. 35
16	Curva de convergência de uma inversão típica do dado real.	p. 36

Sumário

1	Introdução	p. 10
1.1	Objetivos da pesquisa	p. 11
1.1.1	Objetivo Geral	p. 11
1.1.2	Objetivos Específicos	p. 11
1.2	Organização do trabalho	p. 12
2	Revisão da literatura	p. 13
2.1	Eletorresistividade	p. 13
2.2	Modelagem em eletorresistividade 1D	p. 14
2.3	Inversão	p. 15
2.3.1	Inversão em eletorresistividade 1D	p. 16
2.4	Harris Hawks Optimization (HHO)	p. 17
2.4.1	Fase de Exploração.	p. 18
2.4.2	Transição de Exploração para Exploração.	p. 19
2.4.3	Fase de Exploração.	p. 20
2.4.3.1	Cerco fácil	p. 21
2.4.3.2	Cerco difícil	p. 21
2.4.3.3	Cerco fácil com mergulhos rápidos progressivos	p. 21
2.4.3.4	Cerco difícil com mergulhos rápidos progressivos	p. 23
2.4.4	Pseudocódigo do (HHO)	p. 24
3	Resultados e discussões	p. 25

3.0.1	Modelo 1	p. 25
3.0.2	Modelo 2	p. 28
3.0.3	Dados reais	p. 32
4	Conclusão	p. 37
	Referências	p. 38

1 Introdução

A inversão é a técnica mais utilizada para a interpretação dos dados de campo e para a simulação da resposta que determinado método tem em uma área de estudo. Na inversão estima-se os parâmetros do modelo, empregando-se uma relação teórica que busca o modelo de camadas que melhor se ajusta aos dados de campo. No caso do método eletrorresistivo o objetivo é estimar a estrutura geolétrica da subsuperfície na qual se acha a distribuição da resistividade em função da profundidade. A inversão segue o seguinte princípio: com os dados observados em campo e a formulação do fenômeno físico relacionados a esses dados é obtida a propriedade física da Terra desejada. No caso do método eletrorresistivo, os dados observados são resistividades aparente.

Muitos problemas do mundo real usam abordagens convencionais de programação matemática, como gradiente conjugado, programação quadrática sequencial, métodos mais rápidos e quase-Newton. Vários tipos de pesquisa verificaram que esses métodos não são eficientes com muitos problemas não contínuos e problemas não diferenciáveis multimodais do mundo real. Assim, algoritmos metaheurísticos foram projetados e utilizados para resolver muitos problemas como solucionadores alternativos competitivos, por ser simples e de fácil implementação. No entanto, a falha comum para a maioria dos algoritmos metaheurísticos é que eles geralmente mostram uma sensibilidade delicada ao ajuste de parâmetros definidos pelo usuário. Outra desvantagem é que os algoritmos metaheurísticos nem sempre podem convergir para o ótimo global.

Pode-se classificar as técnicas meta-heurísticas em quatro grupos principais. Algoritmos evolutivos, algoritmos baseados em física, baseados em humanos e algoritmos de inteligência de enxame (SI). Os algoritmos SI imitam os comportamentos sociais de organismos que vivem em enxames ou bandos. Temos como exemplo o comportamento de bando das aves que por sua vez é a principal inspiração da Otimização de Enxame de Partículas (PSO) proposta por (EBERHART RUSSELL E KENNEDY, 1995).

O principal objetivo dos algoritmos meta-heurísticos é resolver um problema não linear

empregando uma abordagem de busca global que investiga todo o espaço de parâmetros multidimensional, procurando parâmetros de modelo ótimos que minimizem uma função objetivo e forneçam um bom ajuste ao dados observado. Alguns autores utilizaram inversão em eletorresistividade a partir de algoritmos globais, como: Algoritmo Genético abordado por (CHUNDURU et al., 1995), Particle Swarm Optimization (PSO) (MARTÍNEZ et al., 2010), diferentes versões do Simulated Annealing estudado por (KIRKPATRICK; JR; VECCHI, 1983; CHUNDURU; SEN; STOFFA, 1996), Neighborhood Algorithm (NA) desenvolvido por (SAMBRIDGE, 1999) e a técnica de Monte Carlo aprimorado desenvolvido por (PIATTI et al., 2010).

Neste trabalho foi implementado e abordado os aspectos práticos do *Harris Hawks Optimization Algorithm* (HHO), que por sua vez não foi utilizado ainda para inversão em eletorresistividade 1D, ele se demonstrou eficiente e confiável para determinar os parâmetros da camada de subsuperfície a partir dos dados observados.

1.1 Objetivos da pesquisa

Esta seção contempla os objetivos gerais e específicos do trabalho realizado.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é contribuir para a resolução e interpretação de problemas Inversos 1D em eletorresistividade com uso do HHO.

1.1.2 Objetivos Específicos

Entre os objetivos específicos buscados no estudo podem ser citados:

- Desenvolver e implementar algoritmos para solução do problema inverso em eletorresistividade 1D usando o algoritmo HHO;
- Aplicação do algoritmo de inversão em diferentes dados sintéticos acrescentando ruído;
- Aplicação do algoritmo de inversão em dados reais.

1.2 Organização do trabalho

Neste texto, no capítulo 2 apresenta brevemente o embasamento teórico e metodologia utilizada para este trabalho (Eletrorresistividade, Problema Inverso, HHO). Logo adiante no capítulo 3 temos os resultados e discussões onde é mostrado os modelos usados e os resultados das inversões dos mesmos. No capítulo 4 se conclui o trabalho, apresentando as discussões finais do trabalho em si.

2 Revisão da literatura

2.1 Eletorresistividade

A resistividade de um material é atribuída como resistência, que por sua vez é dado em ohms. Para um cilindro condutor de resistência δR , comprimento δL e área de seção transversal δA , a resistividade ρ é dada por:

$$\rho = \frac{\delta R \delta A}{\delta L} \quad (2.1)$$

A unidade no SI da resistividade é o ohm-metro (ohmm) e o contrario da resistividade é chamada de condutividade.

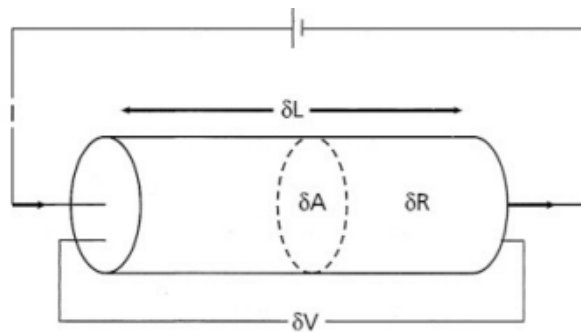


Figura 1: Parâmetros usados para definição de resistividade

. Fonte: (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002)

A resistividade é uma propriedade muito volátil, por isso a maioria dos minerais encontrados em rochas é isolante, sendo assim a corrente elétrica é conduzida através de uma rocha pela passagem de íons de água nos poros fazendo com que maior parte das rochas conduza eletricidade.

No método de eletorresistividade as correntes elétricas são geradas artificialmente e introduzidas no solo, com isso as diferenças de potencial geradas são medidas na superfície. A diferença de potencial obtida da medição nos fornecem dados sobre as propriedades

elétricas da subsuperfície, como mostrado na figura 2.

Segundo Telford et al. (1990), a técnica da eletrorresistividade é superior aos outros métodos elétricos porque resultados quantitativos são obtidos usando uma fonte controlada com dimensões específicas.

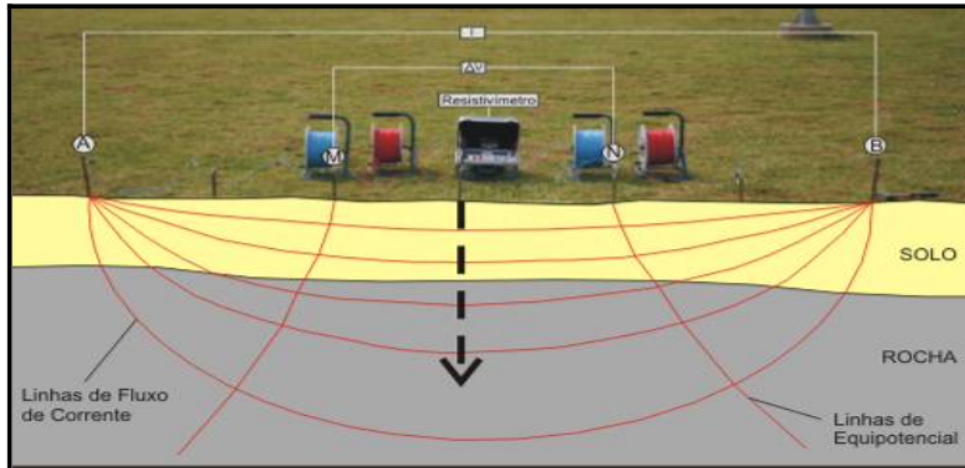


Figura 2: Aplicação do método da eletrorresistividade.

Fonte: (PORSANI et al., 2004)

A corrente e os eletrodos de potencial são mantidos no mesmo espaçamento relativo, e o arranjo todo é progressivamente expandido ao redor de um ponto fixo central. Consequentemente, as leituras são tomadas enquanto as correntes atingem progressivamente maiores profundidades.

2.2 Modelagem em eletrorresistividade 1D

A maioria dos arranjos se baseiam no uso de quatro eletrodos como mostrado na Figura 3, dois deles, A e B, usados para injetar uma corrente elétrica no solo e os outros dois, M e N, usados para a medição da diferença de potencial elétrico. Dentre os arranjos mais conhecidos estão os arranjos Wenner, Schlumberger, dipolo-dipolo e polo-dipolo. No entanto, apenas o arranjo de Schlumberger será usado neste trabalho.

O arranjo Schlumberger é massivamente referenciado na literatura, de acordo com (ZHDANOV, 2009), é o arranjo mais utilizado para a realização de sondagens elétricas. Nessa configuração os quatro eletrodos são dispostos simetricamente em relação ao ponto médio do arranjo, como mostrado na Figura 3. Os eletrodos M e N estão espaçados de uma distância b e medem a diferença de potencial elétrico. Enquanto isso, os eletrodos A

e B são responsáveis por introduzir a corrente no solo, sendo espaçados de uma distância $2a$.

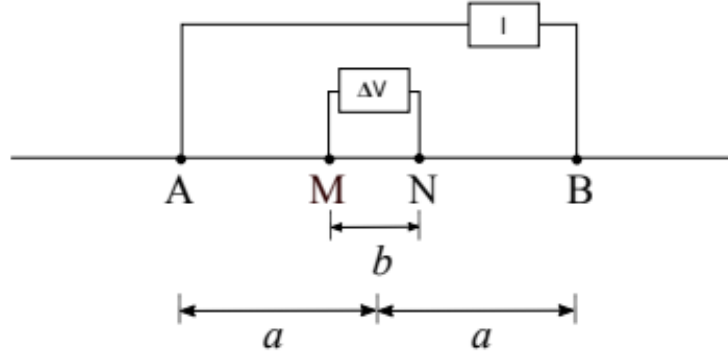


Figura 3: Aplicação do método da eletrorresistividade.

Fonte: (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002)

De acordo com (KOEFOED, 1979) a expressão para a resistividade aparente é $\rho_a(r)$ que por sua vez é medido com uma matriz Schlumberger sobre um modelo de terra 1D multicamadas como:

$$\rho_a(r) = r^2 \int_0^\infty T(\lambda) J_1(\lambda r) \lambda d\lambda \quad (2.2)$$

Onde r é metade do espaçamento atual do eletrodo $AB/2$ e $J_1\lambda(r)$ é a função de Bessel de primeira ordem. A transformada de resistividade $T(\lambda)$ pode ser determinado a partir da relação de recorrência de (PEKERIS, 1940) como:

$$T_j(\lambda) = \frac{T_{j+1}(\lambda) + \rho_j \tanh(\lambda h_j)}{[1 + T_{j+1}(\lambda) \tanh(\lambda h_j) / \rho_j]} \quad j = n - 1, n - 2, \dots, 1. \quad (2.3)$$

Onde $T_n(\lambda) = \rho_n$, presumivelmente $T_1(\lambda) = T(\lambda)$, e n denota o número de camadas, já ρ_j e h_j são a resistividade e a espessura da i -ésima camada, respectivamente.

2.3 Inversão

O objetivo principal da teoria de inversão é determinar os parâmetros de um modelo que reproduzem os dados reais (PARKER, 1977). Na geofísica, essa técnica é utilizada para encontrar modelos geológicos que justifiquem os valores das medidas físicas adquiridas

durante levantamentos feitos na superfície, como a eletrorresistividade.

Sen e Stoffa (2013) classificam os métodos de inversão em duas categorias: inversão direta ou inversão dos parâmetros do modelo. No primeiro caso, um operador matemático é escolhido e aplicado ao dado observado para se recuperar o modelo geológico, como, por exemplo, é feito na migração sísmica. O segundo caso é um procedimento em que dados sintéticos são gerados a partir de um suposto modelo e comparados com dados reais observados na aquisição. Se a comparação entre os dois for aceitável, o modelo é adotado como solução. Caso contrário, o modelo é alterado, os cálculos são refeitos e comparados novamente com as observações. Essa técnica é repetida automática e iterativamente até que seja encontrado um modelo cujos dados gerados sinteticamente sejam compatíveis com os dados observados (SEN; STOFFA, 2013).

2.3.1 Inversão em eletrorresistividade 1D

Grande parte dos problemas geofísicos são não lineares e uma forma de solucioná-los é pela linearização segundo (BLAKELY, 1996).

A resistividade aparente ρ_a depende dos valores do espaçamento entre os eletrodos a , da resistividade ρ_j de cada camada e sua espessura h_j correspondente. Sendo n o número de camadas do modelo geológico, então a equação:

$$\rho_{ai} = f(a_i, \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{n-1}, \rho_n, h_1, h_2, \dots, h_{n-1}, \rho_n) \quad (2.4)$$

mostra a relação de dependência de todas as i medidas de resistividade aparente obtidas no levantamento, as quais variam de acordo com $i = 1, 2, \dots, L$, ou seja, L observações.

O procedimento de inversão consiste em estimar valores de ρ_j e h_j que minimizem a diferença entre a resistividade aparente observada ρ_{ai} e a resistividade aparente calculada ρ^{cal} .

Uma forma de se resolver esse problema é utilizando o Método dos Mínimos Quadrados. Entretanto, ρ_{ai} é uma função não linear, portanto esse método não pode ser diretamente utilizado.

No processo de inversão, estimamos um modelo x que minimiza a função objetivo, que é uma medida de discrepância entre os conjuntos de dados observados e calculados, conforme representado na equação.

$$\Phi(x) = \frac{1}{n} \|\rho^{cal} - d^{obs}\|^2 \quad (2.5)$$

2.4 Harris Hawks Optimization (HHO)

O algoritmo de otimização do falcão de Harris (HHO - do inglês Harris Hawks Optimization Algorithm) é uma técnica de otimização computacional criada por Heidari et al. (2019) baseada no comportamento de caça dos falcões de Harris (*Parabuteo unicinctus*).

A principal tática dos falcões de Harris para capturar uma presa é o “ataque surpresa”, também conhecido como estratégia de “sete mortes”. inteligente estratégia, um grupo de falcões tentam atacar cooperativamente de diferentes direções e simultaneamente uma vez detectado um coelho fora da cobertura. O ataque pode ser rapidamente finalizado capturando a presa em poucos segundos, mas ocasionalmente, em relação às capacidades e comportamentos de fuga da presa, os ataques podem incluir mergulhos múltiplos, curtos e rápidos próximos à presa durante vários minutos. Os falcões de Harris podem demonstrar uma variedade de estilos de perseguição, dependendo da natureza dinâmica das circunstâncias e dos padrões de fuga da presa. Uma tática de troca ocorre quando o melhor falcão (líder) se abaixa na presa e se perde, e a perseguição será continuada por um dos membros do grupo. Essas atividades de troca podem ser observadas em diferentes situações porque são benéficas para confundir o coelho fugitivo.



Figura 4: Ataque surpresa

Fonte: (HEIDARI et al., 2019)

A principal vantagem dessas táticas cooperativas é que os falcões de Harris podem

perseguir o coelho detectado até a exaustão, o que aumenta sua chance de ser capturado. Além disso, ao deixar a presa exausta, ela não pode recuperar suas capacidades defensivas e, finalmente, não pode escapar do cerco da equipe confrontada, pois um dos falcões, que muitas vezes é o mais poderoso e experiente, captura sem esforço o coelho cansado e o compartilha com outros membros do bando.

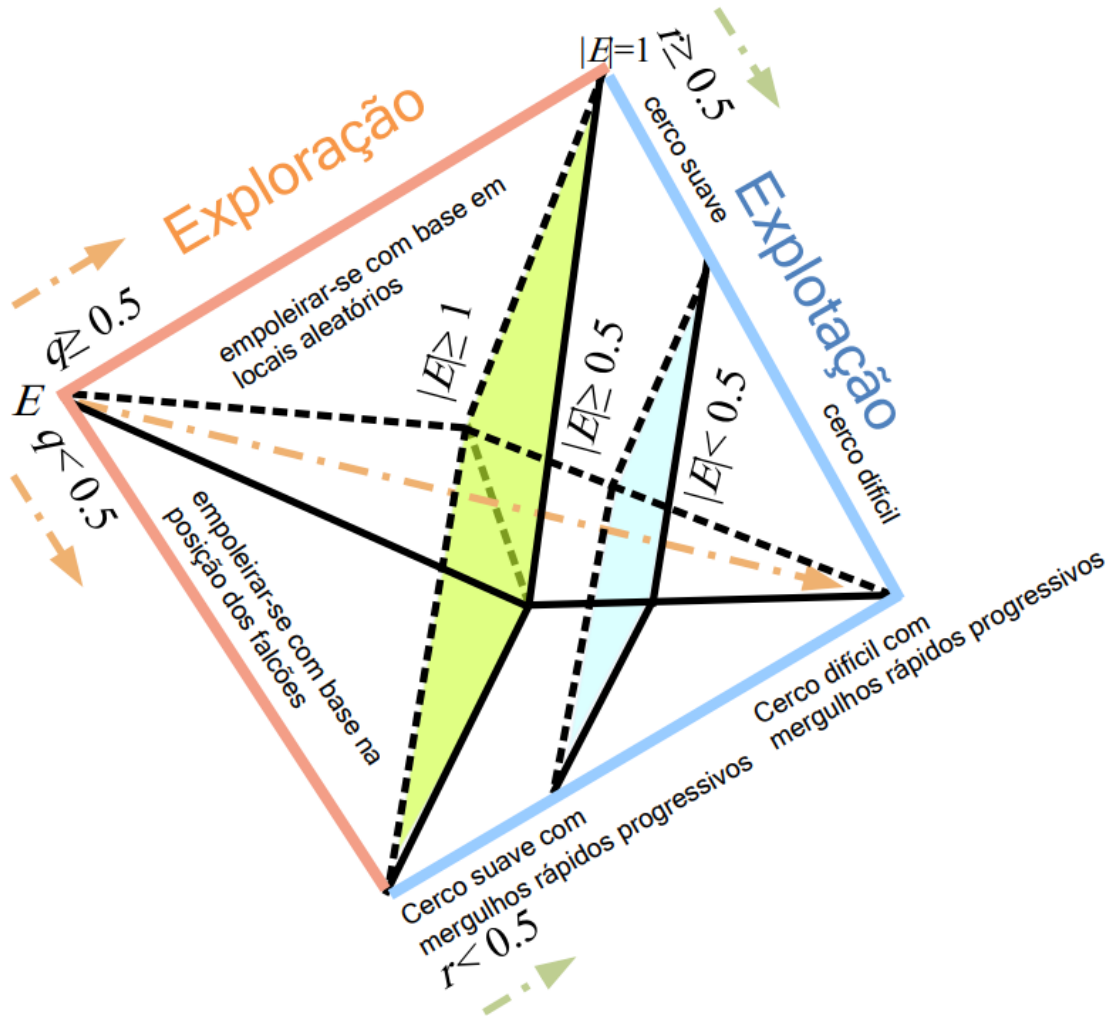


Figura 5: Fases HHO.

Fonte: (HEIDARI et al., 2019)

2.4.1 Fase de Exploração.

Nesta fase, os Harris Hawks habitam enormes árvores ou postes de telégrafo e adquirem as posições de presas-alvo esperando, procurando e descobrindo com seus olhos penetrantes. Essa fase se resume em duas estratégias. A primeira estratégia demonstra como os falcões detectam a presa de acordo com as posições dos membros do grupo de

acordo com a seguinte expressão: ($X_{\text{falcão}} = 1, 2, 3, 4 \dots, N$), onde N é o número total de falcões. Já a segunda estratégia determina como os falcões detectam a presa de acordo com o poleiro em uma árvore aleatória (X_{rand}).

$$X(t+1) = \begin{cases} X_{\text{rand}}(t) - r_1 |X_{\text{rand}}(t) - 2r_2 X(t)| & q \geq 0.5 \\ (X_{\text{coelho}}(t) - X_m(t)) - r_3(LB + r_4(UB - LB)) & q < 0.5 \end{cases} \quad (2.6)$$

Onde $X(t+1)$ representa a posição atualizada dos falcões na próxima iteração t . Já $X(t)$ representa a posição atual dos falcões, r_1, r_2, r_3, r_4 , e q representa números aleatórios dentro do conjunto de $(0, 1)$. Já $X_{\text{coelho}}(t)$ representa a posição da presa e X_m representa a média das posições para todos os falcões:

$$X_m(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i(t) \quad (2.7)$$

2.4.2 Transição de Exploração para Exploração.

No HHO, esta fase tem como objetivo descrever e modelar o comportamento radical dos gaviões da exploração para a exploração. Este comportamento depende da energia de fuga (E) da presa.

$$E = 2E_0(1 - \frac{t}{T}) \quad (2.8)$$

Em detalhe, E_0 é a energia inicial da presa que varia aleatoriamente entre $(-1, 1)$. Se a energia da presa mudou de 0 para 1, isso indica o fortalecimento da presa, enquanto se a energia da presa diminuiu de 0 para -1, isso significa que a presa está enfraquecendo. Na Figura 6, o comportamento dinâmico de E é apresentado durante duas execuções e 500 iterações. Este diagrama na Figura 6 se aplica a todos os casos, e este padrão é um componente do método original. Se o valor de $|E| \geq 1$, então a fase de exploração permanecerá inacabada, no entanto se o valor de $|E| \leq 1$, então a fase de exploração está acontecendo.

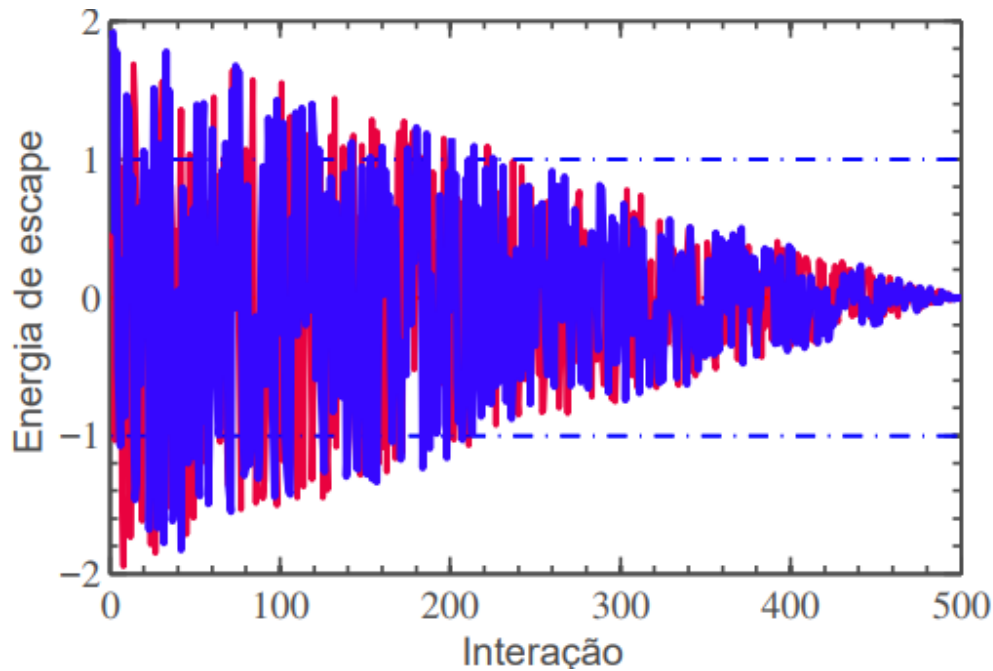


Figura 6: Comportamento de E durante duas execuções e 500 iterações.

Fonte: (HEIDARI et al., 2019)

2.4.3 Fase de Exploração.

Nesta etapa será apresentado os dois principais elementos que formam esta fase, as estratégias de perseguição dos gaviões e os comportamentos de fuga das presas. Portanto, esta fase visa modelar o comportamento de ataque surpresa do gavião sobre a presa explorada. Para isso, são propostas quatro estratégias de perseguição, cerco fácil, cerco difícil, cerco fácil com mergulhos rápidos progressivos e cerco difícil com mergulhos rápidos progressivos. No HHO, alternar entre as estratégias de perseguição depende de dois parâmetros que são:

Tabela 1: Comportamento de r e E

Energia de fuga (E)	$ E \geq 0,5$ presa ainda tem energia suficiente
	$ E \leq 0,5$ presa não tem energia suficiente
Chance de fuga (r)	$ r \geq 0,5$ a presa não escapa com sucesso (o cerco fácil é construído)
	$ r \leq 0,5$ a presa escapando com sucesso (o cerco difícil é construído)

2.4.3.1 Cerco fácil

Nesta estratégia, um cerco fácil acontece no caso de $|E| \geq 0,5$ e $r \geq 0,5$. Em resumo nesta etapa o coelho tem energia suficiente e tenta alguns saltos para para escapar porém não obtém sucesso pois sua energia tende a diminuir durante a fuga tentando escapar dos ataques dos falcões. A regra na Equação (2.9) apresenta o modelo de tal comportamento.

$$X(t+1) = \Delta X(t) - E |JX_{\text{coelho}}(t) - X(t)| \quad (2.9)$$

$$\Delta X(t) = X_{\text{coelho}}(t) - X(t) \quad (2.10)$$

onde $\Delta X(t)$ representa a diferença entre o vetor de posição do coelho e a localização atual na iteração t . Já $J = 2(1 - r_5)$ representa o procedimento de fuga de presas que mudava aleatoriamente em cada iteração, r_5 representa um número aleatório dentro de $(0, 1)$.

2.4.3.2 Cerco difícil

Nesta estratégia, dois cercos difíceis acontecem, se $r \geq 0.5$ e $|E| < 0.5$, o que significa que a presa não pode escapar com sucesso porque já está exausta. Nesse caso, as posições atualizadas dos falcões são dadas pela Eq.(2.11):

$$X(t+1) = X_{\text{coelho}}(t) - E |\Delta X(t)| \quad (2.11)$$

2.4.3.3 Cerco fácil com mergulhos rápidos progressivos

Este modelo de estratégia atualiza as posições dos falcões quando a presa ainda tem energia suficiente para escapar com sucesso $|E| \geq 0.5$ e os falcões ainda constroem um cerco fácil $r < 0.5$. Nesse caso, os falcões precisam decidir o melhor mergulho possível em direção à presa. Isso pode ser feito realizando vários movimentos, avaliando os novos movimentos usando a Eq. (2.12), comparar o resultado do movimento com o último mergulho em direção à presa e se o resultado da comparação não levar a determinar o melhor mergulho em direção à presa, então, mergulhos rápidos em equipe com base no voo de arremesso (LF) é realizado para melhorar a capacidade de exploração conforme modelado. *Levy Flight* (LF) é utilizado para imitar os movimentos enganosos em zigue-zague reais de presas (particularmente coelhos) durante a fase de fuga e mergulhos irregulares, íngreme e rápidos de falcões em torno da presa em fuga, isso pode ser mostrado na Eq. (2.13)

$$Y = X_{\text{coelho}}(t) - E |JX_{\text{coelho}}(t) - X(t)| \quad (2.12)$$

$$Z = Y + S \times LF(D) \quad (2.13)$$

Onde D representa a dimensão do problema. S representa o vetor aleatório por tamanho $1 \times D$. LF representa a função de voo de carga como na Eq.(2.14)

$$LF(x) = 0.01 \times \frac{u \times \sigma}{|v|^{\frac{1}{\beta}}}, \sigma = \left(\frac{\Gamma(1 + \beta) \times \sin(\frac{\pi\beta}{2})}{\Gamma(\frac{1+\beta}{2}) \times \beta \times 2^{(\frac{\beta-1}{2})}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.14)$$

Onde u , v representam valores aleatórios dentro de $(0, 1)$. β representa uma constante definida como 1,5.

Portanto, no cerco fácil com estratégia de mergulhos rápidos progressivos, as posições atualizadas dos falcões podem ser calculadas pela Eq. (2.15):

$$X(t+1) = \begin{cases} Y & \text{if } F(Y) < F(X(t)) \\ Z & \text{if } F(Z) < F(X(t)) \end{cases} \quad (2.15)$$

onde, F é a função objetivo ou fitness para um problema de otimização. Y e Z são calculados usando as Eqs. (2.12) e (2.13), respectivamente.

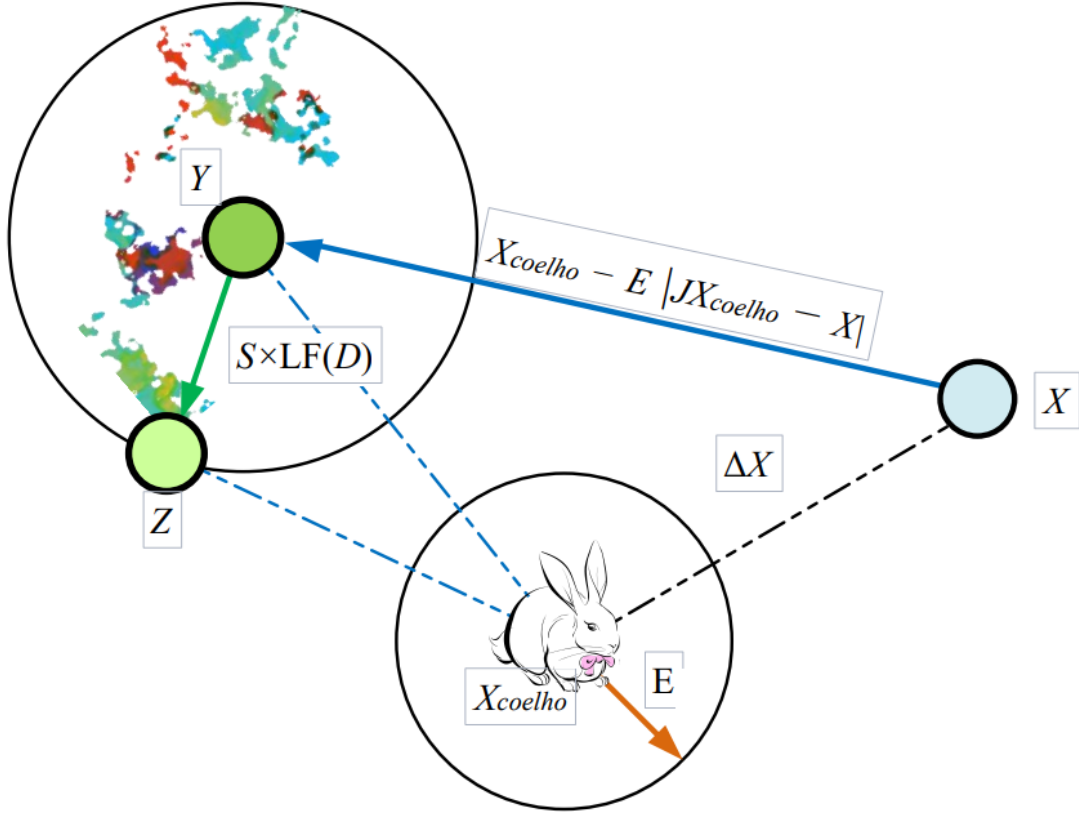


Figura 7: Exemplo de vetores globais no caso de cerco suave com mergulhos rápidos progressivos.

Fonte: (HEIDARI et al., 2019)

Uma ilustração simples deste passo para um falcão é demonstrada na Figura 7. Observe que o histórico de posição dos padrões de movimento de salto com base em LF durante algumas iterações também é registrado e mostrado nesta ilustração. Os pontos coloridos são as pegadas de localização de padrões baseados em LF em um teste e, em seguida, o HHO chega ao local Z . Em cada passo, apenas a melhor posição S ou Z será selecionado como o próximo local. Esta estratégia é aplicada a todos os

2.4.3.4 Cerco difícil com mergulhos rápidos progressivos

Nesta estratégia, a presa não tem energia suficiente para escapar $|E| < 0.5$ com isso os falcões constroem um cerco difícil $r < 0.5$. Esta estratégia difere da estratégia anterior (cerco fácil com mergulhos rápidos progressivos) que os falcões estão tentando reduzir a distância média de sua localização e a presa pretendida. A equação (2.16) é modelada nesta estratégia de acordo com o cerco difícil .

$$X(t+1) = \begin{cases} Y & \text{if } F(Y) < F(X(t)) \\ Z & \text{if } F(Z) < F(X(t)) \end{cases} \quad (2.16)$$

onde Y e Z são obtidos usando as novas regras das equações (2.17) e (2.18).

$$Y = X_{\text{coelho}}(t) - E |JX_{\text{coelho}}(t) - X_m(t)| \quad (2.17)$$

$$Z = Y + S \times LF(D) \quad (2.18)$$

já $X_m(t)$ é obtido usando a Eq. (2.7).

2.4.4 Pseudocódigo do (HHO)

Inputs: O tamanho da população N e número máximo de iterações T

Outputs: A localização do coelho e seu valor de fitness

Inicialize a população aleatória $X_i (i = 1, 2, \dots, N)$

while (condição de parada não é atendida) **do**

 Calcule os valores de fitness dos falcões

 Definir X_{coelho} como a localização do coelho (melhor localização)

for (each falcão (X_i)) **do**

 Atualizar a energia inicial E_0 e força de salto $J \triangleright E_0 = 2\text{rand}() - 1, J = 2(1 - \text{rand}())$

 Atualize o E utilizando a Eq (2.8)

if ($|E| \geq 1$) **then** \triangleright Fase de exploração

 Atualize o vetor de localização utilizando a Eq. (2.6)

if ($|E| < 1$) **then** \triangleright Fase de exploração

if ($r \geq 0.5$ and $|E| \geq 0.5$) **then** \triangleright Cerco fácil

 Atualize o vetor de localização utilizando a Eq. (2.9)

else if ($r \geq 0.5$ and $|E| < 0.5$) **then** \triangleright Cerco difícil

 Atualize o vetor de localização utilizando a Eq. (2.11)

else if ($r < 0.5$ and $|E| \geq 0.5$) **then** \triangleright Cerco fácil, mergulhos rápidos

progressivos

 Atualize o vetor de localização utilizando a Eq. (2.15)

else if ($r < 0.5$ and $|E| < 0.5$) **then** \triangleright Cerco difícil, mergulhos rápidos

progressivos

 Atualize o vetor de localização utilizando a Eq. (2.16)

Return X_{coelho}

3 Resultados e discussões

Para demonstrar a eficácia do HHO, foi executado testes em três modelos, sendo dois utilizando dados sintéticos acrescido ruído gaussiano de 5% e um dado real. Para os testes apresentados nos modelos sintéticos, após alguns testes foi definido como tamanho da população (número de agentes) $N=50$, número máximo de iterações $T=500$.

3.0.1 Modelo 1

Na tabela 2, temos como parâmetros os valores reais da resistividade e espessura assim como o intervalo mínimo e máximo do modelo sintético retirado de (MONTEIRO; EL-KALIOUBY, 2010). Temos também o valor do modelo que foi obtido através da média da execução de 10 inversões, por ultimo temos o desvio padrão calculado através da media obtida.

Tabela 2: Modelo sintético de 3 camadas. Fonte: (MONTEIRO; EL-KALIOUBY, 2010)

Resistividade da Camada (Ohm-m)	
Valor real	Modelo médio
100 [5-200]	101.1 ± 0.3
10 [1-30]	11.4 ± 3.7
500 [100-1000]	511.6 ± 6.1
Espessuras das Camadas (m)	
5 [0.1-10]	4.8 ± 0.2
15 [1-30]	17.5 ± 5.6

Na figura 8, temos a curva de ajuste de resistividade aparente gerados a partir do modelo proposto na tabela 2, percebe-se que a curva segue o comportamento do tipo H, ou seja, $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$.

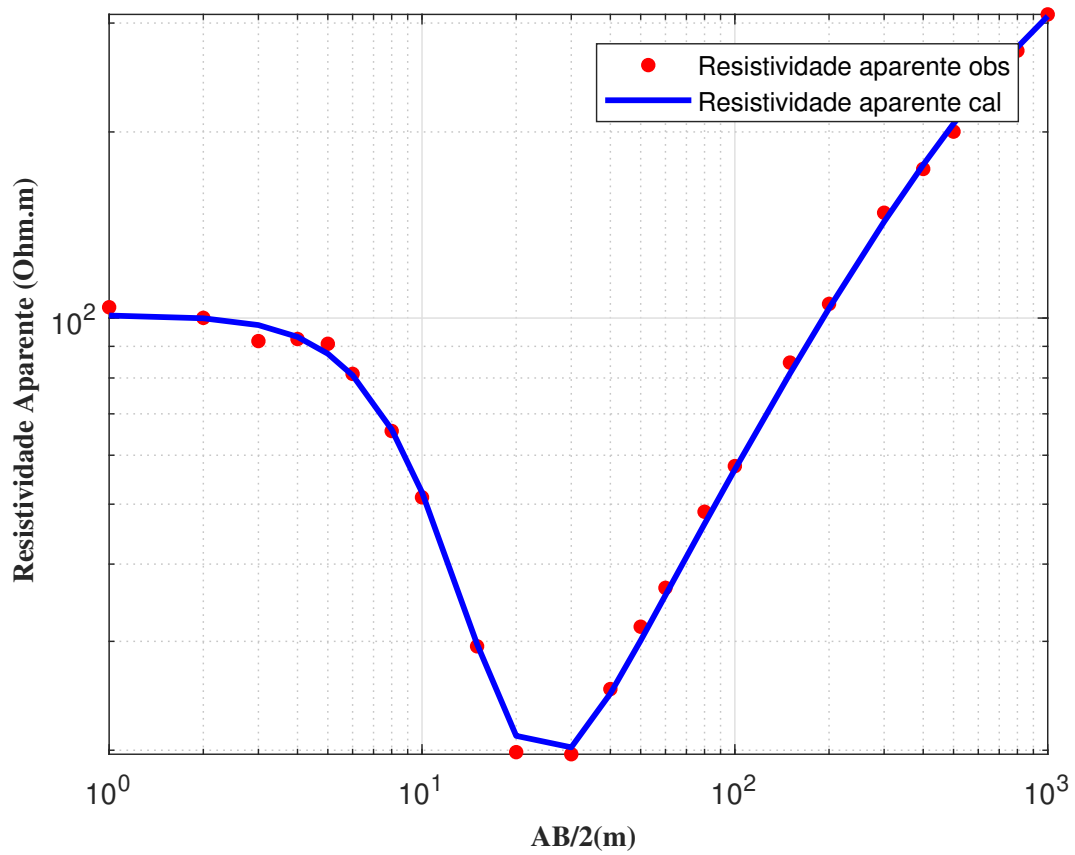


Figura 8: Curva de ajuste médio, percebe-se que os pontos vermelhos corresponde a resistividade aparente observada, logo a linha azul representa a resistividade obtida na inversão, ajustando quase perfeitamente na média de 10 inversões.

Logo na figura 9 temos o comportamento da resistividade em relação a profundidade, pode-se observar que o HHO fornece uma ótima avaliação dos parâmetros da primeira e ultima camada.

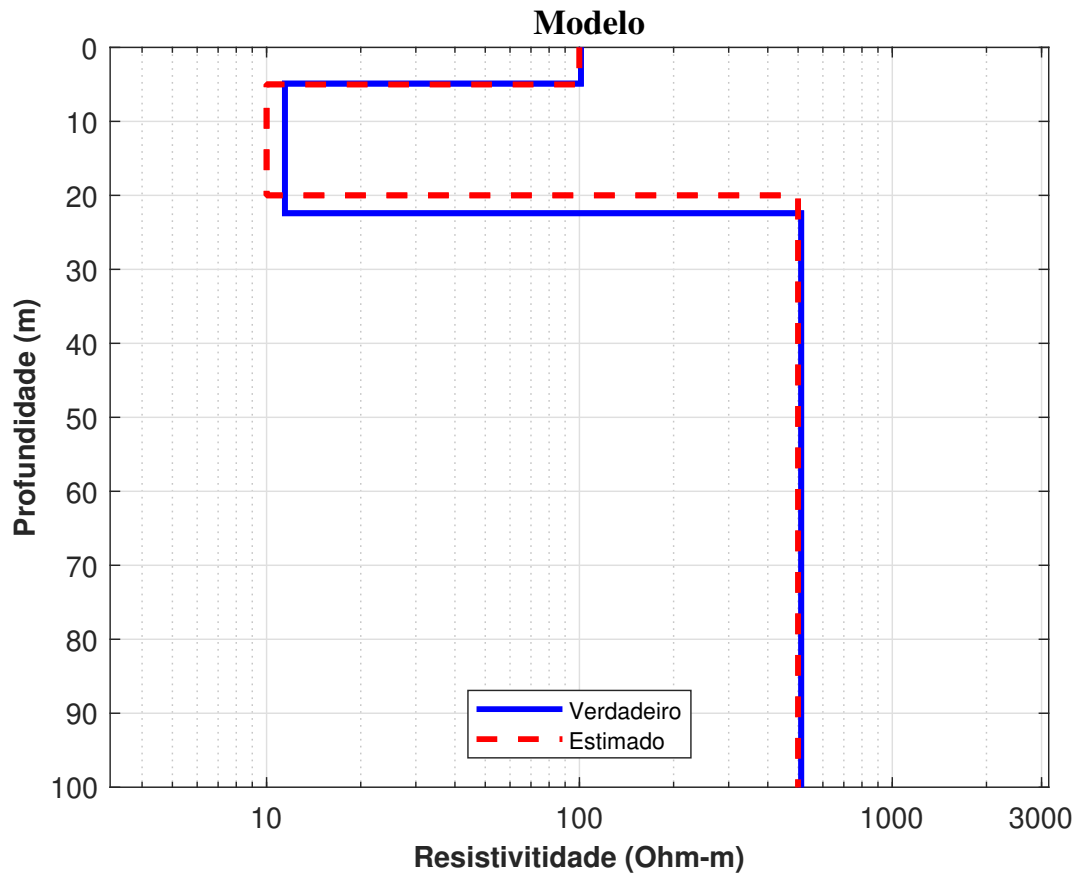


Figura 9: Modelo obtido a partir da inversão de resistividade da SEV usando o HHO. A linha tracejada em vermelho é referente ao modelo estimado, já a linha contínua de cor azul é o modelo verdadeiro.

Na figura 10 temos o comportamento da curva de convergência, percebe-se que nas primeiras iterações o valor da resistividade inicia alto, porém no decorrer da execução do algoritmo o valor vai baixando até se encontrar o mínimo global ou até a ultima iteração do algoritmo.

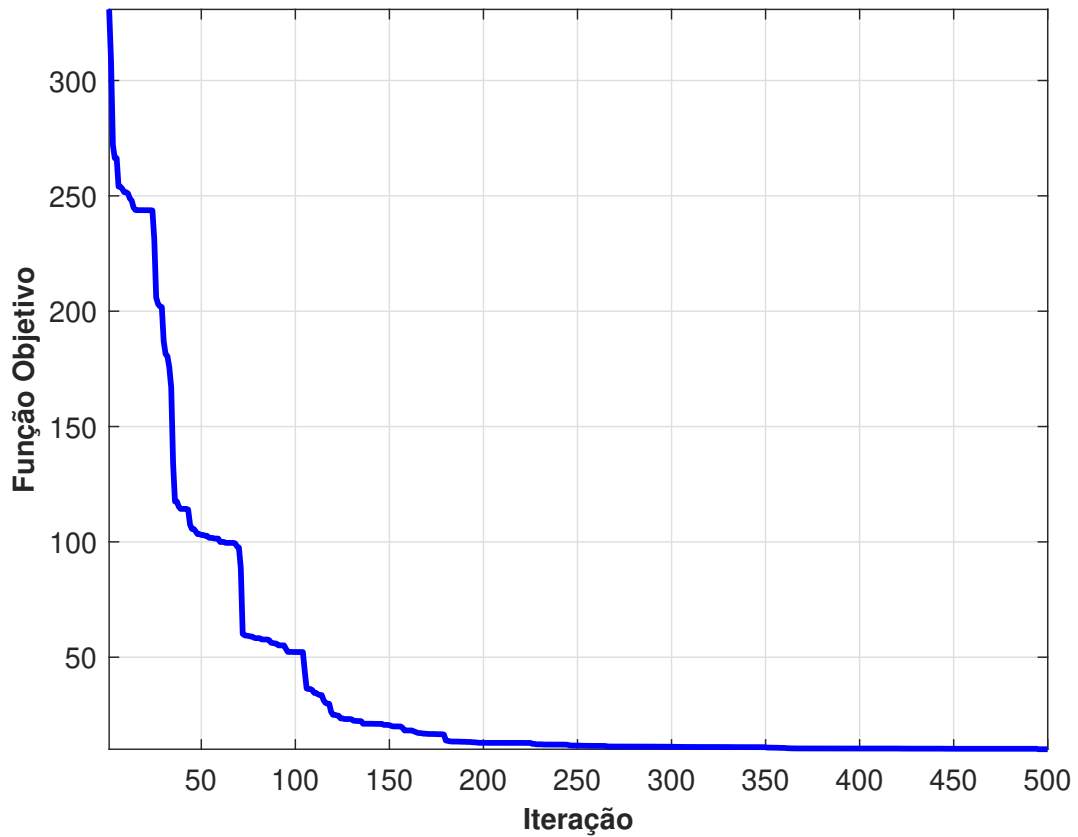


Figura 10: Curva de convergência do HHO.

3.0.2 Modelo 2

Este modelo sintético possui 4 camadas, o mesmo foi retirado de (EKINCI; DEMIRCI, 2008). O ruído gaussiano mais uma vez é acrescido de 5 % para os dados sintéticos, é esperado para locais com contrastes de alta resistividade e resistências de contato de eletrodo mais altas (DAHLIN, 1993), (EKINCI; DEMIRCI, 2008). Na tabela 3 temos os valores reais da resistividade e espessura, assim como sua variação mínima e máxima, logo adiante é mostrado os valores médios da execução de 10 inversões e seu desvio padrão.

Tabela 3: Modelo sintético de 4 camadas. Fonte: (OJO; XIE; OLORUNFEMI, 2018)

Resistividade da Camada (Ohm-m)	
Valor real	Modelo médio
100 [50-150]	101.1 ± 0.4
50 [20-80]	50.2 ± 9.3
20 [10-30]	20.8 ± 4.1
10 [5-15]	9.8 ± 0.2
Espessuras das Camadas (m)	
5 [2-8]	4.6 ± 0.5
10[5-15]	10.1 ± 2.7
20[10-30]	20.6 ± 4.5

Na figura 11 pode-se observar a curva de ajuste de resistividade aparente gerada de acordo com os parâmetros da tabela 3. O comportamento dessa curva é do tipo QQ, ou seja, $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 > \rho_4$.

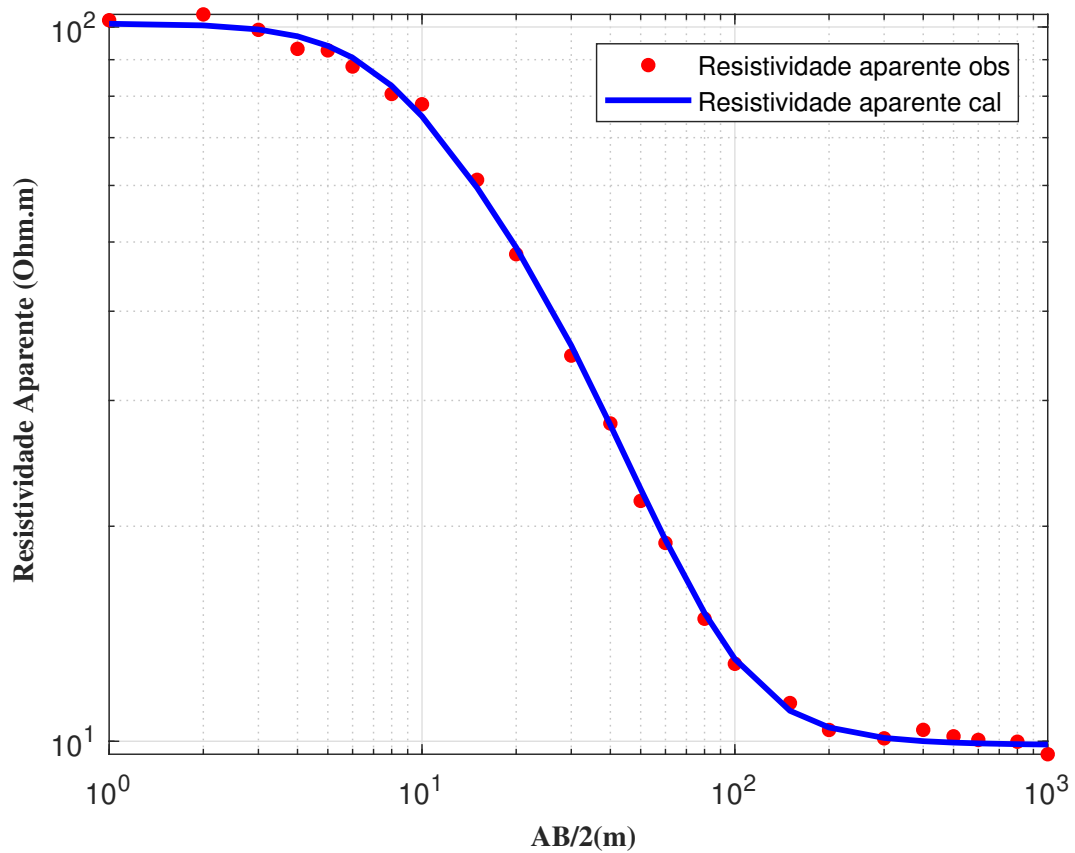


Figura 11: Curva de ajuste médio do modelo 2, logo acima os pontos vermelhos são referentes a resistividade aparente observada, a linha de cor azul indica a resistividade aparente calculada.

Fonte: (OJO; XIE; OLORUNFEMI, 2018)

Na figura 12 vemos a resistividade em relação a profanidade, observa-se que na comparação dos dados o HHO obteve uma avaliação excelente na primeira, segunda e quarta camada.

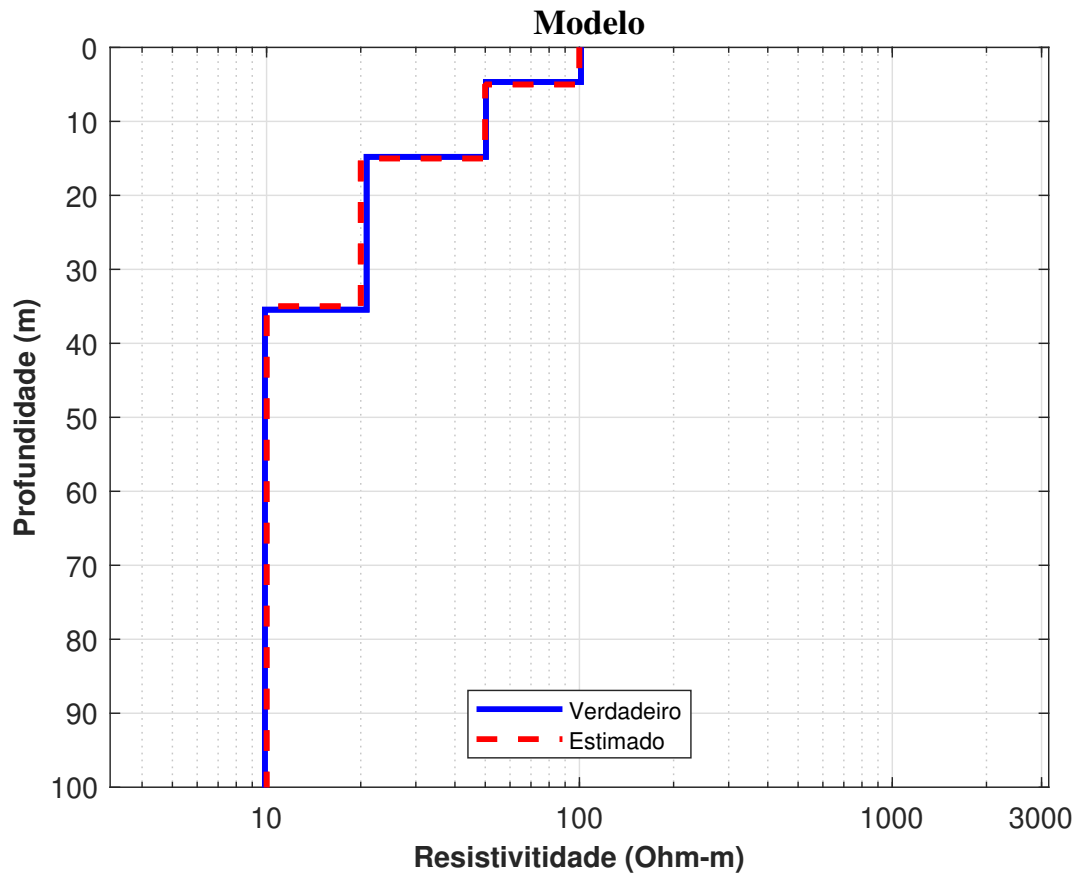


Figura 12: Modelo obtido através da inversão de uma SEV de 4 camadas usando o HHO, percebe-se que a linha tracejada de cor vermelha indica o modelo estimado, já a linha sólida de cor azul refere-se ao modelo verdadeiro.

Na figura 13 ilustra o valor da resistividade aparente em relação ao número de iterações, percebe-se que o valor inicia alto nas primeiras execuções do algoritmo HHO porém decai até o mínimo global com o decorrer das iterações,

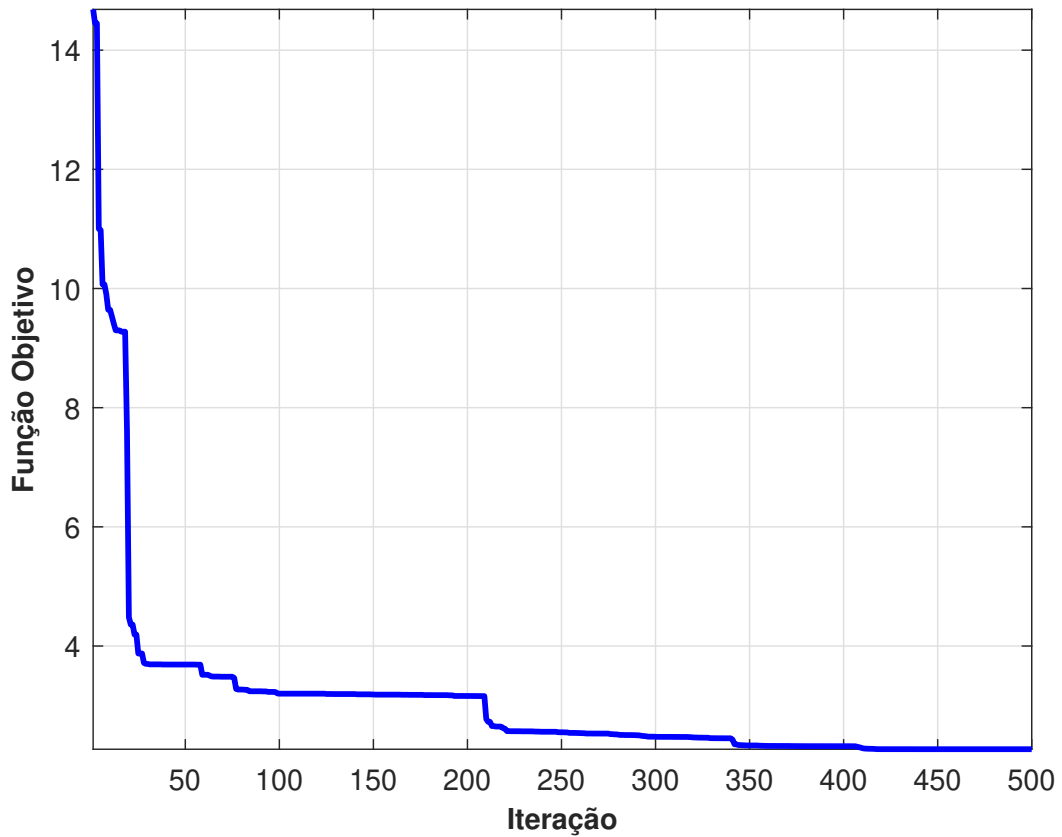


Figura 13: Curva de convergência.

3.0.3 Dados reais

Para o dado real foi definido como tamanho da população (número de agentes) $N=300$, já o número máximo de iterações $T=1000$. Este é um dos dados retirado de (ZOHDY; BISDORF, 1989), na qual possui 13 camadas. A seguir a tabela 4 mostra os valores da medição da resistividade real de cada abertura seguindo o conceito do arranjo de Schlumberger, logo a adiante temos também as respectivas espessuras. Foi usado para este dado, um range de busca baseado na solução de (ZOHDY; BISDORF, 1989), seguido também dos valores do modelo médio obtido através da media de 10 inversões e os valores do desvio padrão.

Tabela 4: Dado real de 13 camadas.

Resistividade da Camada (Ohm-m)	
Espaço de busca	Modelo médio
[44,8-179,3]	94,08 \pm 3.82
[38,7-155]	87,61 \pm 6.83
[21,2-85]	54,66 \pm 7.49
[6,9-27,8]	17,89 \pm 2.21
[2,9-11,7]	7,57 \pm 0.93
[3,1-12,6]	8,33 \pm 1.08
[4,4-17,9]	11,72 \pm 1.72
[5,8-23,5]	14,02 \pm 1.37
[7,2-28,9]	18,50 \pm 1.48
[9,1-36,4]	24,38 \pm 2.56
[11,8-47,4]	28,52 \pm 4.27
[14,9-59,7]	40,78 \pm 3.57
[17,6-70,4]	47,17 \pm 4.9
Espessuras das Camadas (m)	
[0,8-3,3]	1,85 \pm 0.16
[0,3-1,5]	0,98 \pm 0.12
[0,5-2,2]	1,50 \pm 0.16
[0,8-3,3]	2,33 \pm 0.17
[1,2-4,9]	2,98 \pm 0.35
[1,8-7,2]	4,33 \pm 0.59
[2,6-10,5]	6,20 \pm 0.82
[3,8-15,5]	9,66 \pm 0.97
[5,6-22,7]	14,14 \pm 1.95
[8,3-33,4]	20,70 \pm 2.65
[12,2-49]	31.13 \pm 3.7
[18-72]	45,45 \pm 5.25

Adiante na figura 14 observamos a curva de ajuste médio do dado real, que por sua vez foi gerado através da media de 10 inversões utilizando o HHO.

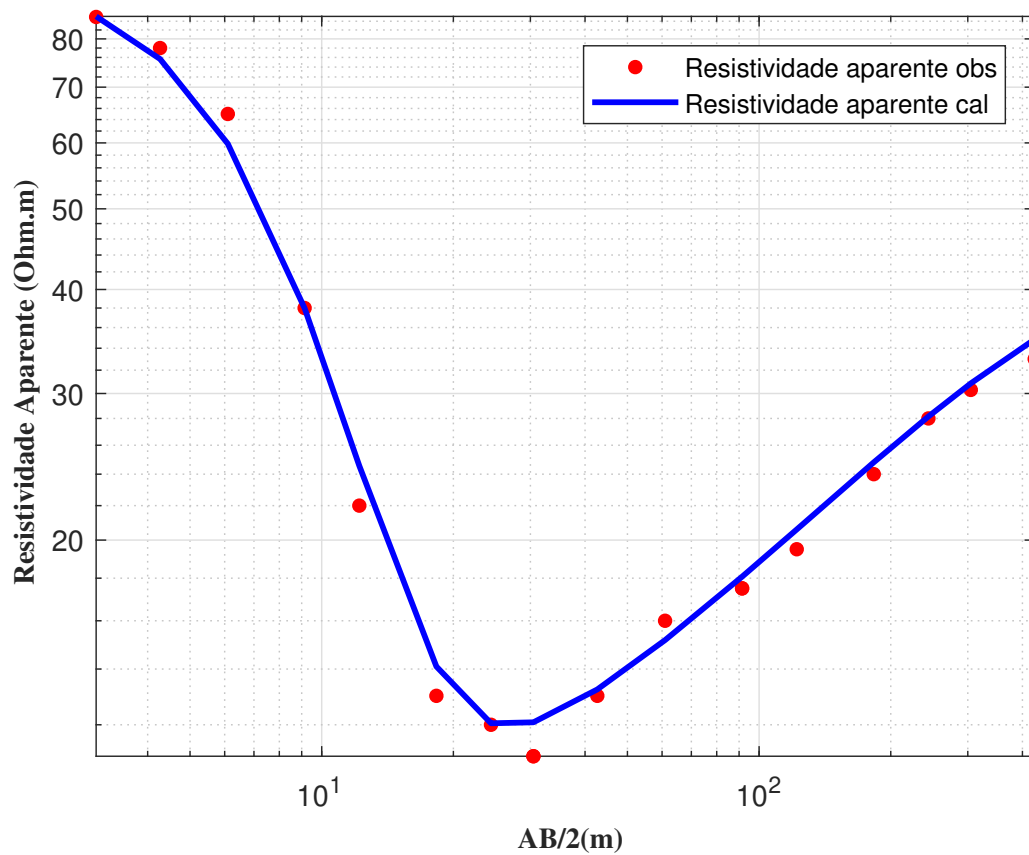


Figura 14: Curva de ajuste médio de dados reais, os pontos vermelhos indicam a resistividade aparente observada, já a linha de cor azul refere-se a resistividade calculada.

Na figura 16 vemos o gráfico de camadas, vemos o valor da resistividade em relação a profundidade, observamos que as primeiras camadas tem espessura menor e são menos resistivas do que as ultimas camadas, um cenário semelhante a subsuperfície nordestina.

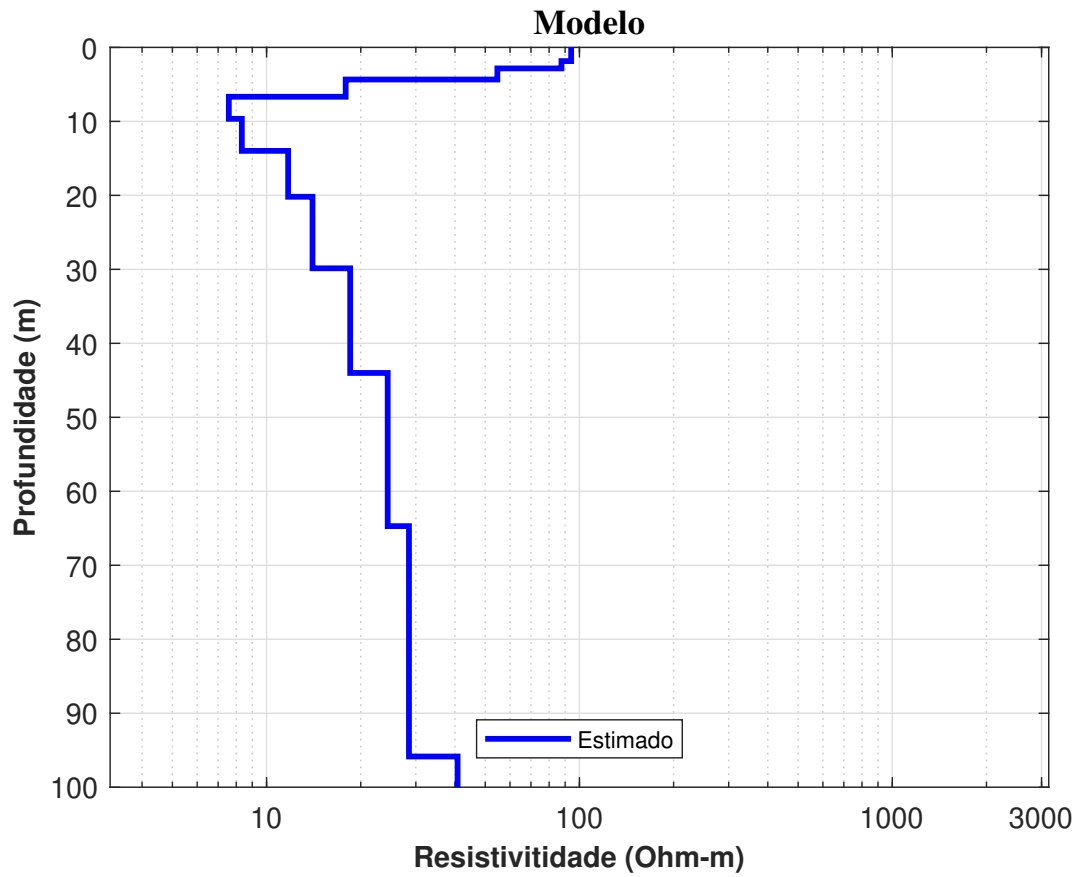


Figura 15: Gráfico de Camadas do dado real, a linha azul indica as camadas e suas resistividades.

Logo abaixo na figura 16 temos o comportamento da curva de convergência, o valor inicia muito alto porém no decorrer das iterações ele diminui até se aproximar a 0.

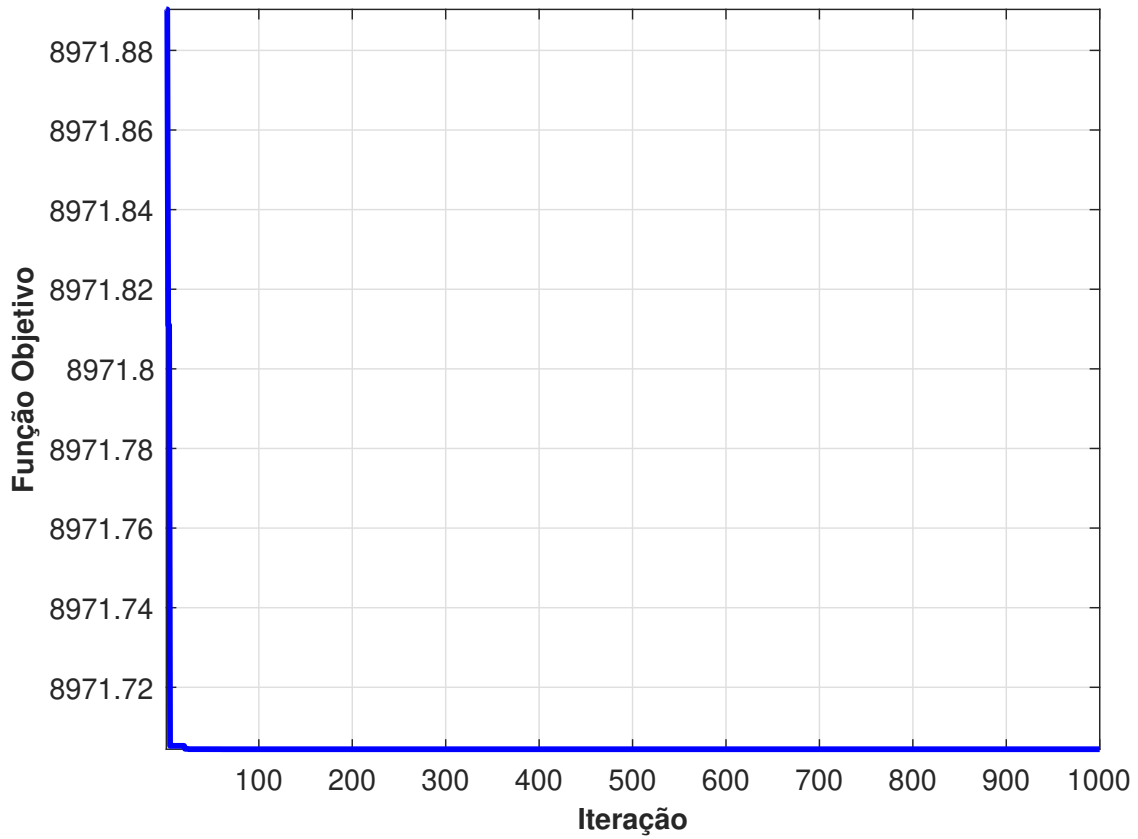


Figura 16: Curva de convergência de uma inversão típica do dado real.

A convergência ocorreu com poucas iterações, o valor da função objetivo iniciou alto mas com poucas iterações baixou drasticamente e logo em seguida permaneceu constante.

4 Conclusão

A robustez do HHO foi testado com dados sintéticos ruidosos e com dados de campo. Para todos os exemplos apresentados, a inversão resultou em valores de resistividade e espessura que são semelhantes aos do modelo verdadeiro para os exemplos sintéticos e para exemplo de campo. O modelo médio ajustou adequadamente como esperado. O estudo concluiu que o HHO é eficiente e confiável para determinar os parâmetros da camada de subsuperfície 1D.

Referências

- BLAKELY, R. J. *Potential theory in gravity and magnetic applications*. [S.l.]: Cambridge university press, 1996.
- CHUNDURU, R. K.; SEN, M. K.; STOFFA, P. L. 2-d resistivity inversion using spline parameterization and simulated annealing. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 61, n. 1, p. 151–161, 1996.
- CHUNDURU, R. K. et al. Non-linear inversion of resistivity profiling data for some regular geometrical bodies1. *Geophysical Prospecting*, European Association of Geoscientists & Engineers, v. 43, n. 8, p. 979–1003, 1995.
- DAHLIN, T. Automation of 2d resistivity surveying. In: EUROPEAN ASSOCIATION OF GEOSCIENTISTS & ENGINEERS. *55th EAGE Meeting*. [S.l.], 1993. p. cp–46.
- EBERHART RUSSELL E KENNEDY, J. Um novo otimizador usando a teoria de enxame de partículas. *Ieee*, p. 39–43, 1995.
- EKINCI, Y. L.; DEMIRCI, A. A damped least-squares inversion program for the interpretation of schlumberger sounding curves. *Journal of Applied Sciences*, v. 8, n. 22, p. 4070–4078, 2008.
- HEIDARI, A. A. et al. Harris hawks optimization: Algorithm and applications. *Future Generation Computer Systems*, v. 97, p. 849–872, 2019. ISSN 0167-739X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X18313530>>.
- KEAREY; BROOKS; HILL. *An Introduction to Geophysical Exploration*. 3. ed. Malden, MA: John Wiley & Sons, 2002. ISBN 978-0-632-04929-5.
- KIRKPATRICK, S.; JR, C. D. G.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. *science*, American association for the advancement of science, v. 220, n. 4598, p. 671–680, 1983.
- KOEFOED, O. Resistivity sounding on an earth model containing transition layers with linear change of resistivity with depth. *Geophysical Prospecting*, Wiley Online Library, v. 27, n. 4, p. 862–868, 1979.
- MARTÍNEZ, J. L. F. et al. Pso: A powerful algorithm to solve geophysical inverse problems: Application to a 1d-dc resistivity case. *Journal of Applied Geophysics*, Elsevier, v. 71, n. 1, p. 13–25, 2010.
- MONTEIRO, F. A. S.; EL-KALIOUBY, H. M. Comparative study of local versus global methods for 1d joint inversion of direct current resistivity and time-domain electromagnetic data. *Near Surface Geophysics*, European Association of Geoscientists & Engineers, v. 8, n. 2, p. 135–143, 2010.

- OJO, A.; XIE, J.; OLORUNFEMI, M. Nonlinear inversion of resistivity sounding data for 1-d earth models using the neighbourhood algorithm. *Journal of African Earth Sciences*, Elsevier, v. 137, p. 179–192, 2018.
- PARKER, R. L. Understanding inverse theory. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, v. 5, n. 1, p. 35–64, 1977.
- PEKERIS, C. L. Direct method of interpretation in resistivity prospecting. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 5, n. 1, p. 31–42, 1940.
- PIATTI, C. et al. Improved monte carlo 1d inversion of vertical electrical sounding and time-domain electromagnetic data. *Near Surface Geophysics*, Wiley Online Library, v. 8, n. 2, p. 117–133, 2010.
- PORSANI, J. L. et al. Investigações geofísicas de superfície e de poço no sítio controlado de geofísica rasa do iag-usp. *Revista Brasileira de Geofísica*, SciELO Brasil, v. 22, p. 245–258, 2004.
- SAMBRIDGE, M. Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm—i. searching a parameter space. *Geophysical journal international*, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 138, n. 2, p. 479–494, 1999.
- SEN, M. K.; STOFFA, P. L. *Global optimization methods in geophysical inversion*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2013.
- TELFORD, W. M. et al. *Applied geophysics*. [S.l.]: Cambridge university press, 1990.
- ZHDANOV, M. S. *Geophysical electromagnetic theory and methods*. [S.l.]: Elsevier, 2009.
- ZOHDY, A. A.; BISDORF, R. J. Schlumberger soundings near lassen volcanic national park, california by. Citeseer, 1989.