



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



# Algoritmo de Otimização do Gafanhoto (AOG) para Problema de Inversão em Eletrorresistividade 1D

Fernando José dos Santos

Caicó - RN  
Dezembro de 2022

**Fernando José dos Santos**

# **Algoritmo de Otimização do Gafanhoto (AOG) para Problema de Inversão em Eletorresistividade 1D**

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 de Informação.

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

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 Profª. Maria Lúcia da Costa Bezerra - -CERES- - Caicó

Santos, Fernando José Dos.

Algoritmo de Otimização do Gafanhoto (AOG) para problema de inversão em Eletorresistividade 1D / Fernando José Dos Santos.  
- Caicó, 2022.  
39f.: 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. Otimização global. 2. Resistividade elétrica. 3. Problemas inversos. 4. Algoritmo de Otimização do Gafanhoto. 5. Grasshopper Optimization Algorithm. 6. Vertical Electrical Sounding. I. Barboza, Francisco Márcio. II. Título.

RN/UF/BS-CERES

CDU 621.3.011.22

Fernando José dos Santos

## **Algoritmo de Otimização do Gafanhoto (AOG) para Problema de Inversão em Eletorresistividade 1D**

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

---

**Prof. Dr. Francisco Márcio Barboza**  
Orientador  
DCT/UFRN

---

**Prof. Dr. Renato Ramos da Silva**  
**Dantas**  
Examinador 1  
DG/UFRN

---

**Prof. MSc. Jerbeson de Melo Santana**  
Examinador 2  
PETROBRAS

Caicó - RN  
19 de dezembro de 2022

# AGRADECIMENTOS

Com muita luta e dedicação estou concluindo mais um passo em vida. Existem pessoas por trás de toda essa jornada.

Primeiramente quero agradecer ao nosso senhor Deus e ao seu filho por me conceder a vida e ajudar a estar no caminho certo.

Aos meus pais, Fátima e João (Doca), e ao meu irmão, Thiago: vocês nunca deixaram de me ajudar, mesmo nas dificuldades e das doenças em nossa família sempre me orientaram que o caminho para vencer na vida é o “estudo”. Não existem palavras para descrever o quanto me sinto grato por ter uma família como a nossa, sou feliz por tê-los ao meu lado e me sinto realizado por poder mostrar para vocês o resultado do meu esforço.

Aos meus familiares, obrigado pela fé que tiveram em mim. Agradeço especialmente a minhas tias, tios, primos, primas e demais por sempre estarem me encorajando a estudar.

A todos da comunidade Barra da Espingarda - Caicó/RN, onde moro, que sempre ajudaram nos momentos difíceis.

Aos meus colegas de Sistemas de Informação por sempre serem companheiros nos momentos das provas e trabalhos. Em especial da turma 2016.1.

Aos Professores do BSI, em especial ao professor Márcio, que me ajudou a concluir esse trabalho, obrigado pela sua paciência, conversas, ensinamentos e por aceitar me orientar.

Todos vocês sabem o que ter concluído esse trabalho significa para mim e agradeço-os profundamente por terem me ajudado nessa conquista. Muito Obrigado.

*"O Senhor é o meu pastor, nada me faltará."  
(Bíblia Sagrada, Salmos 23, 1)*

# RESUMO

O método da eletrorresistividade é um método elétrico que mensura a resistividade elétrica de materiais encontrados na subsuperfície. O problema inverso na geofísica visa encontrar um modelo das propriedades do meio a partir dos dados de campo. Novos algoritmos permitiram que os problemas inversos na geofísica fossem tratados com maior precisão e velocidade, utilizando a otimização global para buscar a solução. A fim de investigar o uso de um algoritmo de otimização global na resolução de problemas inversos, utiliza-se o Algoritmo de Otimização do Gafanhoto (AOG), inspirado no comportamento de enxame dos gafanhotos na natureza, para resolver problema inverso em eletrorresistividade em uma dimensão (1D). Os resultados mostram que o AOG pode ser usado para resolver problemas em eletrorresistividade.

**Palavras-chave:** Otimização global, Eletrorresistividade, Problemas inversos, Sondagem elétrica vertical, Algoritmo de otimização do gafanhoto, *Grasshopper Optimization Algorithm*, *Vertical Electrical Sounding*

# ABSTRACT

The electroresistivity method is an electrical method that measures the electrical resistivity of materials found in the subsurface. The inverse problem in geophysics aims to find a model of the properties of the medium from field data. New algorithms allowed inverse problems in geophysics to be treated with greater precision and speed, using global optimization to find the solution. In order to investigate the use of a global optimization algorithm in solving inverse problems, the Grasshopper Optimization Algorithm (AOG), inspired by the swarm behavior of grasshoppers in nature, is used to solve an inverse problem in electroresistivity in one dimension (1D). The results show that AOG can be used to solve electroresistivity problems.

**Keywords:** Global optimization, Electroresistivity, Inverse problems, Vertical electrical sounding , Grasshopper optimization algorithm



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Parâmetros usados na definição de resistividade . . . . .	15
Figura 2 – Intervalo aproximado de valores de resistividade de alguns materiais . .	16
Figura 3 – Sondagem Elétrica Vertical . . . . .	17
Figura 4 – Curva de resistividades aparentes. . . . .	18
Figura 5 – Gafanhotos na fase de ninfa . . . . .	19
Figura 6 – Gafanhotos na fase adulta . . . . .	20
Figura 7 – interação entre os gafanhotos. Gafanhotos de cor vermelha estão sendo atraídos para a zona de conforto $[0,2079]$ , gafanhotos de cor verde estão na zona de conforto $[2.079]$ e gafanhotos de cor azul estão em repulsão para a zona de conforto $[2.079,4]$ . . . . .	21
Figura 8 – Resultados da inversão do modelo sintético de 3 camadas usando AOG, comparação entre dados da resistividade aparente observada (círculos vermelhos) e média da resistividade aparente calculada teoricamente (linha sólida azul). . . . .	26
Figura 9 – Modelo verdadeiro (linha sólida azul) e modelo médio estimado para o AOG (linha tracejada vermelha). . . . .	27
Figura 10 – Curva típica de convergência do modelo sintético de 3 camadas usando o AOG de uma inversão. . . . .	28
Figura 11 – Resultados da inversão do modelo sintético de 5 camadas usando AOG, comparação entre dados da resistividade aparente observada (círculos vermelhos) e resistividade aparente calculada teoricamente (linha sólida azul) para o melhor ajuste do modelo AOG. . . . .	30
Figura 12 – Modelo de camadas . . . . .	31
Figura 13 – Curva típica de convergência do modelo sintético de 5 camadas usando o AOG de uma inversão. . . . .	32
Figura 14 – Resultados da inversão do modelo real de 3 camadas usando o AOG, comparação entre dados da resistividade aparente observada (círculos vermelhos) e resistividade aparente calculada teoricamente (linha sólida azul) para o ajuste do modelo AOG. . . . .	33
Figura 15 – Modelo verdadeiro (linha sólida azul) e modelo médio estimado para o AOG (linha tracejada vermelha). . . . .	34
Figura 16 – Curva típica de convergência do modelo real de 3 camadas usando o AOG de uma inversão. . . . .	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros para modelo de três camadas. . . . .	25
Tabela 2 – Média e desvio padrão de 10 inversões. . . . .	26
Tabela 3 – Parâmetros para modelo de cinco camadas. . . . .	29
Tabela 4 – Média e desvio padrão de 10 inversões. . . . .	29
Tabela 5 – Parâmetros para modelo real de três camadas. . . . .	32
Tabela 6 – Média e desvio padrão de 10 inversões. . . . .	33

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**AOG** Algoritmo de Otimização do Gafanhoto

**GOA** *Grasshopper Optimization Algorithm*

**ER** Eletorresistividade

**SEV** Sondagem Elétrica Vertical

**VES** *Vertical Electrical Sounding*

## LISTA DE ALGORITMOS

1	Pseudocódigo do Algoritmo de Otimização do Gafanhoto (AOG) . . . . .	23
---	--	----

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos da pesquisa</b>	<b>13</b>
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos específicos	14
<b>1.2</b>	<b>Organização do trabalho</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Método da eletrorresistividade</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Inversão de dados em eletrorresistividade</b>	<b>18</b>
<b>2.3</b>	<b>Algoritmo de otimização do gafanhoto</b>	<b>19</b>
2.3.1	Interação Social	20
2.3.2	Força da Gravidade	21
2.3.3	Direção do Vento	22
2.3.4	Posição do Gafanhoto	22
2.3.5	Pseudocódigo e Complexidade	23
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>25</b>
<b>3.1</b>	<b>Inversão de dados sintéticos em três camadas</b>	<b>25</b>
<b>3.2</b>	<b>Inversão de dados sintéticos em cinco camadas</b>	<b>28</b>
<b>3.3</b>	<b>Inversão de dados reais em três camadas</b>	<b>32</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>36</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>37</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A geofísica é uma ciência que aplica os princípios da física ao estudo da Terra. São utilizados métodos geofísicos para realizar medidas nas várias propriedades físicas existentes, como: gravidade, campo magnético, resistividade, etc. Dentre os métodos geofísicos estão os métodos elétricos que tem por finalidade o estudo das propriedades elétricas das rochas. O método da eletrorresistividade é um método elétrico que mensura a resistividade elétrica de materiais encontrados na subsuperfície (KEAREY; BROOKS; HILL, 2002).

A inversão de dados é um conjunto de técnicas matemáticas cuja finalidade é obter informações sobre as grandezas não observáveis inferidas a partir dos dados observados. O problema inverso na geofísica visa encontrar um modelo das propriedades do meio a partir dos dados de campo (NASCIMENTO, 2011). Existem muitos problemas inversos em eletrorresistividade caracterizados por serem não lineares, multidimensionais e possuir funções objetivas complexas com vários mínimos locais (BENJUMEA *et al.*, 2021).

O avanço computacional permitiu que os problemas inversos na geofísica fossem tratados com maior precisão e velocidade, utilizando algoritmos de otimização global para buscar a solução (BORJA, 2018). Na literatura científica, pode-se encontrar inúmeros trabalhos relatando o uso desses algoritmos de otimização para resolver o problema inverso em eletrorresistividade: Sen, Bhattacharya e Stoffa (1993) utilizam o recozimento simulado ou *Simulated Annealing*, Martínez *et al.* (2010) utiliza o algoritmo de otimização de enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization*) e o algoritmo genético (*Genetic Algorithm*) no trabalho de Siyam (2007).

A fim de investigar o uso de um algoritmo de otimização global na resolução do problema inverso, nesse trabalho opta-se por utilizar o Algoritmo de Otimização do Gafanhoto (AOG) ou *Grasshopper Optimization Algorithm* (GOA) desenvolvido por Saremi, Mirjalili e Lewis (2017), inspirado na navegação de enxames dos gafanhotos na natureza para resolver problema inverso em eletrorresistividade em uma dimensão (1D).

## 1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Esta seção contém os objetivos da pesquisa, contemplando o objetivo principal e as atividades para que este objetivo seja atingido (objetivos específicos).

### 1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é contribuir para a solução e interpretação de problemas inversos em eletrorresistividade em uma dimensão (1D) com uso do Algoritmo de Otimização do Gafanhoto ([AOG](#)).

### 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 eletrorresistividade 1D usando o [AOG](#);
- Aplicação do [AOG](#) em diferentes dados sintéticos com ruído;
- Aplicação do [AOG](#) em dados reais;

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho divide-se em metodologia (capítulo 2), onde serão abordados tópicos relevantes como o método utilizado na inversão e detalhes do [AOG](#) na inversão. No capítulo 3 temos os resultados e discussões, onde exponho os resultados dos experimentos das inversões dos modelos sintéticos e do modelo real, no capítulo 4 finalizo com as principais conclusões e no final temos as referências.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 MÉTODO DA ELETRORRESISTIVIDADE

A Eletrorresistividade (ER) é um método geofísico utilizado para determinar a resistividade elétrica dos diferentes tipos de rochas (BRAGA, 2006).

A resistividade elétrica de um material é definida pela sua resistência em ohms. Para um cilindro condutor de resistência  $\delta R$ , comprimento  $\delta L$  e área de seção transversal  $\delta A$  (Figura 1), a resistividade  $\rho$  é dada por:

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

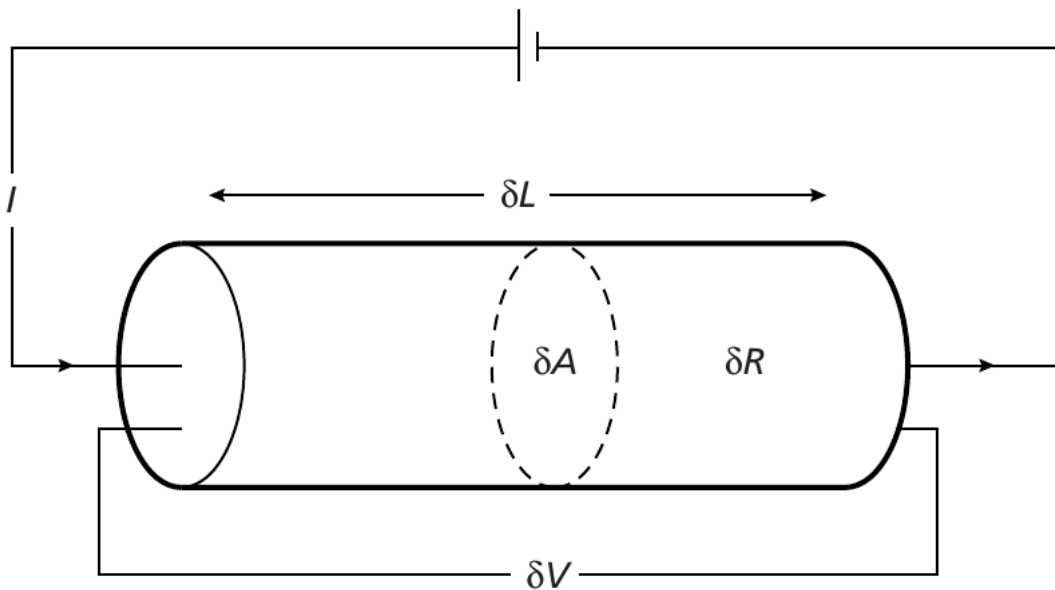


Figura 1 – Parâmetros usados na definição de resistividade

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

Diferentes tipos de minerais podem conduzir melhor eletricidade do que outros, assim a medida de resistividade pode ser calculada utilizando a equação 2.1. Na figura 2 apresenta os valores dos principais tipos de rochas com suas resistividades.



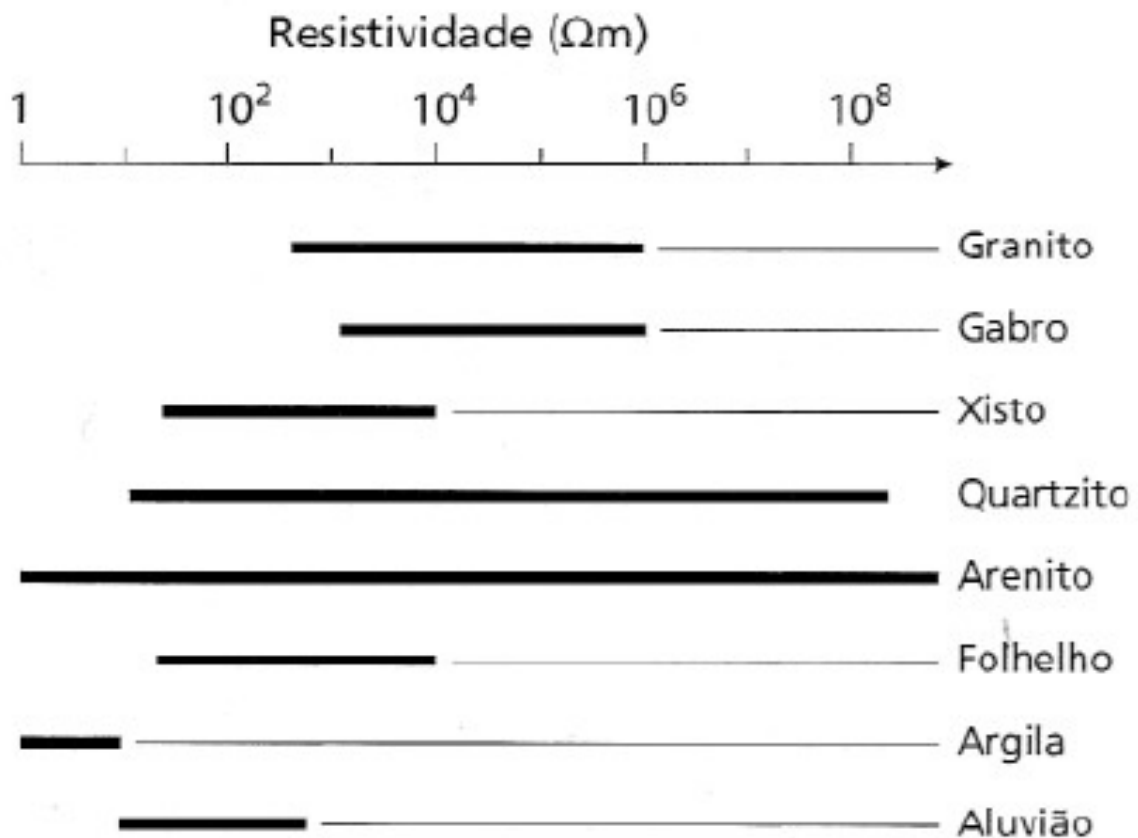


Figura 2 – Intervalo aproximado de valores de resistividade de alguns materiais

Fonte: (BRAGA, 2016)

A Sondagem Elétrica Vertical (SEV) ou *Vertical Electrical Sounding* (VES) é utilizado um equipamento para injetar corrente elétrica no solo, a partir de diferentes espaçamentos entre os eletrodos de corrente (A e B) dispostos na superfície do terreno e outros dois eletrodos de potencial (M e N), calcula-se a diferença de potencial entre eles, segundo o arranjo Schlumberger. Na Figura 3 contém medidas de resistividade ( $\rho_n$ ) e espessuras das camadas ( $E_n$ ) em uma SEV fictícia (BRAGA, 2016).

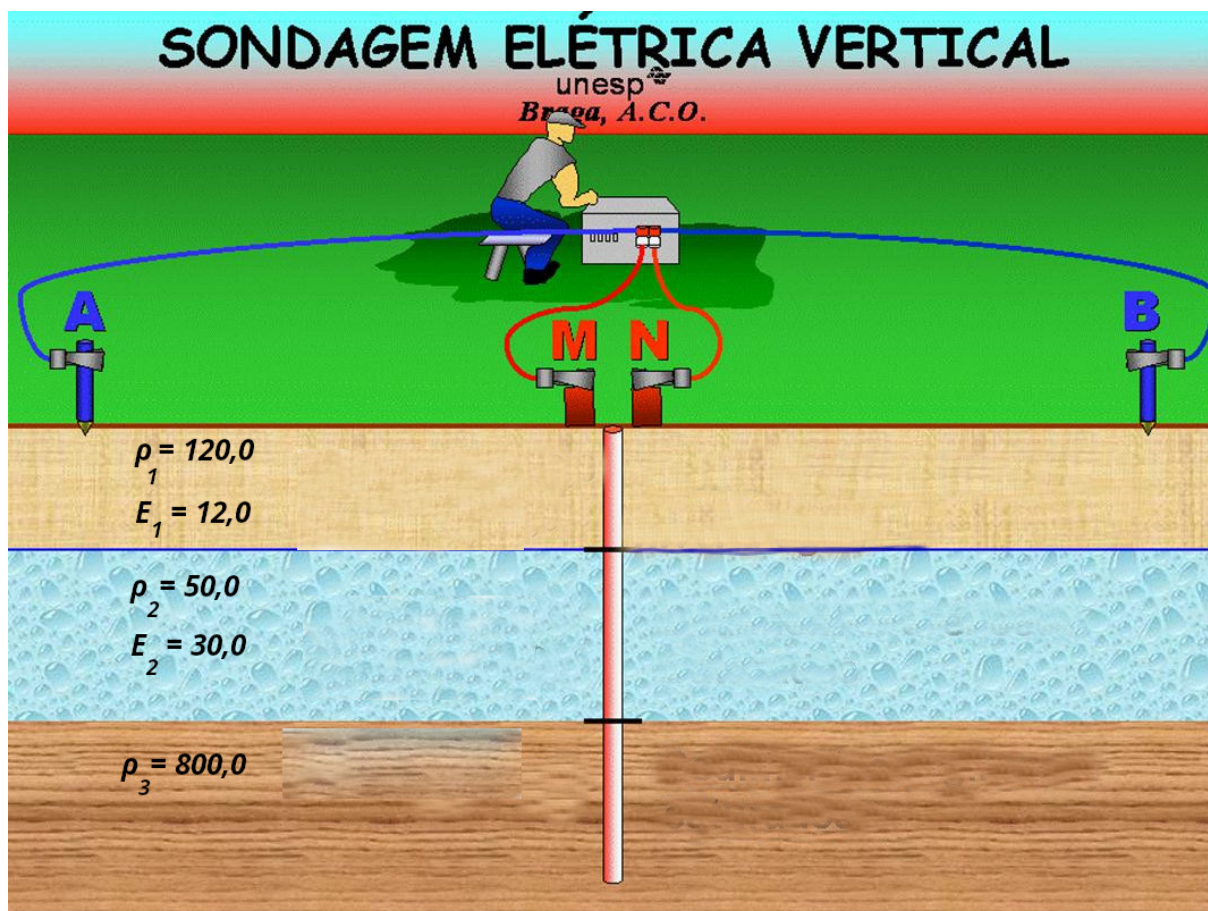


Figura 3 – Sondagem Elétrica Vertical

**Fonte:** Elaboração própria a partir de (BRAGA, 2016)

Quando sua investigação é programada para uma profundidade fixa, as medidas resultam num perfil geoeletrico em uma dimensão (1D) e seus resultados obtidos podem ser expressos por meio de uma curva de resistividade aparente ( $\rho_a$ ) em Ohm metro ( $\Omega m$ ), Figura 4.

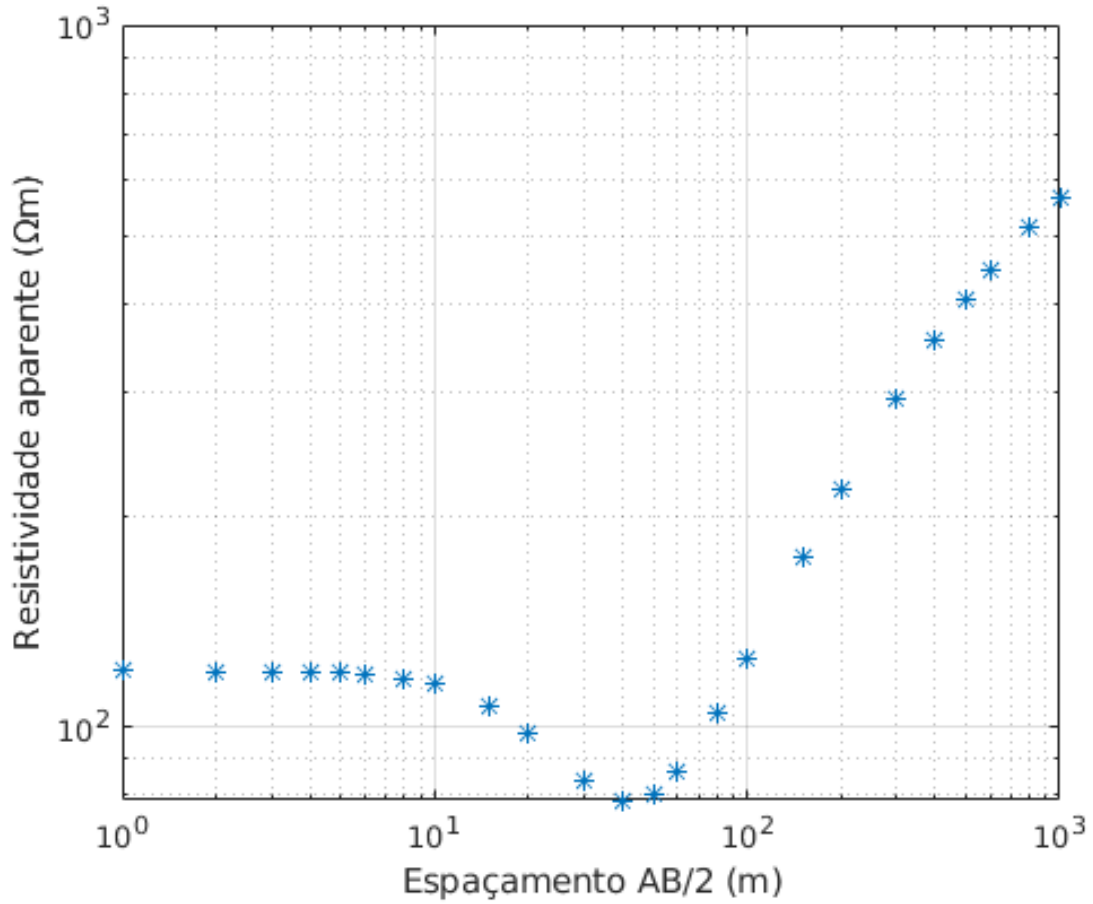


Figura 4 – Curva de resistividades aparentes.

## 2.2 INVERSÃO DE DADOS EM ELETRORRESISTIVIDADE

A Teoria da inversão de dados é utilizada em eletrorresistividade para estimar modelos geológicos que justifiquem os valores das medidas físicas adquiridas durante levantamentos efetuados na superfície. Os dados coletados no campo podem ser expressas através de um vetor de dados  $d = [d_1, d_2, d_3 \dots d_n]^T$ , onde  $T$  significa transposta. Da mesma forma, os parâmetros do modelo podem ser representados como os elementos de um vetor modelo  $m = [\rho_1, \rho_2, \rho_3 \dots \rho_n, E_1, E_2, E_3 \dots E_n - 1]^T$ . O parâmetro do modelo  $(2n - 1)$  é a última camada, sendo o semi-espaço. Os parâmetros  $\rho_n$  e  $E_n$  são os valores de resistividade e espessura, respectivamente.

Esses vetores são relacionados através de um operador de modelagem  $g$ , conforme equação abaixo (KOEFOED, 1979):

$$d = g(m) \quad (2.2)$$

No processo de inversão, estimamos um modelo  $m_{est}$  que minimiza a função objetivo ou função *fitness*, a qual é uma medida de discrepância entre os dados observados

e dados calculados. Conforme a equação abaixo:

$$F = \frac{1}{N} \|d^{obs} - d^{cal}\|^2 \quad (2.3)$$

Os dados observados ( $d_{obs}$ ) e os dados calculados ( $d_{calc}$ ) bem como o número total de dados ( $N$ ) são calculados, para dados sintéticos e reais, usando a equação 2.3 (BENJUMEA *et al.*, 2021).

Na inversão deve ser utilizado uma curva de campo para decidir o número de camadas e resistividades aparente e definir um limite de pesquisa de valores de resistividade e espessura da camada Sen, Bhattacharya e Stoffa (1993) utilizam uma abordagem que serve como direcionamento para o processo de inversão desse trabalho.

## 2.3 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO DO GAFANHOTO

Proposto por Saremi, Mirjalili e Lewis (2017), o Algoritmo de Otimização do Gafanhoto (AOG) ou GOA é um algoritmo que simula o comportamento do gafanhoto em enxame na busca por comida na natureza. Os gafanhotos são insetos conhecidos como uma das pragas mais perigosas que dizimam plantações e prejudicam a agricultura em algumas regiões do mundo. Seu ciclo de vida inclui duas fases: a fase de ninfa (figura 5) é caracterizada pelos seus movimentos lentos e pequenos passos (exploração), já na fase adulta (figura 6), seus movimentos são bruscos e de longo alcance (exploração). Esses movimentos constituem a base para o algoritmo para o AOG.



Figura 5 – Gafanhotos na fase de ninfa

Fonte: (DESERT..., 2016)





Figura 6 – Gafanhotos na fase adulta

**Fonte:** (KAUFMAN, 2020)

A equação 2.4 simula o comportamento de enxame dos gafanhotos:

$$P_i = S_i + G_i + A_i \quad (2.4)$$

onde  $P_i$  indica a posição do  $i$ -ésimo gafanhoto,  $S_i$  representa a interação social entre a solução e os outros gafanhotos,  $G_i$  é a força da gravidade sobre o  $i$ -ésimo gafanhoto e  $A_i$  representa a direção do vento. Para produzir um comportamento aleatório dos gafanhotos, a equação 2.4 pode ser escrita como:

$$P_i = r_1 S_i + r_2 G_i + r_3 A_i \quad (2.5)$$

onde  $r_1$ ,  $r_2$  e  $r_3$  são números aleatórios entre  $[0, 1]$ .

### 2.3.1 INTERAÇÃO SOCIAL

A interação social entre os gafanhotos  $S_i$  é definida como:

$$S_i = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N s(d_{ij}) \widehat{d_{ij}} \quad (2.6)$$

$$s = f \exp^{-r/l} - \exp^{-r} \quad (2.7)$$

Onde  $N$  na equação 2.6 refere-se ao número de gafanhotos, onde  $d_{ij} = |P_j - P_i|$  representa a distância entre o  $i$ -ésimo e o  $j$ -ésimo gafanhoto,  $\hat{d}_{ij} = \frac{P_j - P_i}{d_{ij}}$  representa o vetor unitário.

A equação 2.7 representa a força de repulsão e atração entre gafanhotos, onde  $l$  é a escala de comprimento atrativo e  $f$  é a intensidade da atração. Quando a distância entre dois gafanhotos é entre  $[0, 2.079]$  ocorre repulsão, e quando a distância entre dois gafanhotos é exatamente 2.079, não há nem repulsão, nem atração (sem força), esta área é chamada de zona de conforto. Quando a distância excede 2.079, a força de atração aumenta, depois diminui progressivamente até atingir 4. O valor da função  $s$  é próximo de zero e a distância é maior que 10. Portanto, não podemos usar esta função para forças fortes entre gafanhotos com grandes distâncias entre eles.

A figura abaixo mostra a interação entre gafanhotos em relação à zona de conforto.

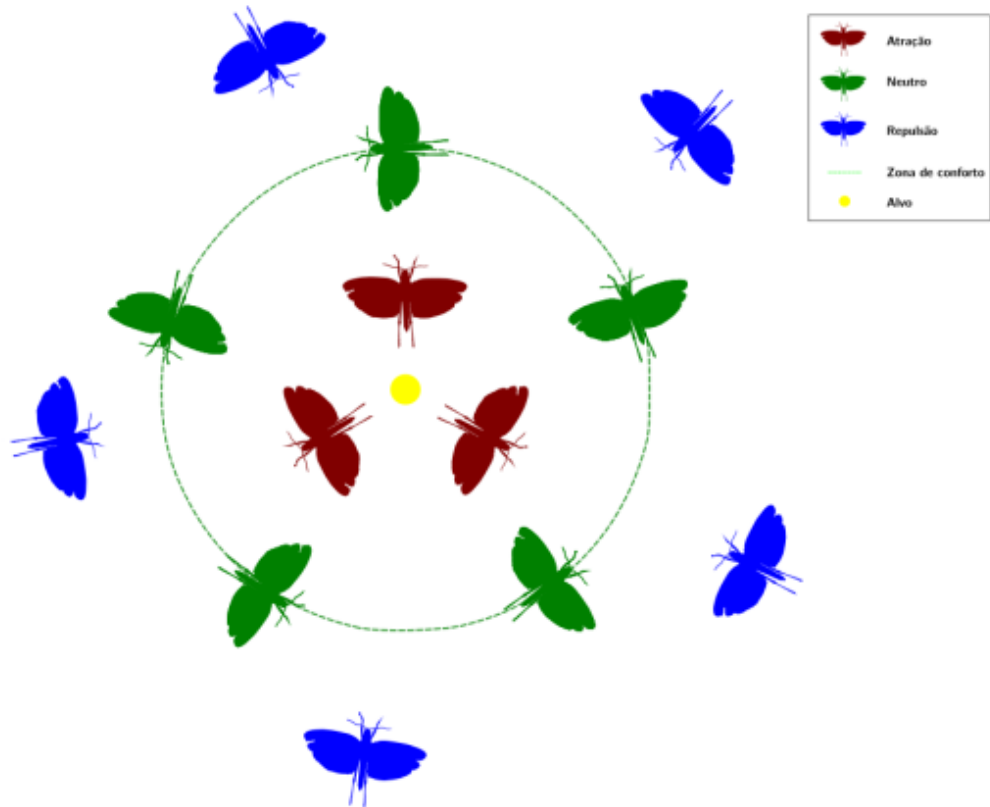


Figura 7 – interação entre os gafanhotos. Gafanhotos de cor vermelha estão sendo atraídos para a zona de conforto  $[0, 2.079]$ , gafanhotos de cor verde estão na zona de conforto  $[2.079]$  e gafanhotos de cor azul estão em repulsão para a zona de conforto  $[2.079, 4]$ .

**Fonte:** O Autor

### 2.3.2 FORÇA DA GRAVIDADE

A força da gravidade  $G_i$  é dada pela equação:

$$G_i = -g\hat{e}_g \quad (2.8)$$

onde  $g$  representa a constante gravitacional e  $\hat{e}_g$  representa um vetor unitário em direção ao centro da Terra.

### 2.3.3 DIREÇÃO DO VENTO

A direção do vento  $A_i$  é dada pela equação:

$$A_i = u\hat{e}_w \quad (2.9)$$

onde  $u$  representa uma constante de deriva e  $\hat{e}_w$  é um vetor unitário na direção do vento.

### 2.3.4 POSIÇÃO DO GAFANHOTO

Quando substituimos os valores na equação 2.6, temos:

$$P_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N s(d_{ij})\widehat{d}_{ij} - g\hat{e}_g + u\hat{e}_w = \sum_{j=1, j \neq i}^N s(|P_j - P_i|)\frac{P_j - P_i}{d_{ij}} - g\hat{e}_g + u\hat{e}_w \quad (2.10)$$

No entanto, Saremi, Mirjalili e Lewis (2017) mostram que a equação 2.10 não pode ser usada diretamente para resolver problemas de otimização, pois os gafanhotos chegam rapidamente à zona de conforto e o sistema de enxame não converge para sua solução (ótimo global). Então a equação é alterada para:

$$P_i^d = c \left( \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N c \frac{ub_d - lb_d}{2} s(|P_j^d - P_i^d|) \frac{P_j - P_i}{d_{ij}} \right) + \hat{T}_d \quad (2.11)$$

onde  $ub_d$  e  $lb_d$  representam os limites superior e inferior na  $d$ -ésima dimensão, respectivamente.  $\hat{T}_d$  é a melhor solução encontrada até o momento no espaço de dimensão  $d$  e  $G_i = 0$ .

O parâmetro  $c_1$  é usado para reduzir os movimentos dos gafanhotos em torno da solução, proporcionando um bom equilíbrio entre intensificação e diversificação. O parâmetro  $c_2$  é usado para reduzir a zona de repulsão, zona de atração e zona de conforto entre gafanhotos proporcionalmente ao número de iterações. Para equilibrar as fases de exploração e exploração usando a abordagem do gafanhoto, o coeficiente  $c$  diminui conforme o número de iterações.

$$c = c_{max} - iter \frac{c_{max} - c_{min}}{Max_{iter}} \quad (2.12)$$

onde  $c_{max}$  e  $c_{min}$  representam o máximo e o mínimo valores de  $c$ , respectivamente,  $t$  é a iteração atual e  $Max_{iter}$  é o número máximo de iterações.

### 2.3.5 PSEUDOCÓDIGO E COMPLEXIDADE

O pseudocódigo do AOG é mostrado no algoritmo 1 e o código-fonte, em várias linguagens de programação, pode ser encontrado na página <https://seyedalimirjalili.com/goa>.

---

**Algorithm 1:** Pseudocódigo do Algoritmo de Otimização do Gafanhoto (AOG)

---

- 1: Gere a população inicial de Gafanhotos aleatoriamente  $P_i (i = 1, 2, \dots, n)$
  - 2: Inicialize  $c_{min}$ ,  $c_{max}$  e número máximo de iterações  $Max_{iter}$
  - 3: Avalie o fitness  $F(P_i)$  de cada gafanhoto  $P_i$
  - 4:  $T$  = a melhor solução
  - 5: **while** ( $iter < Max_{iter}$ ) **do**
  - 6:   Atualize  $c_1$  e  $c_2$  usando a equação 2.12
  - 7:   **for**  $i = 1$  até  $N$  (todos  $N$  gafanhotos na população) **do**
  - 8:     Normalize a distância entre gafanhotos no intervalo  $[1,4]$
  - 9:     Atualize a posição do gafanhoto atual usando a equação 2.11
  - 10:    Traga o gafanhoto atual de volta se ele for fora dos limites
  - 11:   **end for**
  - 12:   Atualize  $T$  se houver uma solução melhor
  - 13:    $iter = iter + 1$
  - 14: **end while**
  - 15: **return** a melhor solução  $T$
- 

O AOG começa gerando a população de gafanhotos e inicializando  $c_{min}$ ,  $c_{max}$ , e número máximo de interações ( $Max_{iter}$ ). Em seguida, avalia-se cada solução calculando seu valor usando a função *fitness*. Após avaliar cada solução na população, atribuí-se a melhor solução de acordo com seu valor. Depois, atualiza-se o parâmetro do coeficiente para encolher as zonas de atração, repulsão e conforto (Equação 2.12).

A função  $s$  da Equação 2.7, divide o espaço de busca em zonas de repulsão, conforto e atração. Quando essa função falha em aplicar as forças entre os gafanhotos, mapeia-se a distância no intervalo  $[1,4]$ .

Em seguida, atualiza-se cada solução na população com base na distância entre o gafanhoto (a solução) e o outro gafanhoto (a outra solução). Também atualiza-se a melhor solução na população e o parâmetro do coeficiente decrescente usando a Equação 2.11.

No caso de um gafanhoto violar os limites após atualiza-se a solução, traz o gafanhoto de volta ao seu domínio. Em seguida, repete-se os três passos anteriores para cada solução na população.



Depois, atualiza e avalia cada solução para atribuir a melhor na população. Repete as operações gerais até atingir o número máximo de iterações para retornar a melhor solução global.

A complexidade de tempo do [AOG](#) está diretamente relacionada ao número de agentes( $n$ ) e número de interações ( $n \times Max_{iter}$ ). Assim,  $O(n \times Max_{iter})$  representa a complexidade de tempo desse algoritmo ([BOUGUEZZI, 2022](#)).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para investigar o desempenho do [AOG](#), foram feitos testes em inversões com dados sintéticos e dados reais. Utilizou-se a ferramenta MATLAB nos experimentos.

Obteve-se os dados das sondagens elétricas verticais de Schlumberger dos modelos sintéticos baseados em [Sen, Bhattacharya e Stoffa \(1993\)](#) sendo aplicados 5% de ruído gaussiano pseudoaleatório em ambos os dados sintéticos.

Foram feitas 10 inversões para cada um dos modelos sintéticos. Cada inversão foi realizada pelo [AOG](#) com 1000 iterações e uma população de 100 gafanhotos para o modelo com três camadas e 100 gafanhotos para o modelo de 5 camadas. Com o resultado das inversões, foi obtida a solução média e desvio padrão, gerando diferentes modelos médios.

Já no dado real, baseia-se em [Bhattacharya e Patra \(1968\)](#), foram feitas 10 inversões com 1000 iterações e uma população de 150 gafanhotos para o modelo real de três camadas. Com o resultado das inversões, foi obtida a solução média e desvio padrão, gerando diferentes modelos médios.

Também serão exibidas figuras que mostram as curvas de convergência da função *fitness* ou função objetivo. É importante ressaltar que cada figura mostra um exemplo de uma única iteração dentre as 1000 iterações.

#### 3.1 INVERSÃO DE DADOS SINTÉTICOS EM TRÊS CAMADAS

O desempenho do [AOG](#) na inversão em uma [SEV](#) é primeiramente investigado em dados sintéticos gerados a partir de um modelo de três camadas. Na tabela 1 contém os valores verdadeiros e espaço de busca utilizado na inversão.  $\rho_i$  e  $E_i$  correspondem, respectivamente, aos valores de resistividade e espessura da camada  $i$ . A última camada tem espessura infinita. O valor mínimo e o valor máximo correspondem aos limites do espaço de busca.

Tabela 1 – Parâmetros para modelo de três camadas.

Parâmetros	Valores Verdadeiros	Mínimo	Máximo
$\rho_1(\Omega\text{m})$	10	5	15
$\rho_2(\Omega\text{m})$	390	15	500
$\rho_3(\Omega\text{m})$	10	1	20
$E_1(\text{m})$	10	1	20
$E_2(\text{m})$	250	100	500

A solução média e desvio padrão das 10 inversões entre o modelo verdadeiro e o modelo estimado em três camadas com ruído estão descritos na tabela 2.

Tabela 2 – Média e desvio padrão de 10 inversões.

Parâmetros	Valor Médio	Desvio Padrão
$\rho_1(\Omega\text{m})$	10.07	1.10
$\rho_2(\Omega\text{m})$	371.41	12.12
$\rho_3(\Omega\text{m})$	9.10	6.0
$E_1(\text{m})$	10.01	1.13
$E_2(\text{m})$	263.39	18.18

A figura 8 mostra a curva de resistividade média com 100 ganhotos e 1000 interações. Nota-se que o AOG recuperou muito entre dados da resistividade aparente observada (círculos vermelhos) e resistividade aparente calculada teoricamente (linha sólida azul).

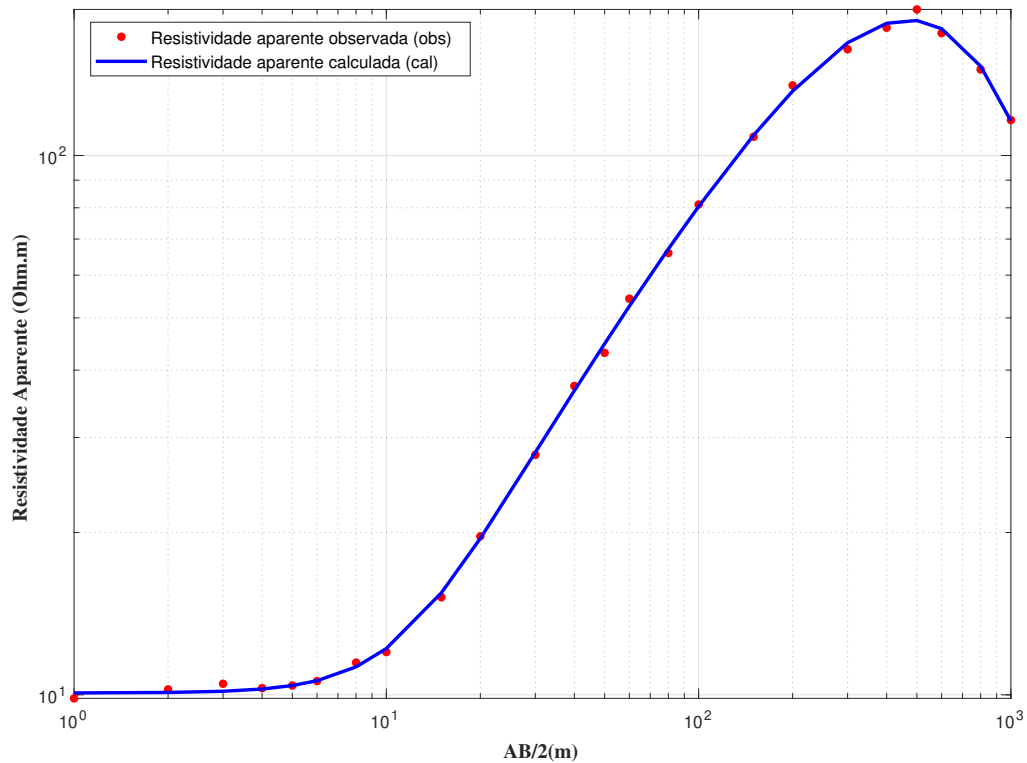


Figura 8 – Resultados da inversão do modelo sintético de 3 camadas usando AOG, comparação entre dados da resistividade aparente observada (círculos vermelhos) e média da resistividade aparente calculada teoricamente (linha sólida azul).

Na figura 9 mostra o modelo de camadas obtidos com a inversão utilizando o AOG. A Camada um é bem resolvida. A segunda e terceira camada também apresenta

boa resolução, embora o modelo invertido superestime um pouco a resistividade dessa camada.

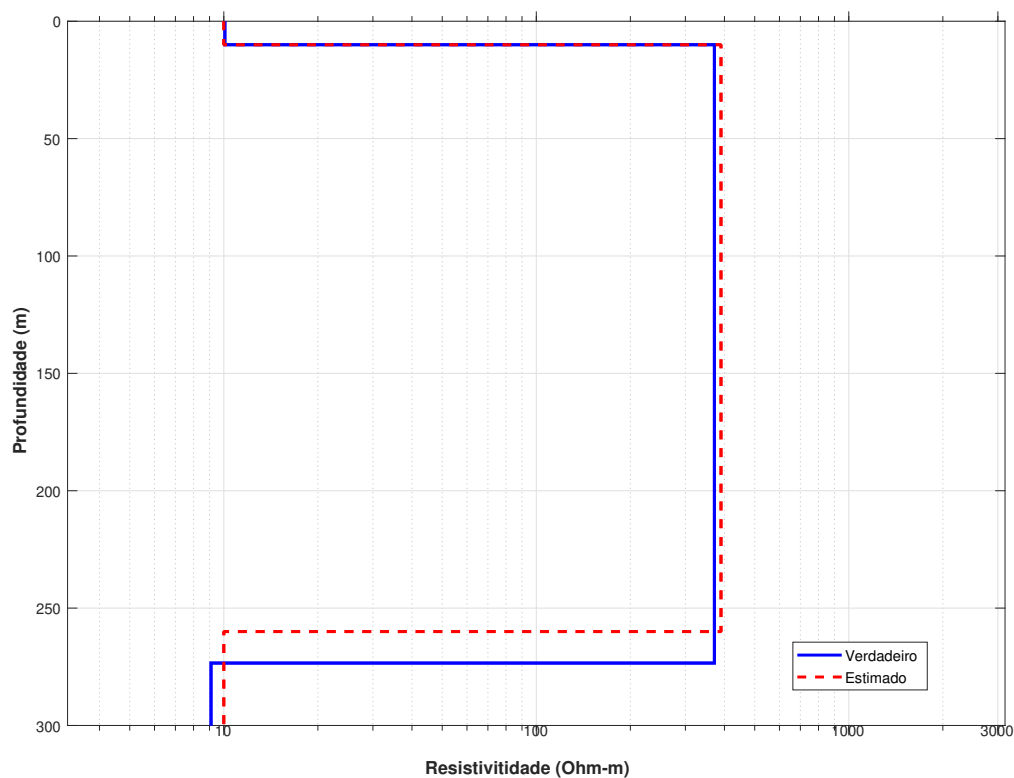


Figura 9 – Modelo verdadeiro (linha sólida azul) e modelo médio estimado para o AOG (linha tracejada vermelha).

A Figura 10 representa uma curva típica de uma inversão, percebe-se que a curva converge, porém não necessariamente para o modelo ótimo.

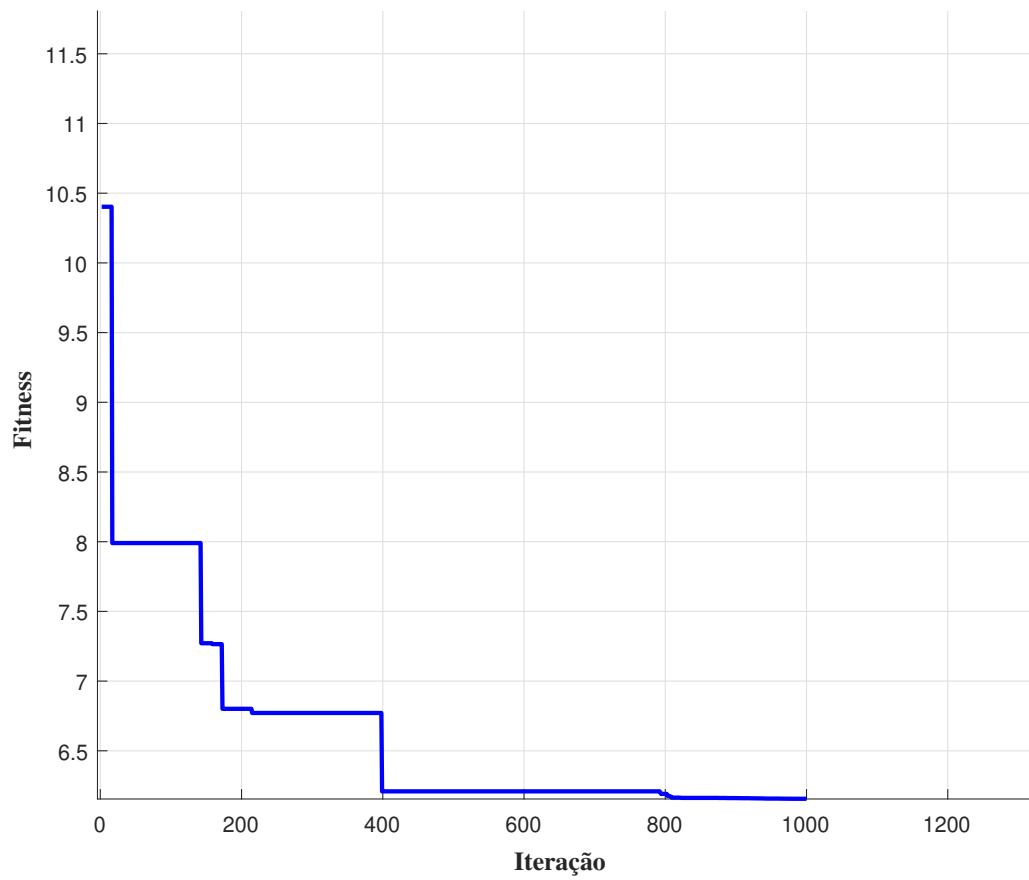


Figura 10 – Curva típica de convergência do modelo sintético de 3 camadas usando o AOG de uma inversão.

## 3.2 INVERSÃO DE DADOS SINTÉTICOS EM CINCO CAMADAS

O desempenho do [AOG](#) é também investigado em uma [SEV](#) de cinco camadas. Os espaços de busca (valores máximo e mínimo) dos parâmetros do modelo são mostrados na tabela [3](#).

Tabela 3 – Parâmetros para modelo de cinco camadas.

Parâmetros	Valores Verdadeiros	Mínimo	Máximo
$\rho_1(\Omega\text{m})$	10	1	20
$\rho_2(\Omega\text{m})$	50	30	60
$\rho_3(\Omega\text{m})$	100	50	150
$\rho_4(\Omega\text{m})$	20	10 0	40
$\rho_5(\Omega\text{m})$	400	200	600
$E_1(\text{m})$	2	0.5	5
$E_2(\text{m})$	15	10	20
$E_3(\text{m})$	20	10	30
$E_4(\text{m})$	25	10	50

A solução média e desvio padrão das 10 inversões entre o modelo verdadeiro e o modelos estimado da inversão em cinco camadas estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 – Média e desvio padrão de 10 inversões.

Parâmetros	Valor Médio	Desvio Padrão
$\rho_1(\Omega\text{m})$	11.93	4.10
$\rho_2(\Omega\text{m})$	55.76	7.62
$\rho_3(\Omega\text{m})$	12.11	32.39
$\rho_4(\Omega\text{m})$	19.10	6.01
$\rho_5(\Omega\text{m})$	362.05	4.38
$E_1(\text{m})$	3.08	1.44
$E_2(\text{m})$	14.74	4.00
$E_3(\text{m})$	16.81	7.57
$E_4(\text{m})$	23.58	8.58

Com 100 gafanhotos em 1000 iterações nota-se que a [AOG](#) recuperou bem a parâmetros da inversão do modelo verdadeiro (linha azul sólida) em comparação como modelo estimado (linhas tracejada vermelha) (Figura [12](#)).

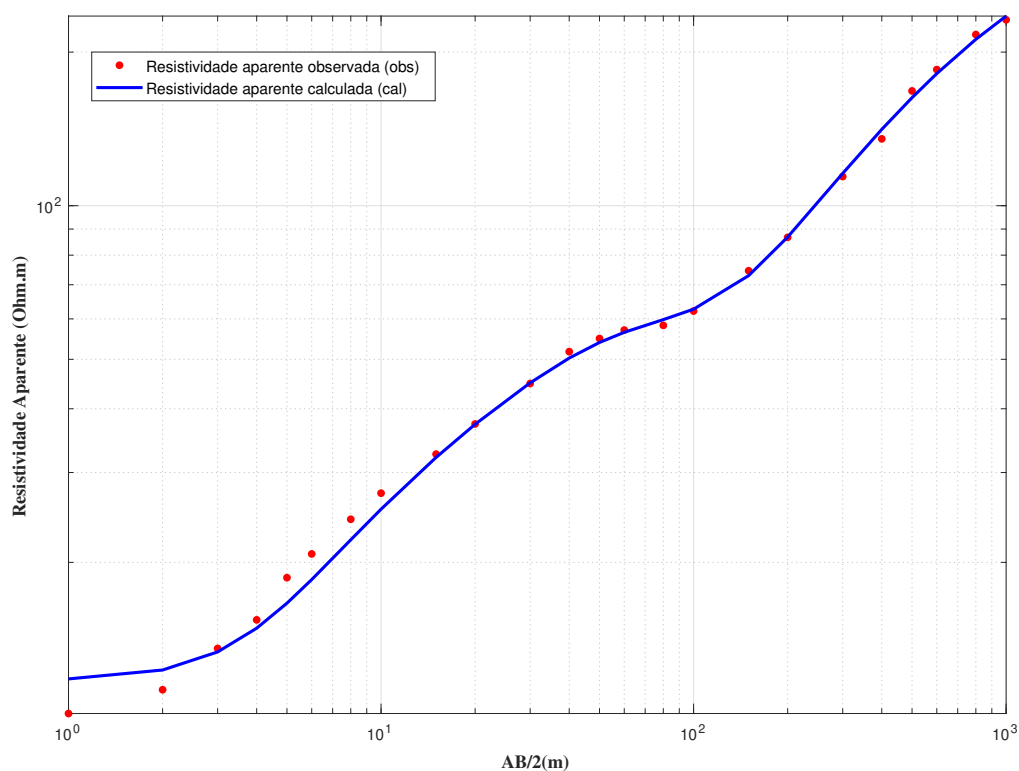


Figura 11 – Resultados da inversão do modelo sintético de 5 camadas usando AOG, comparação entre dados da resistividade aparente observada (círculos vermelhos) e resistividade aparente calculada teoricamente (linha sólida azul) para o melhor ajuste do modelo AOG.

Na figura 12 mostra o modelo de camadas obtidos com a inversão utilizando o AOG. A três camadas apresentam uma resolução mediana, embora o modelo invertido superestime a resistividade dessa camada, é aceitável.

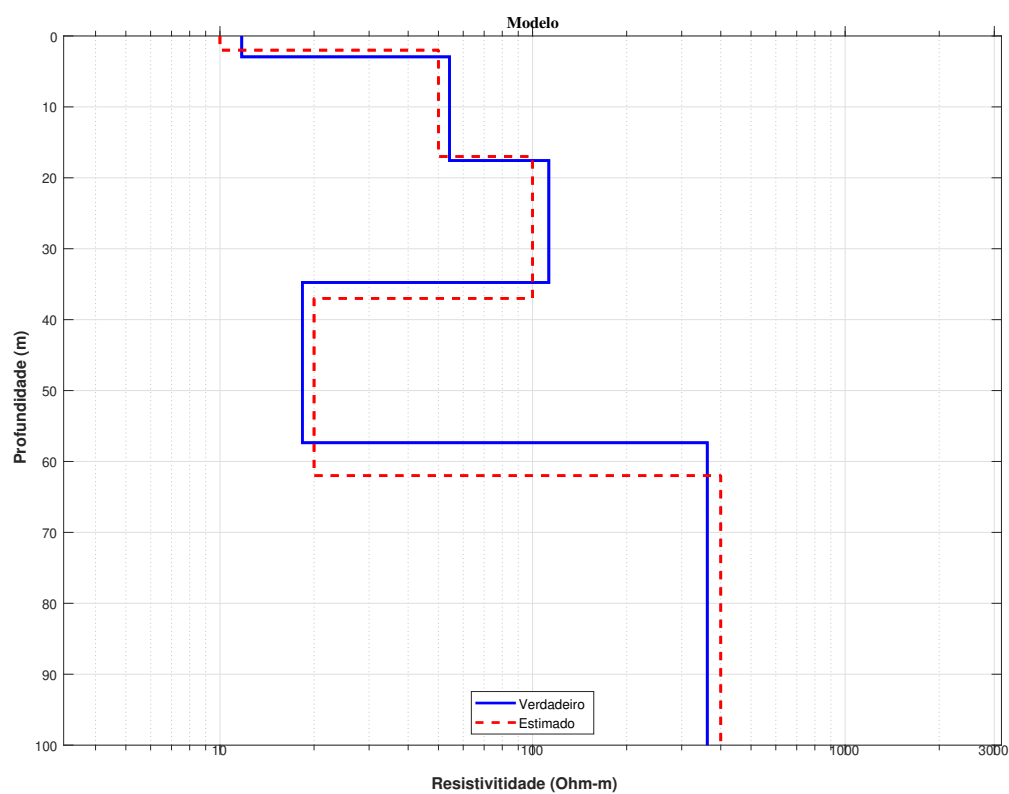


Figura 12 – Modelo de camadas

A Figura 13 representa uma curva típica de uma inversão, percebe-se que a curva converge bem para a solução da inversão.



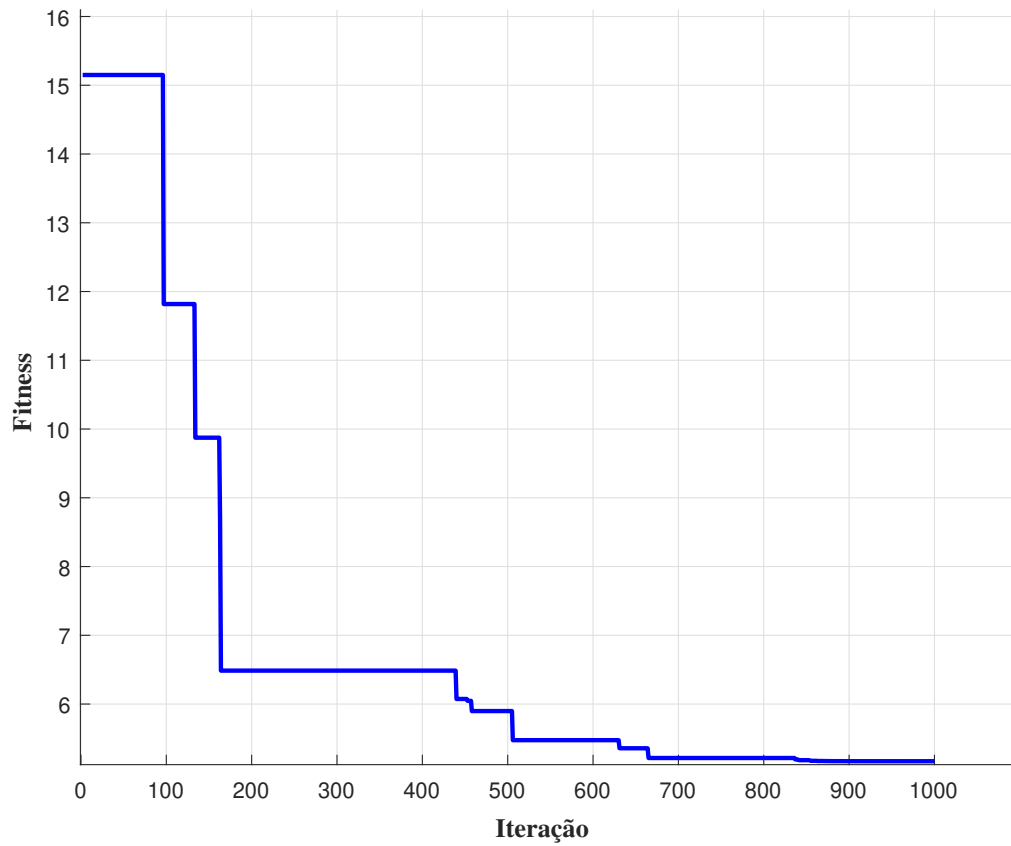


Figura 13 – Curva típica de convergência do modelo sintético de 5 camadas usando o AOG de uma inversão.

### 3.3 INVERSÃO DE DADOS REAIS EM TRÊS CAMADAS

O AOG, na inversão em dados reais, foi também investigado nesse trabalho. A Figura 14 ilustra o resultado de inversão do AOG em uma curva de resistividade do modelo 3 em comparação com o resultado do AOG. Os espaços de busca (valores máximo e mínimo) dos parâmetros do modelo foram baseados em (SEN; BHATTACHARYA; STOFFA, 1993) e são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros para modelo real de três camadas.

Parâmetros	Mínimo	Máximo
$\rho_1(\Omega\text{m})$	10	100
$\rho_2(\Omega\text{m})$	1	10
$\rho_3(\Omega\text{m})$	5	20
$E_1(\text{m})$	1	5
$E_2(\text{m})$	10	25

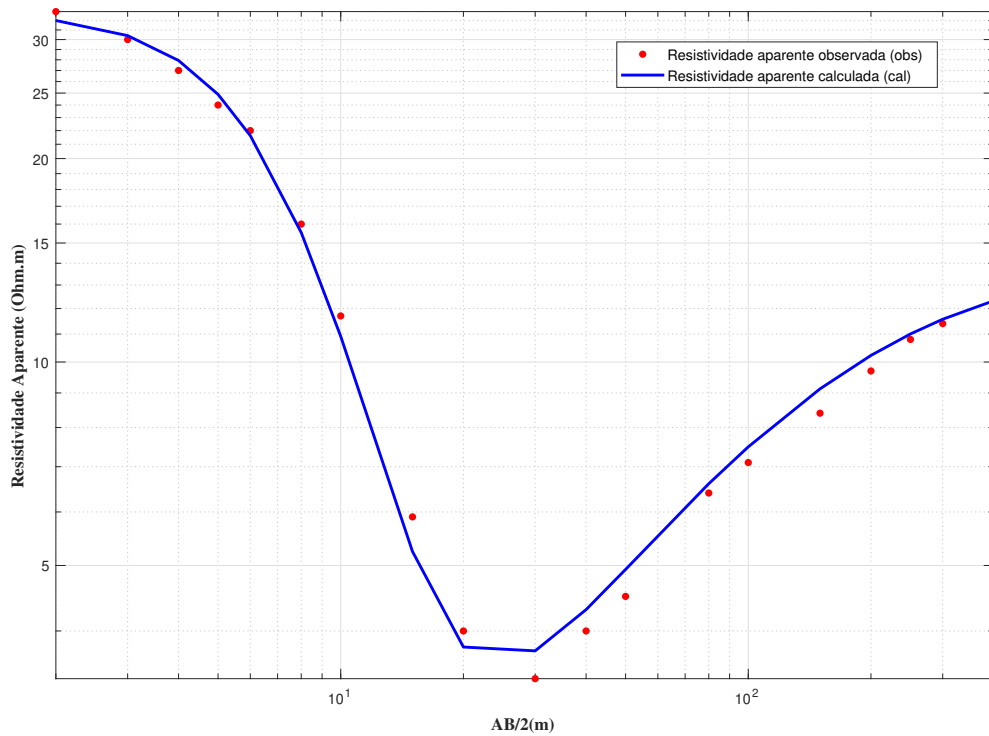


Figura 14 – Resultados da inversão do modelo real de 3 camadas usando o AOG, comparação entre dados da resistividade aparente observada (círculos vermelhos) e resistividade aparente calculada teoricamente (linha sólida azul) para o ajuste do modelo AOG.

A solução média das 10 inversões entre o modelo verdadeiro e o modelos estimado da inversão em três camadas estão descritos na Tabela 6. Com 150 gafanhotos em 1000 iterações o AOG se ajusta aos dados de resistividade aparente.

Tabela 6 – Média e desvio padrão de 10 inversões.

Parâmetros	Valor Médio	Desvio Padrão
$\rho_1(\Omega\text{m})$	32.82	0.82
$\rho_2(\Omega\text{m})$	2.67	1.01
$\rho_3(\Omega\text{m})$	14.00	1.23
$E_1(\text{m})$	3.83	0.30
$E_2(\text{m})$	19.74	5.48

Na figura abaixo representa o modelo de camadas da inversão com o uso do AOG. Percebe-se que o AOG resolve bem as três camadas.

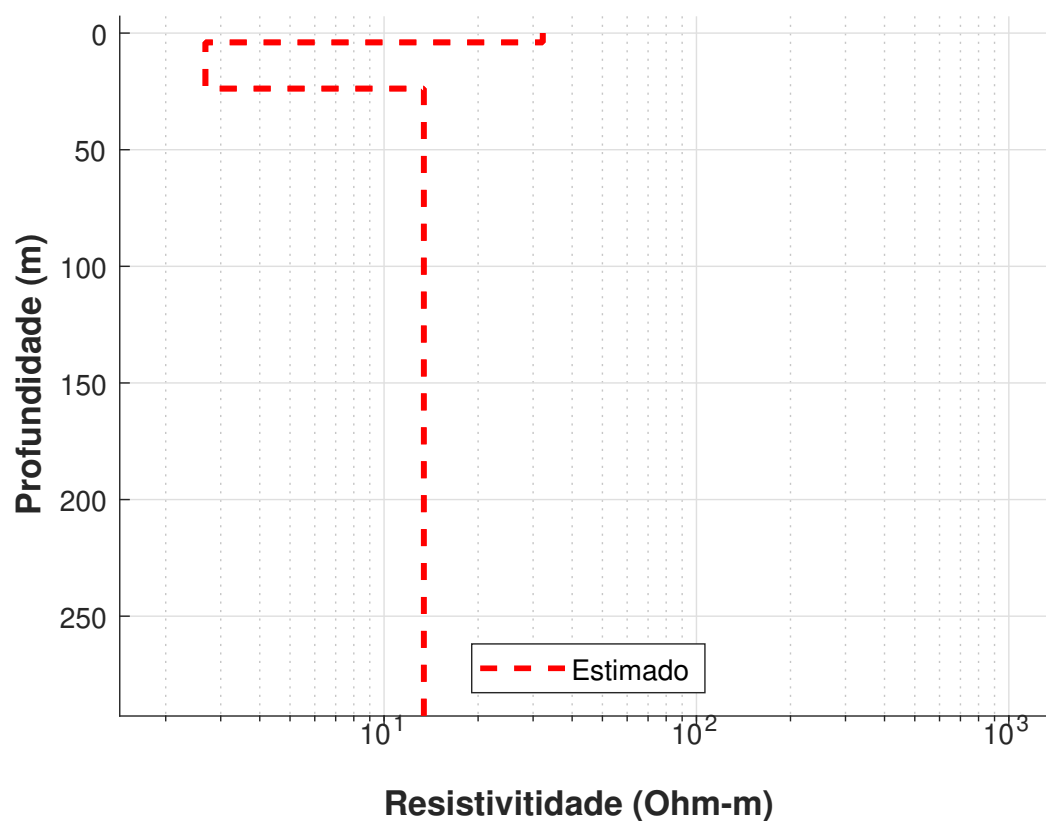


Figura 15 – Modelo verdadeiro (linha sólida azul) e modelo médio estimado para o AOG (linha tracejada vermelha).

A Figura 16 representa uma curva típica de uma inversão entre 10 inversões foi representada a curva da primeira inversão. Percebe-se que a curva converge bem para a solução da inversão.

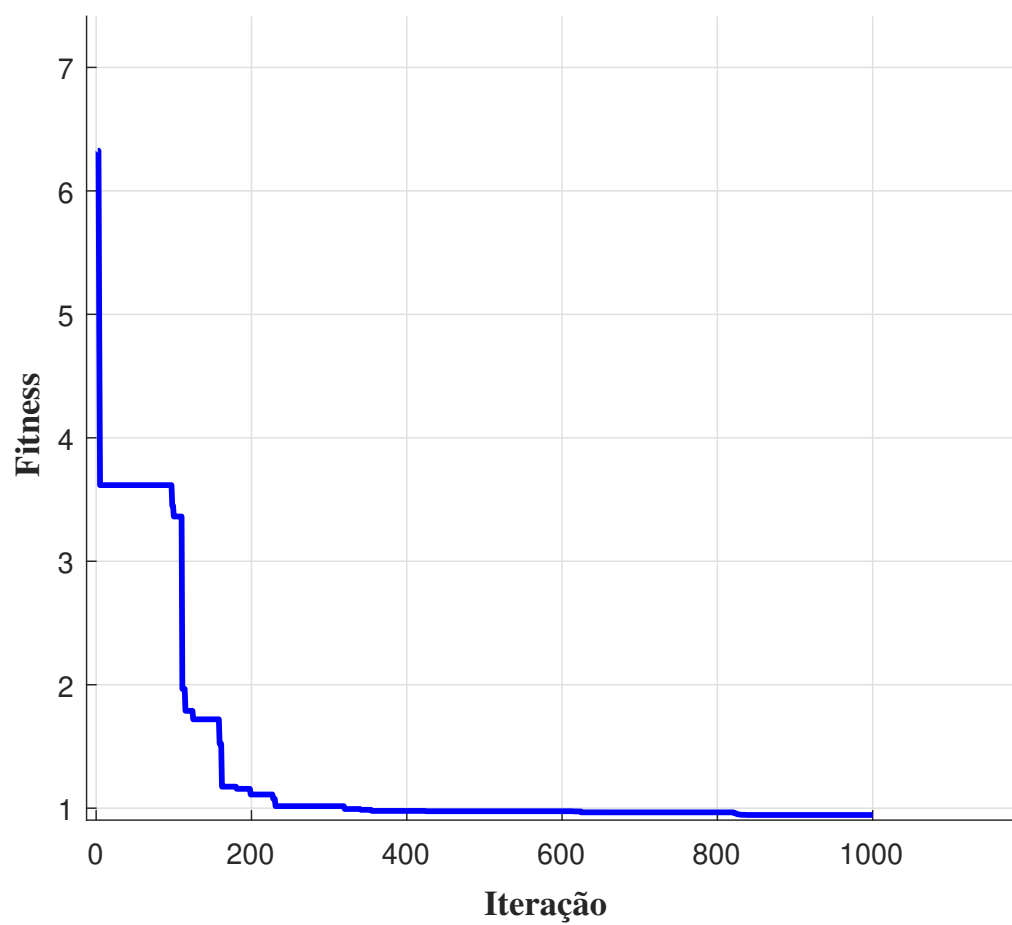


Figura 16 – Curva típica de convergência do modelo real de 3 camadas usando o AOG de uma inversão.

## 4 CONCLUSÃO

Neste trabalho apresenta-se uma metodologia para inversão em eletrorresistividade usando o [AOG](#). Os resultados mostraram que o algoritmo pode ser usado em inversões 1D, embora, com o aumento da quantidade camadas, é preciso aumentar a quantidade de agentes (gafanhotos) para se ter uma boa resolução do problema inverso. O tempo de execução do algoritmo para modelos com camadas acima de três pode ser custoso, dependendo da máquina que está sendo executada.

# REFERÊNCIAS

- BENJUMEA, J. L. A.; BORTOLOZO, C.; BARBOZA, F. M.; VASCONCELOS, M. 1D Inversion of vertical electrical sounding (VES) using a Whale Optimization Algorithm (WOA). In: **Proceedings of the 17th International Congress of the Brazilian Geophysical Society&Expogef**. Brazilian Geophysical Society, 2021. Disponível em: <[https://sbgf.org.br/mysbgf/eventos/expanded\\_abstracts/17th\\_CISBGf/1237202107131521321D\\_inv\\_sevs\\_WOA.pdf](https://sbgf.org.br/mysbgf/eventos/expanded_abstracts/17th_CISBGf/1237202107131521321D_inv_sevs_WOA.pdf)>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 19.
- BHATTACHARYA, P.; PATRA, H. Direct current geoelectric sounding; principles and interpretation. Elsevier Pub. Co., 1968. Citado na página 25.
- BORJA, M. S. Modelagem e inversão de eletrorresistividade 1d usando Fortran moderno: arranjos Wenner e Schlumberger. 2018. Citado na página 13.
- BOUGUEZZI, S. **Grasshopper Optimization Algorithm**. 2022. Disponível em: <<https://www.baeldung.com/cs/grasshopper-optimization-algorithm>>. Citado na página 24.
- BRAGA, A. C. d. O. B. Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática. **Aleph**, nov. 2006. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/116123>>. Citado na página 15.
- BRAGA, A. C. de O. **Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrogeologia**. São Paulo: Oficina de textos, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 16 e 17.
- DESERT Locust outbreak in Yemen leaves surrounding countries potentially at risk. 2016. Disponível em: <<https://news.un.org/en/story/2016/04/526512>>. Citado na página 19.
- KAUFMAN, M. **Why today's biblical locust swarms can't be stopped**. 2020. Section: Science. Disponível em: <<https://mashable.com/article/locust-swarm-africa-explained>>. Citado na página 20.
- KEAREY; BROOKS; HILL. **An Introduction to Geophysical Exploration**. 3. ed. Malden, MA: John Wiley & Sons, 2002. ISBN 978-0-632-04929-5. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 15.
- KOEFOED, O. Resistivity sounding measurements, elsevier scientific publishing company. **Geosounding principles**, v. 1, p. 19–27, 1979. Citado na página 18.
- MARTÍNEZ, J. L. F.; GONZALO, E. G.; ÁLVAREZ, J. P. F.; KUZMA, H. A.; PÉREZ, C. O. M. 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. Citado na página 13.
- NASCIMENTO, P. F. Inversão de dados geofísicos do Brasil Central. abr. 2011. Accepted: 2011-10-04T11:55:45Z. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/9371>>. Citado na página 13.

SAREMI, S.; MIRJALILI, S.; LEWIS, A. Grasshopper optimisation algorithm: Theory and application. **Advances in Engineering Software**, v. 105, p. 30–47, 2017. ISSN 0965-9978. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997816305646>>. Citado 3 vezes nas páginas 13, 19 e 22.

SEN, M. K.; BHATTACHARYA, B. B.; STOFFA, P. L. Nonlinear inversion of resistivity sounding data. **Geophysics**, v. 58, n. 4, p. 496–507, 04 1993. ISSN 0016-8033. Disponível em: <<https://doi.org/10.1190/1.1443432>>. Citado 4 vezes nas páginas 13, 19, 25 e 32.

SIYAM, A. T. B. I. A. N. W. Hybrid genetic algorithms in view of the evolution theories with application for the electrical sounding method. **Geophysical Prospecting**, John Wiley and Sons, v. 55, p. 393–406, 2007. ISSN 0016-8025,1365-2478. Disponível em: <<http://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2007.00588.x>>. Citado na página 13.