



COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

COMPONENTE VERTICAL MAGNÉTICO DEVIDO A UMA BOBINA RETANGULAR SOBRE UMA TERRA ESTRATIFICADA

Ivã Luis de Almeida Nazaré

Universidade Federal da Bahia

15 de dezembro de 2011



Objetivo

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

- Modelo direto
- Bobina retangular
- Componente vertical magnético
- Terra estratificada
- Ponto de observação: interior e exterior à bobina transmissora



Metodologia

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luís de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

- Avaliação analítica
- Avaliação numérica



Avaliação analítica

Equação de Helmholtz e solução de Green

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

- Equação heterogênea
- Onda monocromática
- Estado estacionário

$$\nabla^2 v(\vec{r}) + \chi^2 v(\vec{r}) = -f(\vec{r})$$

- Solução de Green

$$G(r) = \frac{e^{-i\chi r}}{4\pi r}$$



Avaliação analítica

Potencial vetor

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

- Fonte
- Dipolo elétrico vertical
- Orientação sobre o eixo x cartesiano

$$\mathbf{J}(r) = I \mathbf{ds} \delta(x) \delta(y) \delta(z)$$

- Solução potencial

$$\mathbf{A}(r) = \frac{I \mathbf{ds}}{4\pi r} e^{-i\chi r} \mathbf{i}$$



Avaliação analítica

Potencial, modo TE

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

- Potencial no modo TE , dipolo elétrico horizontal

$$F(x, y, z) = -\frac{I ds \hat{z}_0}{8\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(\lambda) dk_x dk_y$$

$$R(\lambda) = \frac{ik_y}{\lambda^3} e^{-\lambda h} (e^{-\lambda z} + r_{TE} e^{\lambda z}) e^{i(k_x x + k_y y)}$$

- $\hat{z}_0 = i\omega\mu_0$
- $\lambda = (k_x^2 + k_y^2)^{\frac{1}{2}}$
- Aplicações geofísicas, baixa frequência

$$r_{TE} = \frac{\lambda - u_n}{\lambda + u_n}$$



Avaliação analítica

Potencial, modo *TE*

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luís de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

- Quantidade intrínseca da camada
- Dependência da frequência
- Referente as medidas no topo da camada n

$$u_n = (k^2 - \chi_n^2)^{\frac{1}{2}}$$

- $\chi_n = (\omega^2 \mu_n \varepsilon_n - i\omega \mu_n \sigma_n)^{\frac{1}{2}}$

$$\hat{u}_n = u_n \frac{1 + U(\hat{u}_{n+1}, u_n) e^{-2u_n h_n}}{1 - U(\hat{u}_{n+1}, u_n) e^{-2u_n h_n}}$$

- $U(\hat{u}_{n+1}, u_n) = \frac{\hat{u}_{n+1} - u_n}{\hat{u}_{n+1} + u_n}$
- quando $n=N$, $\hat{u}_N = u_N$



Avaliação analítica

Componente magnético vertical

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

- Cálculo do componente vertical magnético

$$H_z = \frac{1}{\hat{z}_0} \frac{\partial^2 F}{\partial z^2}$$

$$H_z = -\frac{Ids}{4\pi} \frac{y}{\rho} \left[\int_0^\infty (1 + r_{TE}) \lambda e^{-\lambda z} J_1(\lambda \rho) d\lambda \right]$$

- $\rho = (x^2 + y^2)^{\frac{1}{2}}$



Avaliação analítica

Bobina retangular

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

- Soma das contribuições de um conjunto de dipolos alinhados
- Translação
- Soma das linhas
- Bobina retangular, $2a \times 2b$

$$H_z = H_z^{-b} + H_z^{-a} + H_z^b + H_z^a$$



Avaliação analítica

Bobina retangular

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

$$H_z^{-b} = -\frac{I(b-y)}{4\pi} \int_{-a}^a \left[\int_0^\infty Q(\lambda\rho) J_1(\lambda\rho) d\lambda \right] dx'$$

$$\blacksquare \rho = [(x' - x)^2 + (b - y)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$H_z^{-a} = -\frac{I(a-x)}{4\pi} \int_{-b}^b \left[\int_0^\infty Q(\lambda\rho) J_1(\lambda\rho) d\lambda \right] dy'$$

$$\blacksquare \rho = [(a - x)^2 + (y' - y)^2]^{\frac{1}{2}}$$



Avaliação analítica

Bobina retangular

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

$$H_z^b = -\frac{I(b+y)}{4\pi} \int_{-a}^a \left[\int_0^\infty Q(\lambda\rho) J_1(\lambda\rho) d\lambda \right] dx'$$

$$\blacksquare \rho = [(x' - x)^2 + (b + y)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$H_z^a = -\frac{I}{4\pi} \int_{-b}^b \left[\int_0^\infty Q(\lambda\rho) J_1(\lambda\rho) d\lambda \right] dy'$$

$$\blacksquare \rho = [(a + x)^2 + (y' - y)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$Q(\lambda\rho) = \frac{(1 + r_{TE})}{\rho} \lambda e^{-\lambda z}$$



Avaliação analítica

Bobina retangular

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

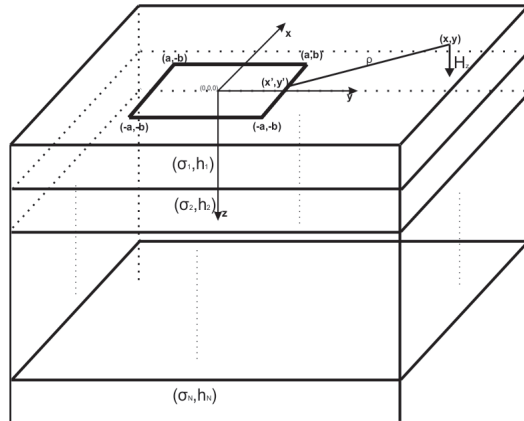
Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos





Resultados e discussões

O que se usou e o que se mede

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

- Linguagem de programação fortran
- Integrais impróprias: Filtro digital complexo, Anderson (1975)
- Integrais definidas: Método numérico integral de Newton
- Amplitude e fase do campo
- Amplitude normalizada do campo no espaço livre

$$H_z^0 = \frac{I}{4\pi} (A_0 + B_0 + C_0 + D_0)$$

- A_0, B_0, C_0 e D_0
- Dependência com os parâmetros geométricos



Resultados e discussões

Análise da condutividade

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

- Indução central
- 0,0002 S/m, 0,002 S/m, 0,02 S/m e 0,2 S/m
- 50 m e 500 m
- 120 Hz e 4600 Hz



Resultados e discussões

Análise da condutividade

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

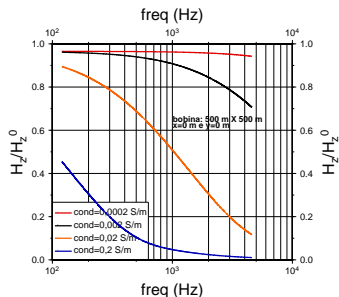
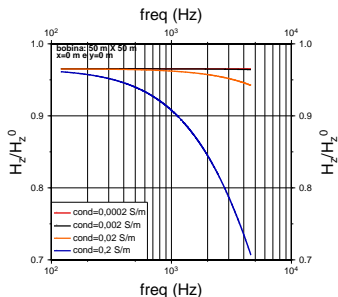


Figura: Avaliação de condutividade com o arranjo de indução central



Resultados e discussões

Avaliação do parâmetro z

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

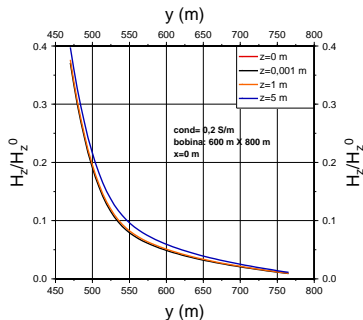
Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

- Perfis de amplitude
- $600 \text{ m} \times 800 \text{ m}$, 2180 Hz , $0,2 \text{ S/m}$
- Diferentes espaçamentos
- Alturas inferiores a uma unidade do metro
- Ausência de mudanças





Resultados e discussões

Avaliação comparativa, modelo de duas camadas

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luís de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

- Perfis de fase
- Melhor resolução que os perfis de amplitude
- $600 \text{ m} \times 400 \text{ m}$, $\sigma_1=0,02 \text{ S/m}$ e $\sigma_2=0,001 \text{ S/m}$,
1344 Hz
- Diferentes valores de profundidade



Resultados e discussões

Avaliação comparativa, modelo de duas camadas

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

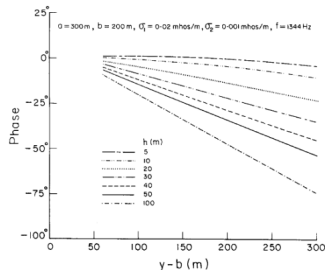
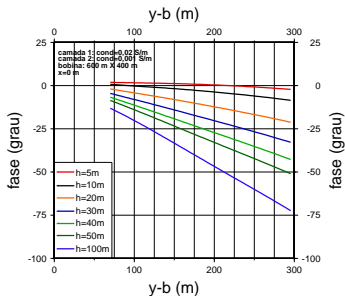


Figura: Perfis de fase utilizados na validação da precisão do programa desenvolvido para a análise numérica através da comparação com o trabalho de Poddar (1982)



Resultados e discussões

Modelo de duas camadas, variação do comprimento do dipolo

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

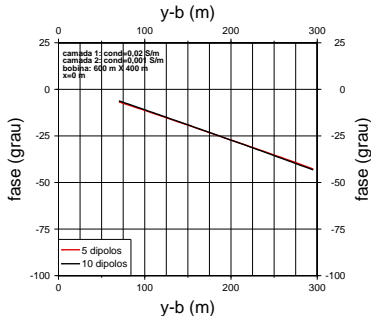
Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

- Profundidade da discordância 40 m
- $600 \text{ m} \times 800 \text{ m}$, 2180 Hz, 0,2 S/m
- Variação no comprimento do dipolo
- Cinco ou dez dipolos
- Maior precisão da integração





Resultados e discussões

Modelo de duas camadas

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

- Indução central, $x=0$ m e $y=500$ m
- Amplitude e fase do campo, perfis
- 0,0002 S/m, 0,2 S/m, bobina quadrada, 800 m de lado
- 120 Hz a 4600 Hz
- 470 m a 820 m, 2520 Hz
- Diferentes espessuras para a primeira camada



Resultados e discussões

Modelo de duas camadas, indução central

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

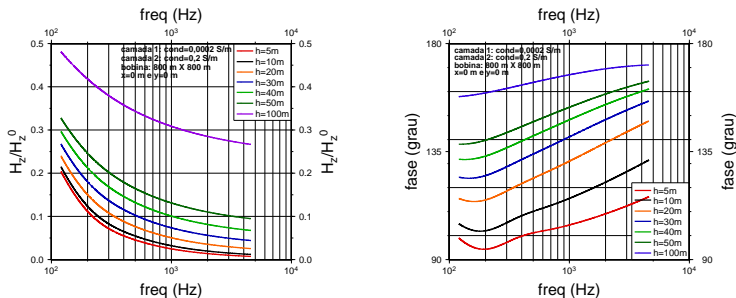


Figura: Amplitude e fase do componente vertical magnético, indução central, modelo de duas camadas



Resultados e discussões

Modelo de duas camadas, ponto de observação exterior a bobina

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

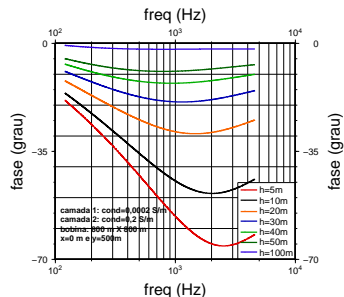
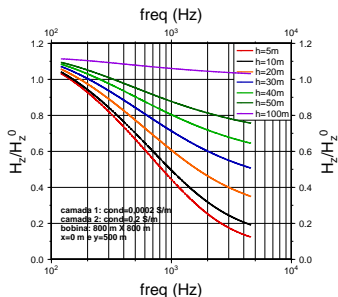


Figura: Amplitude e fase do componente vertical magnético quando o ponto de observação é exterior à fonte, modelo de duas camadas



Resultados e discussões

Modelo de duas camadas, perfis de amplitude e fase

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

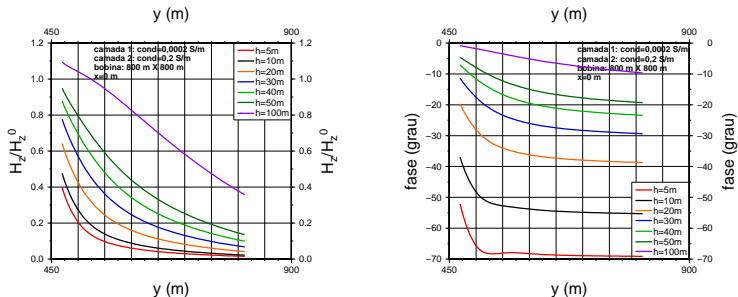


Figura: Perfis de amplitude e fase, modelo de duas camadas



Resultados e discussões

Modelo de três camadas

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

- Amplitude, fase do campo, perfis
- Primeira camada, 10 m
- Indução central, $x=0$ m e $y=500$ m
- Avaliação da influência da camada intermediária muitas vezes mais condutiva
- 0,0002 S/m, 1 S/m e 0,2 S/m
- 80 Hz e 3000 Hz
- 1580 Hz



Resultados e discussões

Modelo de três camadas, indução central, amplitude e fase

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ívã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

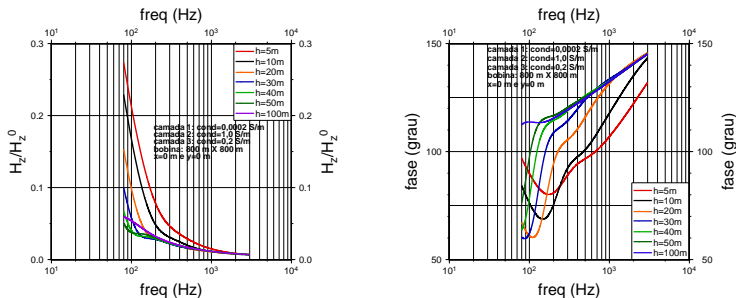


Figura: Amplitude e fase do componente vertical magnético, indução central, modelo de três camadas



Resultados e discussões

Modelo de três camadas, ponto de observação exterior a fonte, amplitude e fase

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

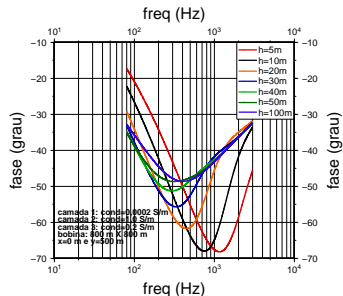
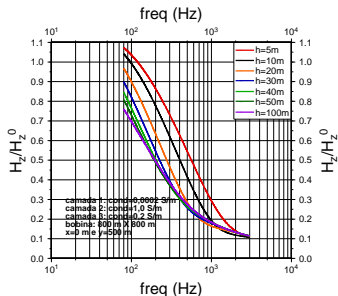


Figura: Amplitude e fase do componente vertical magnético, ponto de observação exterior a fonte, modelo de três camadas



Resultados e discussões

Modelo de três camadas, perfis de amplitude e fase

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

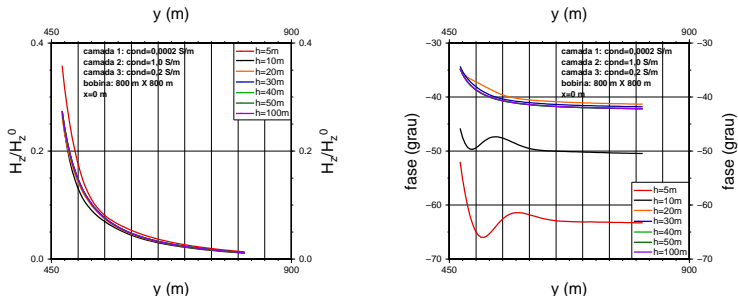


Figura: Perfis de amplitude e fase, modelo de três camadas



Resultados e discussões

Modelo de quatro camadas

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

- Indução central
- $x=0$ m e $y=800$ m
- 0,0002 S/m, 0,2 S/m, 1 S/m, 0,001 S/m
- h , 10 m, 100 m
- 20 Hz e 800 Hz
- 420 Hz



Resultados e discussões

Modelo de quatro camadas, indução central

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

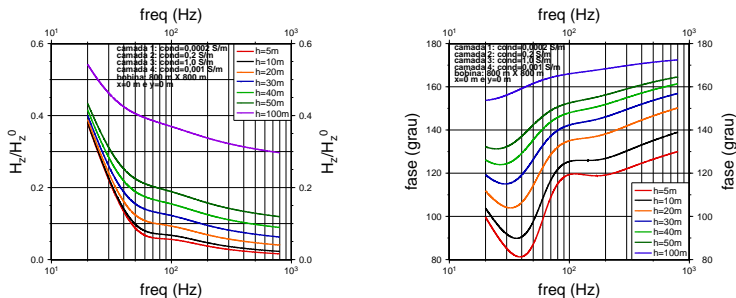


Figura: Amplitude e fase do componente vertical magnético, indução central, modelo de quatro camadas



Resultados e discussões

Modelo de quatro camadas, ponto de observação exterior a bobina transmissora

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

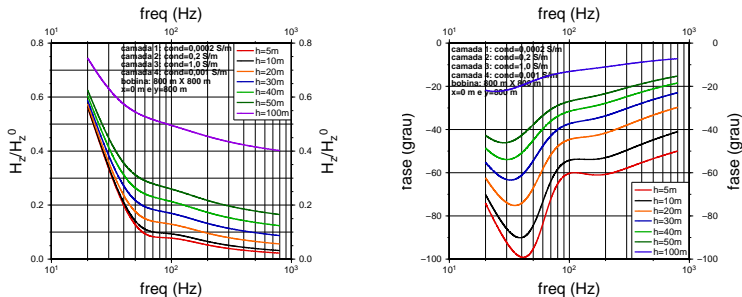


Figura: Amplitude e fase do componente vertical magnético, ponto de observação exterior a fonte, modelo de quatro camadas



Resultados e discussões

Modelo de quatro camadas, perfis de amplitude e fase do campo

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

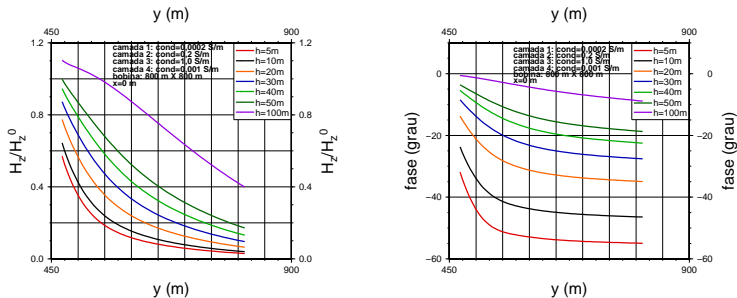


Figura: Perfis de amplitude e fase, modelo de quatro camadas



Conclusão

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

- Baixo custo computacional
- Variação do comprimento do dipolo elétrico horizontal
- Os valores no intervalo de frequência
- Amplitude, menor que no espaço livre, baixas frequências, efeito resistivo
- Inversão de polaridade
- A melhor resolução, fase do campo
- Parâmetros de polarização



Agradecimentos

COMPONENTE
VERTICAL
MAGNÉTICO
DEVIDO A UMA
BOBINA
RETANGULAR
SOBRE UMA
TERRA
ESTRATIFICADA

Ivã Luis de
Almeida Nazaré

Objetivo

Metodologia

Avaliação
analítica

Resultados e
discussões

Conclusão

Agradecimentos

- Votos de gratidão para a minha família e para todos do Instituto de Geociências da UFBa em especial ao professor Hédison Kiuity Sato que me auxiliou no desenvolvimento deste trabalho.