

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE CASTANHAL
FACULDADE DE MATEMÁTICA

**MODELAGEM UNIDIMENSIONAL DO MÉTODO GEOFÍSICO
MAGNETOTELÚRICO MARINHO NA INVESTIGAÇÃO DA CAMADA
DE SAL EM ÁGUAS PROFUNDAS**

WANDERSON DE ALMEIDA SILVA

CASTANHAL-PA

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE CASTANHAL
FACULDADE DE MATEMÁTICA

**MODELAGEM UNIDIMENSIONAL DO MÉTODO GEOFÍSICO
MAGNETOTELÚRICO MARINHO NA INVESTIGAÇÃO DA CAMADA
DE SAL EM ÁGUAS PROFUNDAS**

WANDERSON DE ALMEIDA SILVA

PROF. ORIENTADOR FRAYZER LIMA DE ALMEIDA

CASTANHAL-PA

2018

WANDERSON DE ALMEIDA SILVA

**MODELAGEM UNIDIMENSIONAL DO MÉTODO GEOFÍSICO
MAGNETOTELÚRICO MARINHO NA INVESTIGAÇÃO DA
CAMADA DE SAL EM ÁGUAS PROFUNDAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Matemática da Universidade Federal do Pará, campus de Castanhal, como pré-requisito para a obtenção do Grau de Licenciado Pleno em Matemática.

Orientador: Doutor Frayzer Lima de Almeida.

CASTANHAL-PA

2018

WANDERSON DE ALMEIDA SILVA

**MODELAGEM UNIDIMENSIONAL DO MÉTODO
MAGNETOTELÚRICO MARINHO NA INVESTIGAÇÃO DA
CAMADA DE SAL EM ÁGUAS PROFUNDAS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado para obtenção do Grau de Licenciado Pleno em Matemática, no Curso de Licenciatura Plena em Matemática, da Faculdade de Matemática.

Castanhal, Janeiro de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Professor José Geraldo Gonçalves
da Silva – UFPA

Professor Orientador Frayzer
Lima de Almeida - UFPA

A Deus, meu refúgio bem presente na tribulação. A minha mãe Edna, que me deu apoio incondicional e ao meu irmão Anderson que em todos os momentos se fez presente ao meu lado.

*“E a paz de Deus, que excede todo o conhecimento, guardará o vosso coração
e a vossa mente em Cristo Jesus”.*

Filipenses 4:7

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me concedido sabedoria, inteligência e força e por até aqui está comigo me guiando e me guardando.

A minha mãe Edna de Almeida, que sempre foi meu porto seguro e é a pessoa com quem posso contar em qualquer situação.

Ao meu irmão Anderson, que desde o começo segurou na minha mão e disse “estamos juntos para essa nova jornada meu preto”.

Aos meus outros irmãos Damerson de Almeida, Edson de Almeida, Erison de Almeida e Adelino Pereira que me deram suporte e a força necessária para chegar até onde estou.

Ao meu padrasto Sérgio Aurélio pelo apoio incondicional.

A minha esposa Leilane Marcelly pelo incentivo e paciência na conclusão deste trabalho.

A professora Lourdes que esteve comigo da 1^a a 7^a série e foi com quem aprendi as mais importantes lições no que diz respeito à minha educação.

Aos professores Abson Renato e Fernando que sempre acreditaram e confiaram no meu potencial.

Ao professor Marinaldo que foi o responsável em despertar em mim o amor pela matemática.

E ao meu professor e orientador Doutor Frayzer Lima de Almeida por confiar a mim a chance de entender um pouco de seu projeto, suas orientações, sua ajuda direta na elaboração desse trabalho e, principalmente, pela paciência e dedicação que me enriqueceram tanto na minha formação profissional quanto pessoal.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo descrever metodologicamente acerca da modelagem do método magnetotelúrico 1D, visando sempre determinar as resistividades aparentes e fases do referido método, sua origem e seus idealizadores e apresentar noções preliminares dos ambientes geelétrico altamente resistivos característicos na prospecção de hidrocarbonetos em águas profundas segundo as características das bacias brasileiras para a modelagem do MMT 1D. Essa é uma técnica relativamente nova, porém, vem ganhando grande visibilidade na indústria, pois, tem se mostrado uma ferramenta valiosa na exploração de hidrocarbonetos. A fonte do Método Magnetotelúrico marinho são as ondas planas oriundas basicamente de interações entre os ventos solares, o campo elétrico e magnético terrestre e a ionosfera.

Palavras-Chaves: Método Magnetotelúrico; Modelagem direta; Método Magnetotelúrico marinho; Zona pré-sal.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1. A ORIGEM DO MÉTODO MAGNETOTELÚRICO.....	9
2. METODOLOGIA.....	10
2.1. AS RESISTIVIDADES APARENTES E FASE DO MÉTODO MAGNETOTELÚRICO MARINHO 1D.....	10
2.2. AS COMPONENTES H_y E E_x USADAS NO MMT 1D.....	12
3. RESULTADOS.....	15
3.1. PROPOSTAS DE MODELOS GEOELÉTRICO UNIDIMENSIONAIS SEGUNDO AMBIENTES DA ZONA DO PRÉ-SAL EXISTENTES NAS BACIAS BRASILEIRAS PARA A MODELAGEM DO MMT 1D.....	15
4. CONCLUSÃO.....	47
5. REFERENCIAIS BIBLIOGRÁFICOS.....	51

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – A ORIGEM DO MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

Nos últimos anos, muitas têm sido as inovações para novas descobertas de hidrocarbonetos em águas profundas, principalmente, técnicas utilizando métodos eletromagnéticos (EM). Dentre essas novas técnicas, está o método magnetotelúrico marinho, que foi adaptado do método magnetotelúrico em termos de obtenção de dados eletromagnéticos, assim se tem a importância do estudo envolvendo esta nova técnica geofísica.

O método magnetotelúrico (MT) foi proposto por Tikhonov (1950) e Cagniard (1953). É um método geofísico usado na investigação da subsuperfície terrestre através da determinação das características elétricas das camadas profundas da crosta terrestre. É uma técnica geofísica que se utiliza prioritariamente dos campos elétricos e magnéticos naturais, para obter informações sobre a distribuição de resistividade dos corpos da subsuperfície da terra. Os campos elétricos e magnéticos são originados de correntes em forma de guia de onda exercida pela atividade solar, entre a terra e a ionosfera. O princípio básico na teoria do método MT é de que a sua fonte é uma onda eletromagnética plana e uniforme, isto é, campos elétricos e magnéticos constantes.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma proposta de modelo geoeletrico para auxiliar no processamento de dados sísmicos visando demarcar com maior exatidão a base e a posição dos corpos da camada pré-sal nas bacias costeiras brasileiras, descrever a modelagem direta do método magnetotelúrico marinho 1D (MMT 1D), desenvolver modelos geoeletrico 1D do MMT 1D segundo ambientes da zona do pré-sal nas bacias costeiras brasileiras e analisar os resultados oriundos dos modelos geoeletrico 1D segundo ambientes das zonas pré-sal das bacias costeiras brasileiras

simuladas através da modelagem direta do MMT 1D implementada no ambiente de programação do MatLab Educando.

2 – METODOLOGIA

A MODELAGEM DIRETA DO MÉTODO MAGNETOTELÚRICO MARINHO 1D.

Esta seção se destina a apresentar uma descrição metodológica acerca da modelagem MMT 1D no sentido de como determinar as resistividades aparentes e fases do referido método.

2.1 – AS RESISTIVIDADES APARENTES E FASE DO MÉTODO MAGNETOTELÚRICO MARINHO 1D.

A fonte para o MMT é a mesma usado no método magnetotelúrico – MT, ou seja, são as ondas planas oriundas basicamente de interações entre os ventos solares, o campo magnético terrestre e a ionosfera. Os receptores para o MMT são afixados no assoalho marinho (contato mar e sedimentos) onde os mesmos medem na prática, as componentes E_x e H_y , dos campos elétrico e magnético, respectivamente, e por meio da seguinte fórmula:

$$\rho_a^{TM} = \frac{1}{\omega\mu_0} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (1)$$

Define-se a função ρ_a^{TM} , denominada de resistividade aparente (em ohm-m). Esta resistividade aparente depende das resistividades elétricas do ambiente geoeletrico, das espessuras das camadas, de suas profundidades e da frequência (Rijo, 2001).

No domínio dos números complexos, a razão entre as componentes E_x e H_y resulta em um número complexo que em geofísica dos métodos elétricos e magnéticos – EM é denominado de impedância aparente na superfície onde se realizam os registros da sondagem do método MMT. Sendo assim, esta impedância possui um argumento o qual é denominado de fase da impedância

na superfície de sondagem. Portanto, além da resistividade aparente ρ_a^{TM} usa-se também no método MMT o valor φ , da fase da impedância na superfície de sondagem (assoalho marinho). A interpretação geométrica do valor φ é a diferença entre os argumentos dos números complexos E_x e H_y , e é por isso que também a literatura denomina o valor φ como sendo a diferença de fase entre as componentes E_x e H_y , a qual é expressa em graus.

Os campos eletromagnéticos do MMT 1D, são solucionados analiticamente a partir das equações de Maxwell no SI, em um meio não magnético e no domínio da frequência. Desta forma supõem-se a fonte suficientemente afastada da região onde se deseja determinar os campos eletromagnéticos de tal modo que se admite que tais campos variem apenas na direção z . Portanto, com as condições e suposições acima, é possível desacoplar as referidas equações em dois outros sistemas menores de duas equações diferenciais cada, resultando para cada sistema menor a chamada equação de Helmholtz. Esta última equação é ponto de partida para solucionar os dois sistemas de equações diferenciais acima mencionados. Através de análise de simetria para o primeiro sistema têm-se as seguintes componentes cartesianas H_y , E_x e E_z que são determinadas analiticamente, sendo estas duas primeiras componentes necessárias para o cálculo da resistividade aparente, como pode ser observado na Eq.(1). Como H_y é transversal à direção z , então este modo de propagação eletromagnética é chamado de modo transversal magnético com relação à direção z ou simplesmente TM.

Da mesma forma, para o segundo sistema de equações diferenciais, acima mencionado, têm-se as seguintes componentes cartesianas E_y , H_x e H_z que são também determinadas analiticamente, sendo também estas duas primeiras componentes necessárias para o cálculo da resistividade aparente, que pode ser observado na Eq.(2) a seguir. E como E_y , é também transversal à direção z , este modo de propagação é chamado de modo transversal elétrico com relação à direção z ou simplesmente modo TE (Rijo, 2001).

$$\rho_a^{TE} = \frac{1}{\omega\mu_0} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2 \quad (2)$$

Desta forma, para o caso do MMT 1D, as resistividades aparentes e as fases podem ser calculadas tanto através do modo TM, Eq.(1), quanto pelo modo TE, Eq.(2), de modo que $\rho_a^{TM} = \rho_a^{TE}$, devido aos meios estratificados horizontais ou meios acamados os quais são propostos para a determinação analítica dos campos eletromagnéticos do MMT 1D, mais especificamente, devido as equivalências de simetria tanto na direção x, quanto na direção y, das camadas estratificadas horizontais. Como existe a congruência entre os modos TM e TE, acima mencionada para o caso do MMT 1D, vamos apresentar a seguir apenas as equações das componentes cartesianas H_y , E_x que caracteriza o modo TM do MMT 1D.

2.2 – AS COMPONENTES H_y E E_x USADAS NO MMT 1D.

As referidas componentes são determinadas segundo um modelo geoeletrico de n camadas horizontais homogêneas e isotrópicas. Podendo assim, determinar o valor das componentes H_y e E_x no semi-espaco superior (ar) e em qualquer camada, sabendo-se a priori, suas espessuras e suas propriedades elétricas (condutividade elétrica: σ , permeabilidade magnética: μ e permissividade elétrica: ϵ) e do semi-espaco inferior (substrato terrestre).

As componentes H_y , E_x no semi-espaco superior e em qualquer camada acima do substrato podem ser expressas assim,

$$H_y^{(j)} = H_j \left(e^{-u_j(z-z_j)} + R_{TM}^{(j)} e^{u_j(z-z_j)} \right), \quad (3)$$

$$E_x^{(j)} = Z_j H_j \left(e^{-u_j(z-z_j)} - R_{TM}^{(j)} e^{u_j(z-z_j)} \right), \quad (4)$$

Para $j = 0, 1, 2, \dots, N-1$, e no substrato, assim,

$$H_y^{(N)} = H_N \left(e^{-u_N(z-z_{N-1})} \right), \quad (5)$$

$$E_x^{(N)} = Z_N H_N \left(e^{-u_N(z-z_{N-1})} \right). \quad (6)$$

Em que:

- z_j é o valor da profundidade da base da j -ésima camada. No caso, para o MMT 1D, z_0 é a superfície do mar, com $z_0 = 0$, z_1 é a profundidade da lâmina d'água em relação à sua superfície (mar), $z_1 = h_1$, em que h_1 é a espessura da lâmina d'água. Assim, $z_j = h_j + h_{j-1} + \dots + h_2 + h_1$, onde h_k são espessura das k -ésimas camadas estratificadas horizontais, com $j \leq k \leq 1$.
- u_j é a constante de propagação da onda na j -ésima camada. Para o caso do MMT 1D, é dada por $u_j = ik$, em que $i = \sqrt{-1}$ é a unidade imaginária e k_j é o número de onda na j -ésima camada, e é dado por $k_j = \sqrt{-\mathfrak{z}_j \mathfrak{H}_j}$. Sendo $\mathfrak{z}_j = i\omega\mu_j$ a *impeditividade* da j -ésima camada, com $\omega = 2\pi f$ a frequência angular, f a frequência linear e μ_j é a permeabilidade magnética na j -ésima camada. Como o ambiente geológico em estudo não é magnético, então é admitido $\mu_j = \mu_0$, em que $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ é a permeabilidade no vácuo. Agora, $\mathfrak{H}_j = \sigma_j + i\omega\epsilon_j$ é a *admitividade* da j -ésima camada, σ_j como sendo a condutividade elétrica na j -ésima camada e ϵ_j como a permissividade elétrica na j -ésima camada. Porém, como na maioria dos casos em geofísica dos métodos elétricos e eletromagnéticos, a permissividade elétrica e tanto no mar, quanto das rochas são próximas à permissividade elétrica no vácuo, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$, então se admite $\epsilon_j = \epsilon_0$.
- Z_j é a impedância intrínseca ou verdadeira, em *ohm*, na j -ésima camada, e é dada por $Z_j = u_j / \mathfrak{H}_j$.
- $R_{TM}^{(j)}$ é o coeficiente de reflexão da camada j -ésima, e é dado por

$$R_{TM}^{(j)} = \frac{Z_j - \hat{Z}_{j+1}}{Z_j + \hat{Z}_{j+1}}$$

Em que \hat{Z}_{j+1} é a impedância aparente, e é regida pelo seguinte algoritmo recursivo,

$$\hat{Z}_j = Z_j \frac{\hat{Z}_{j+1} + Z_j \tanh(u_j h_j)}{Z_j + \hat{Z}_{j+1} \tanh(u_j h_j)},$$

Com $\hat{Z}_N = Z_N$ e $N - 1 \geq j \geq 1$.

➤ O coeficiente H_j é determinado pela seguinte fórmula recursiva,

$$H_j = H_{j-1} \frac{(1 + R_{TM}^{(j-1)})e^{-u_j h_j}}{(1 + R_{TM}^{(j)})e^{-2u_j h_j}},$$

Com $2 \leq j \leq N - 1$. E para $j = 1$ tem-se a seguinte fórmula,

$$H_j = \frac{H_0}{(e^{u_1 h_1} + R_{TM}^{(1)} e^{-u_1 h_1})},$$

Em que H_0 pode tomar qualquer valor, em particular a unidade 1.

3 – RESULTADOS

3.1 – PROPOSTAS DE MODELOS GEOELÉTRICO UNIDIMENSIONAIS SEGUNDO AMBIENTES DA ZONA DO PRÉ-SAL EXISTENTES NAS BACIAS BRASILEIRAS PARA A MODELAGEM DO MMT 1D.

Esta seção tem a finalidade de apresentar noções preliminares dos ambientes geoeletrico altamente resistivos característicos na prospecção de hidrocarbonetos em águas profundas do MMT 1D, segundo as características das bacias brasileiras.

Os primeiros cinco modelos geoeletrico para o MMT 1D, aqui propostos, segundo características altamente resistivas em águas profundas são formados pela camada de ar com resistividade elétrica ρ_0 infinita. A camada do mar, com resistividade ρ_1 igual a 0,33 ohms-m e espessura h_1 igual a 2000 m. A camada das rochas sedimentares encaixantes (folhelho, siltito, etc.), com resistividade ρ_2 igual a 1,0 ohms-m e espessura h_2 igual a 1000 m. A camada de sal (rochas sedimentares salinocarbonáticas) com resistividade ρ_3 igual a 100 ohms-m e espessura h_3 igual a 2000 m. Já as camadas planas paralelas, as quais representam os reservatórios de hidrocarbonetos para cada um dos cinco modelos geoeletrico propostos, Fig.1-Fig.5, possuem resistividade ρ_4 iguais a 10 ohm-m, 25 ohm-m, 50 ohm-m, 75 ohm-m e 90 ohm-m, respectivamente, e uma espessura h_4 , comum a todos os cinco modelos, Fig.1-Fig.5, igual a 1500 metros. Finalmente a camada das rochas sedimentares encaixantes (semi-espaco inferior) apresenta resistividade ρ_5 igual a 1,0 ohm-m.

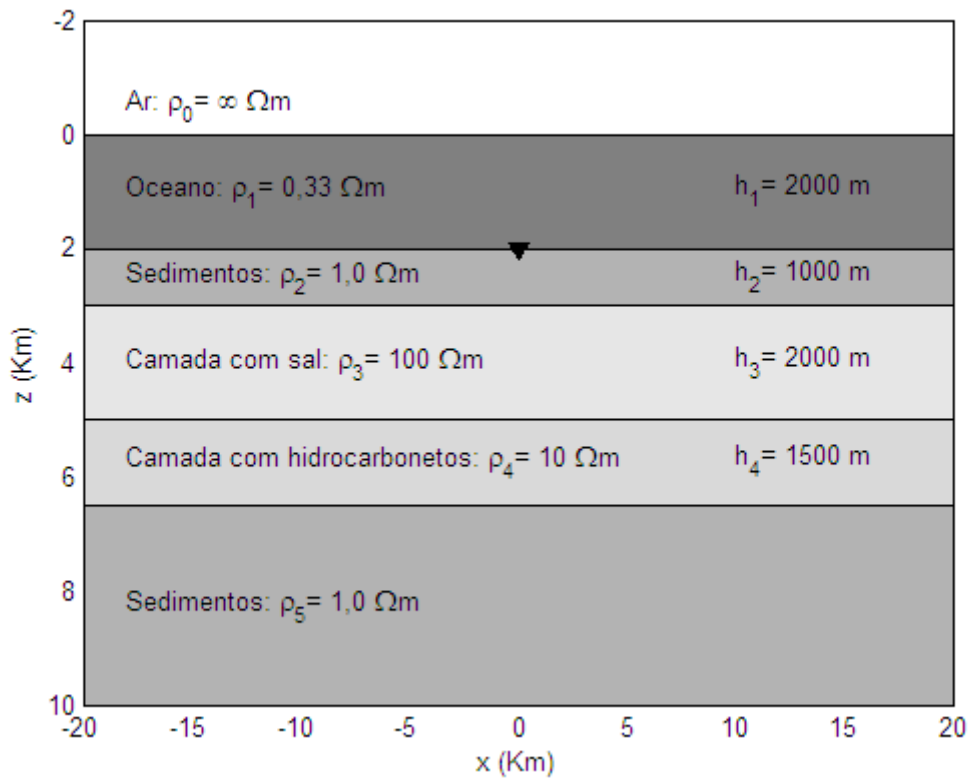


Figura 1 - Modelo geoeletrico 1D com camada salina possuindo resistividade elétrica ρ_3 igual a 100 ohm-m, e com camada reservatório de hidrocarbonetos possuindo resistividade elétrica ρ_4 igual a 10 ohm-m.

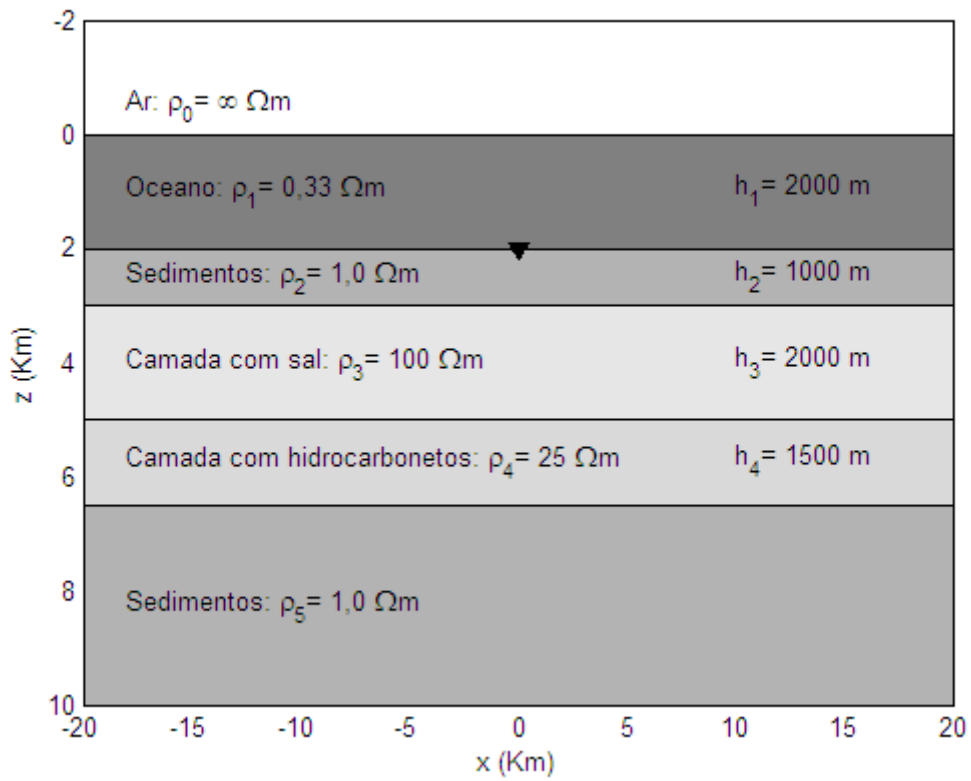


Figura 2 - Modelo geoeletrico 1D com camada salina possuindo resistividade elétrica ρ_3 igual a 100 ohm-m, e com camada reservatório de hidrocarbonetos possuindo resistividade elétrica ρ_4 igual a 25 ohm-m.

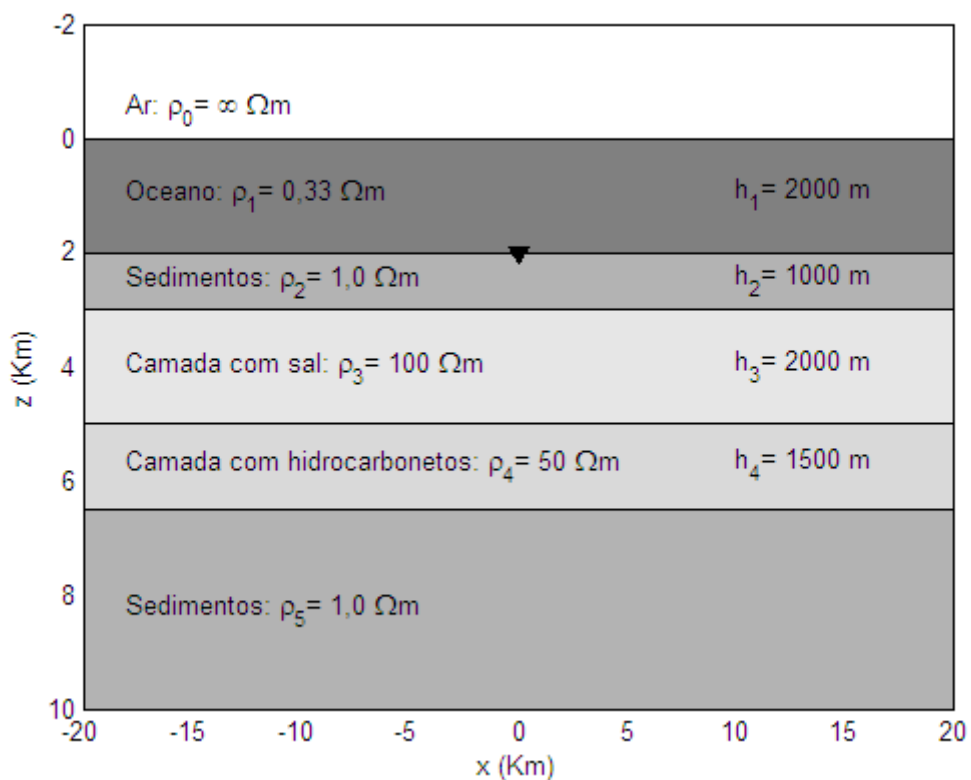


Figura 3 - Modelo geoeletrico 1D com camada salina possuindo resistividade elétrica ρ_3 igual a 100 ohm-m, e com camada reservatório de hidrocarbonetos possuindo resistividade elétrica ρ_4 igual a 50 ohm-m.

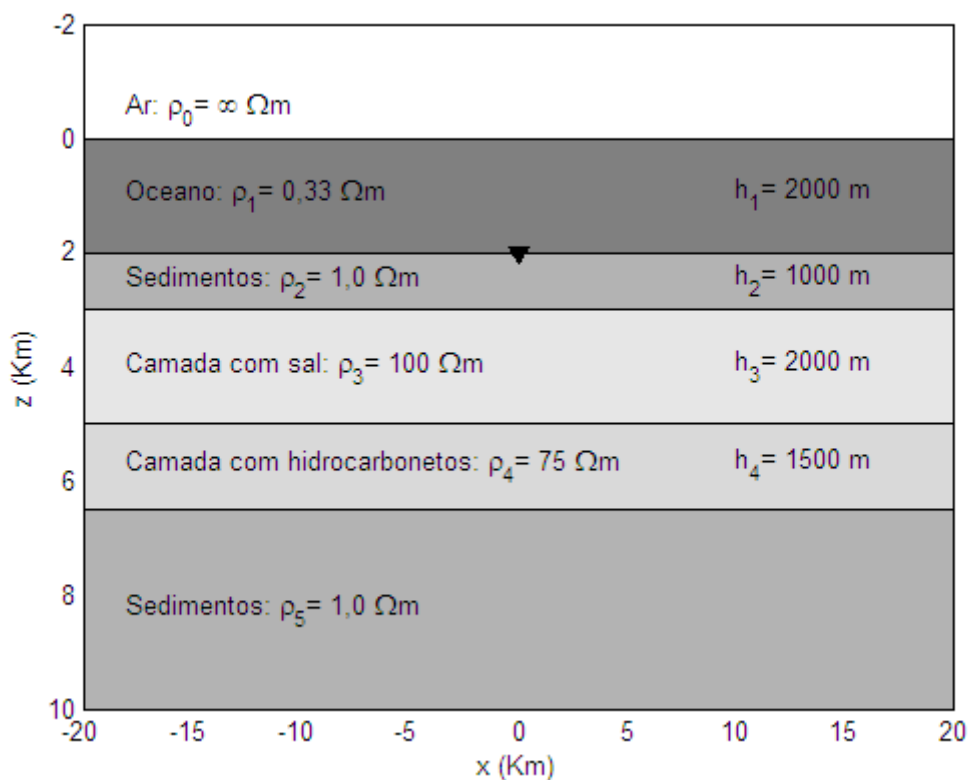


Figura 4 - Modelo geoeletrico 1D com camada salina possuindo resistividade elétrica ρ_3 igual a 100 ohm-m, e com camada reservatório de hidrocarbonetos possuindo resistividade elétrica ρ_4 igual a 75 ohm-m.

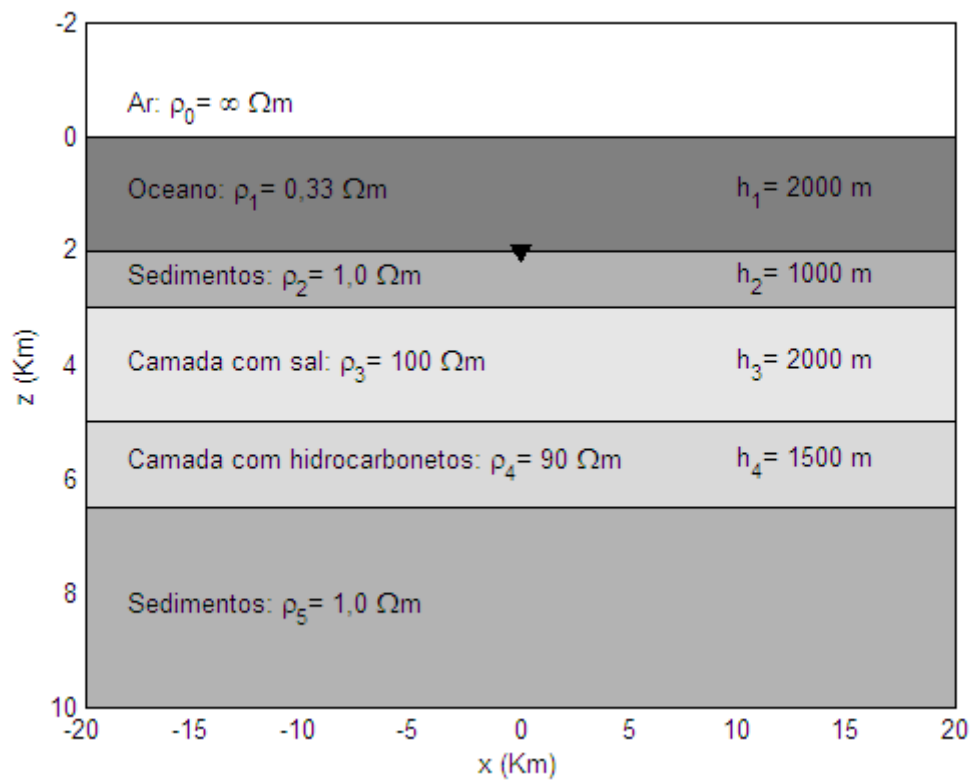


Figura 5 - Modelo geoeletrico 1D com camada salina possuindo resistividade elétrica ρ_3 igual a 100 ohm-m, e com camada reservatório de hidrocarbonetos possuindo resistividade elétrica ρ_4 igual a 90 ohm-m.

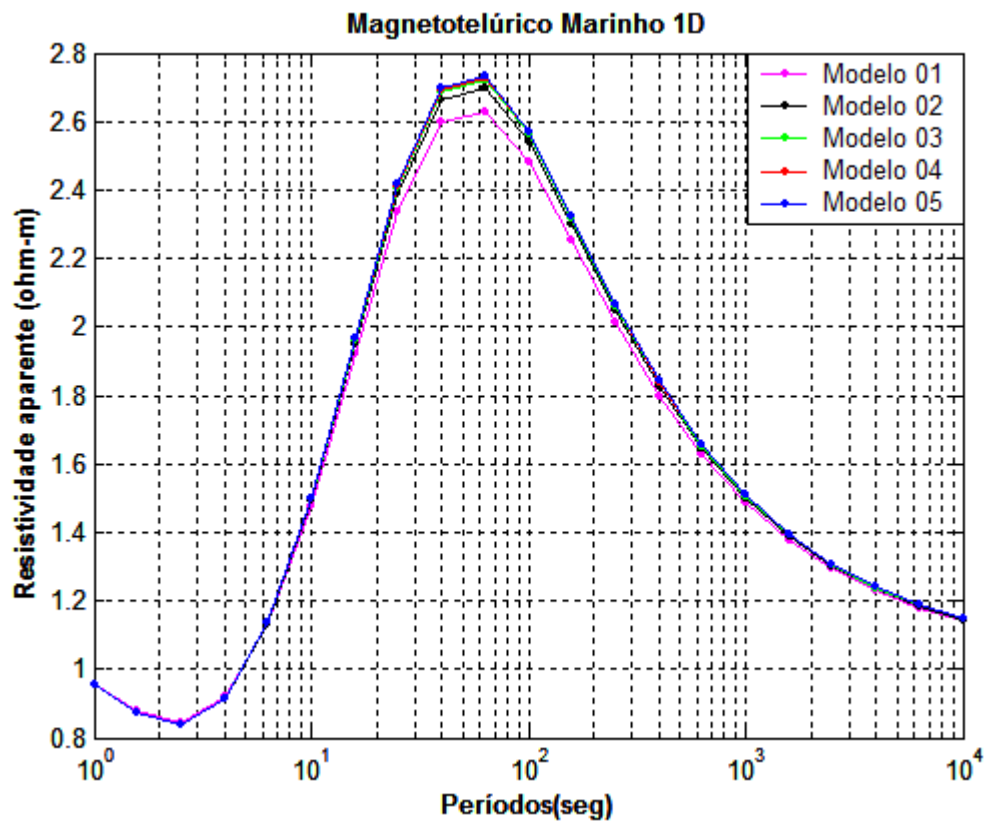


Figura 6—Gráfico da resistividade dos cinco primeiros Modelos geoeletrico para o MMT 1D segundo características altamente resistivas.

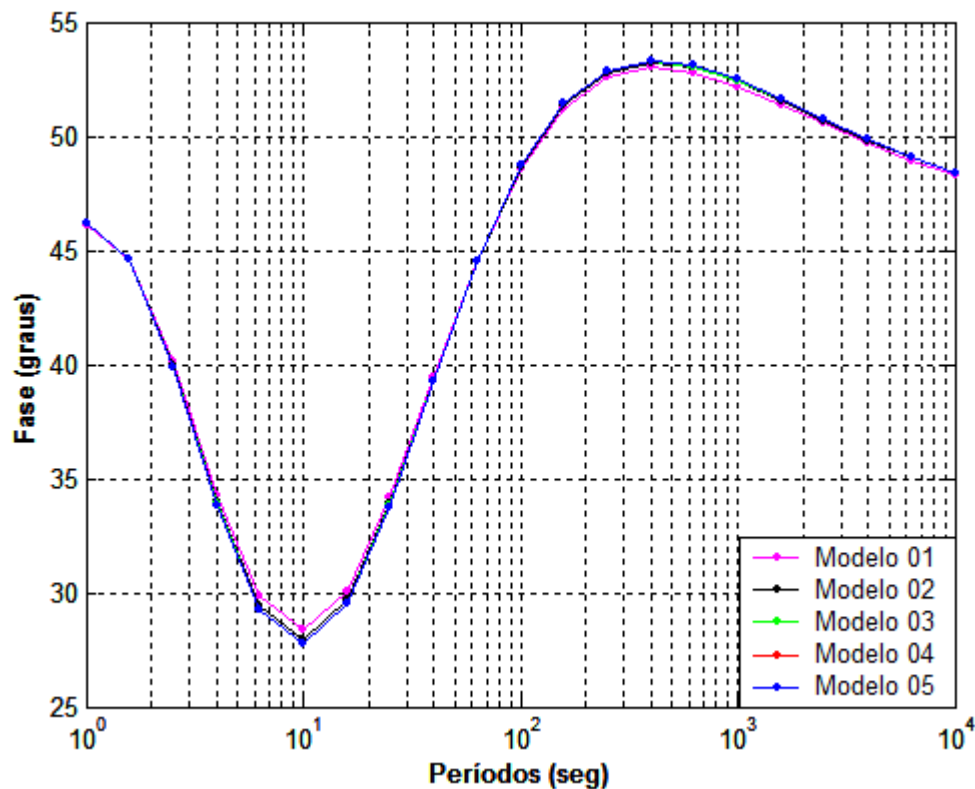


Figura 7–Gráfico da fase dos cinco primeiros Modelos geoeletrico para o MMT 1D segundo características altamente resistivas.

As figuras 6 e 7 mostram, respectivamente, a resistividade aparente e a fase referentes aos cinco primeiros modelos geoeletrico propostos para o MMT 1D (Figs.1-5). A figura 6 nos mostra a resistividade aparente com proximidade na sua variação, donde se entende a existência de modelos geoeletrico próximos entre si em relação às resistividades absolutas entre suas camadas, respectivamente. Ou seja, percebemos três camadas geoeletrico, sendo a primeira com muito pouca resistividade aparente em relação à segunda camada, já a segunda camada, por sua vez, é bastante resistiva em relação à primeira e a terceira camada e, finalmente, entende-se que a terceira camada é mais resistiva em relação à primeira. Interpreta-se também sobre a figura 6, a existência de corpos mais resistivos em um meio menos resistivo e que não possuem raízes profundas, pois, observa-se o decaimento da resistividade aparente.

Agora, pode-se notar que a figura 7, referente à fase, também nos dá compreensão do número de camadas que esse meio geoeletrico possui, ou seja, observa-se um comportamento oscilatório similar entre as curvas, em que os seus pontos de mínimos e máximos dividem cada uma das curvas acima em três ramos (Figura 7): nos cinco primeiros ramos, para cada uma das curvas, partem aproximadamente de 46° e culminam em seus comuns (idênticos) pontos de mínimo (ramos decrescentes), em seguida, a partir dos seus comuns pontos de mínimo os cinco segundos ramos, para cada uma das curvas, culminam em seus comuns (idênticos) pontos de máximos (ramos crescentes) e, por fim, a partir dos seus comuns pontos de máximos os cinco terceiros ramos tendem para 45° (ramos decrescentes).

Ao associar o comportamento dessas curvas de fase aos seus respectivos modelos geoeletrico, figs.1-5, respectivamente, interpreta-se em linhas gerais a predominância da existência de três camadas geoeletrico distintas a partir do assoalho marinho. Dessa forma, verifica-se uma primeira limitação do método MMT, uma vez que, com base na argumentação acima, o método não diferencia e/ou identifica através da fase o contato entre a camada de sal e a camada de hidrocarbonetos (Figs.1-5), uma vez que não existe uma “grande” razão de resistividade elétrica entre ambas as camadas (Max-Resistividade/Min-Resistividade). Diferentemente do contato da camada dos sedimentos versos a camada de sal (Figs.1-5), pois, neste caso, existe uma “grande” razão de resistividade elétrica entre ambas as camadas. Da mesma forma, o contato da camada com hidrocarbonetos versos a camada dos sedimentos (Figs.1-5), em que neste caso, também existe uma “grande” razão de resistividade elétrica entre ambas as camadas.

A partir dos modelos geoeletrico acima, se faz necessário derivar modelos geoeletrico mais simples, porém, de grande importância para o adequado e correto desenvolvimento da modelagem direta MMT 1D. Pois, através de resultados oriundos de modelos simples e bastante difundidos na literatura, é possível analisar a presença ou ausência de coerência tanto numérica quanto física sobre os resultados propostos. Portanto, apresentamos

a seguir a Fig. 8 denominada de modelo geométrico 1D com a camada de sal e sem a camada que representa o reservatório de hidrocarbonetos e a Fig. 9 denominada de modelo geométrico 1D com a camada de sal possuindo espessura infinita, ou seja, com uma camada de sal como sendo um semi-espaço inferior.

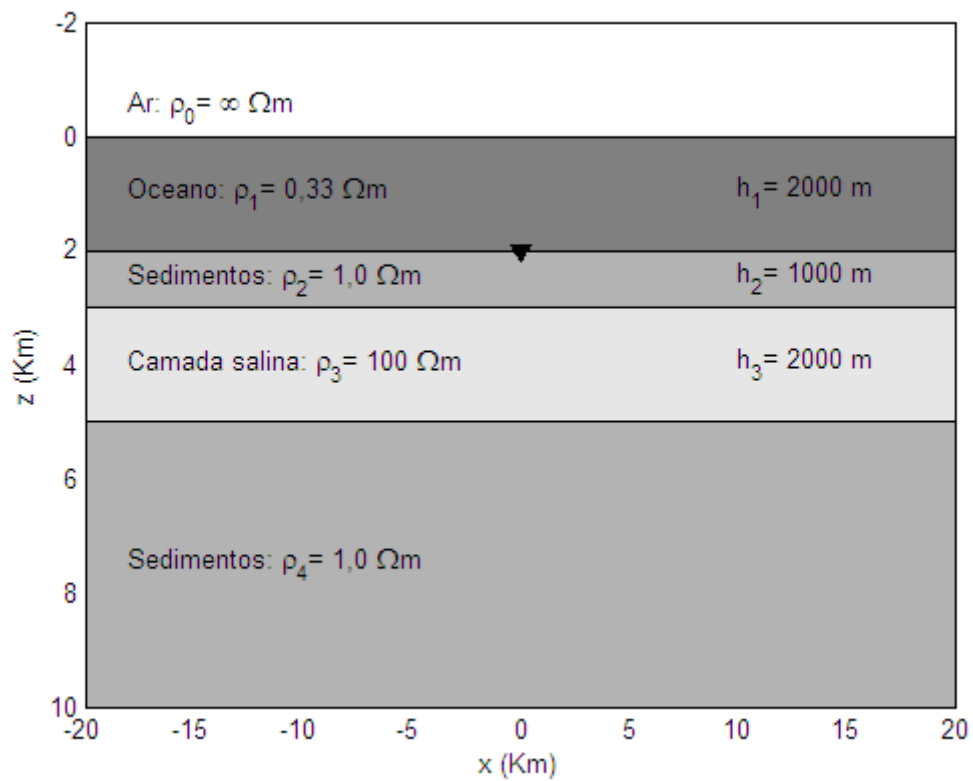


Figura 8- Modelo geológico 1D com camada salina possuindo resistividade elétrica ρ_3 igual a 100 ohm-m e sem a camada reservatório com hidrocarbonetos.

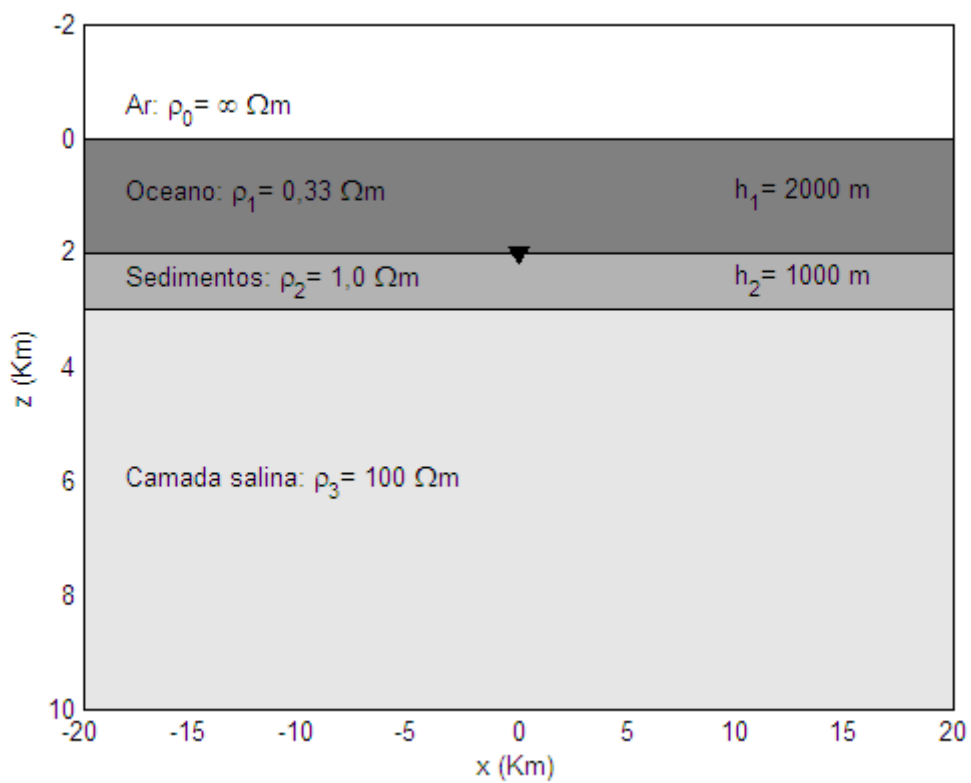


Figura 9- Modelo geológico 1D com camada salina como semi-espaço inferior, possuindo resistividade elétrica ρ_3 igual a 100 ohm-m.

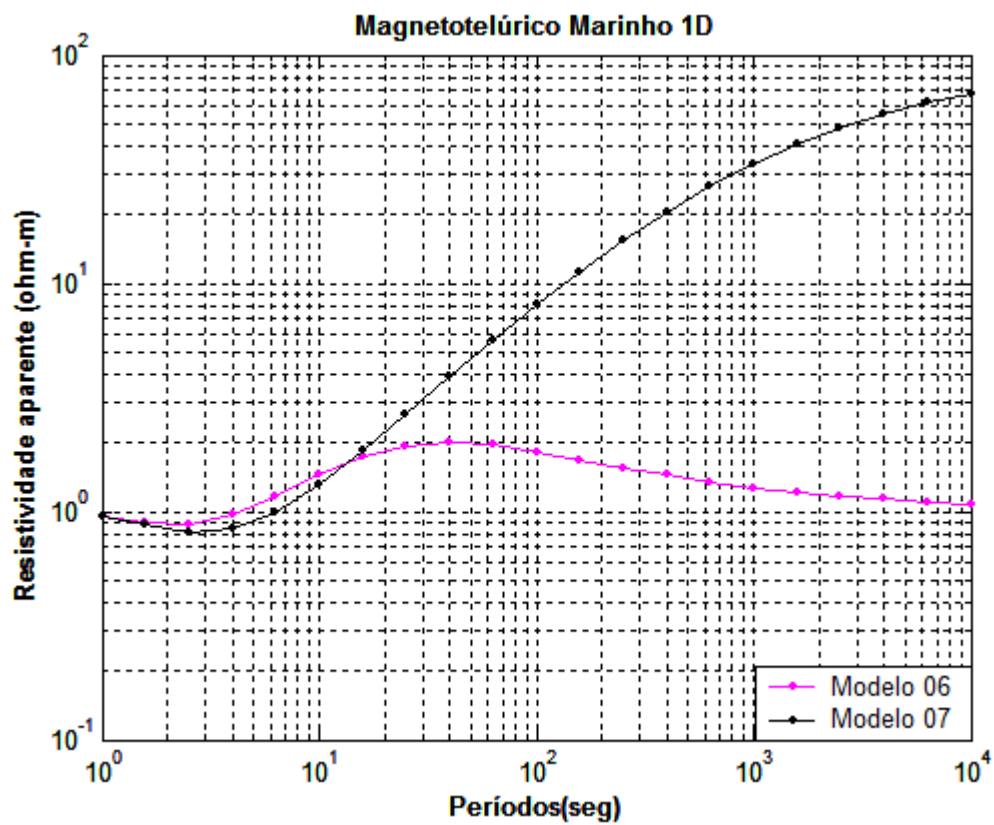


Figura 10– Gráfico da resistividade das figuras 8 e 9 dos Modelos geolétrico para o MMT 1D segundo características altamente resistivas.

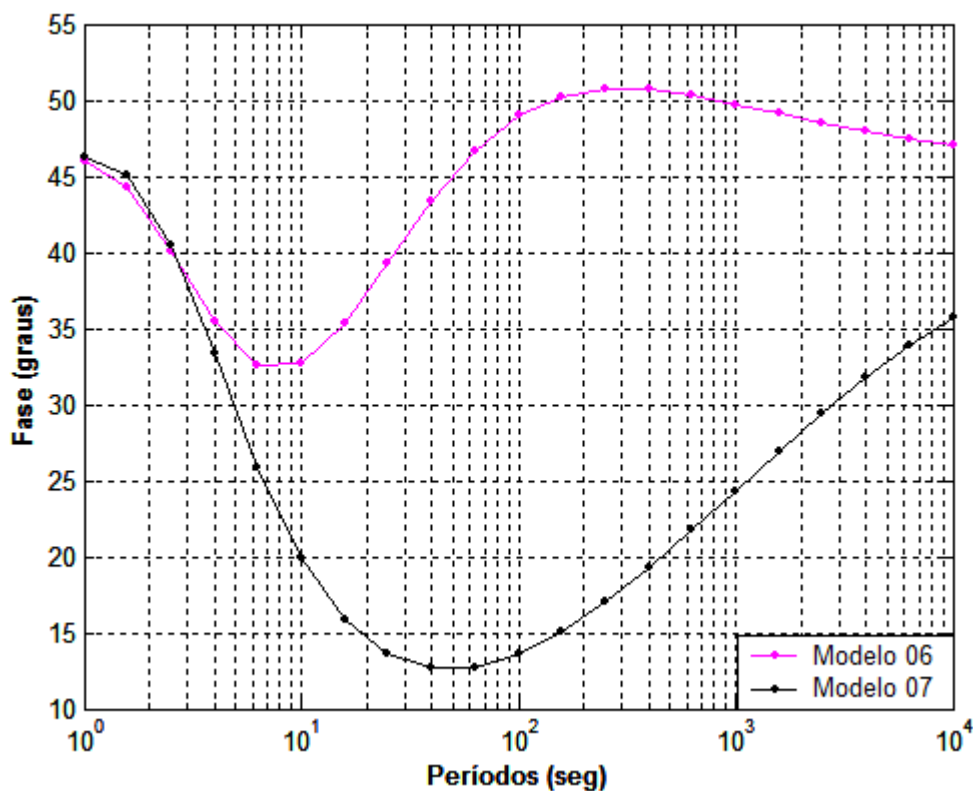


Figura 11– Gráfico da fase das figuras 8 e 9 dos Modelos geoeletrico para o MMT 1D segundo características altamente resistivas.

As figuras 10 e 11 mostram, respectivamente, a resistividade aparente e a fase referentes aos modelos geoeletrico 08 e 09 propostos para o MMT 1D (Figs.8-9). A figura 10, nos mostra a resistividade aparente com um distanciamento bastante elevado na sua variação, donde se percebe a existência de modelos geoeletrico diferentes entre si em relação às resistividades absolutas entre suas camadas, respectivamente. Ou seja, percebermos três camadas no modelo 08 e duas camadas no modelo 09. A primeira camada do modelo 08 é constante, porém, menos resistiva que a segunda e a terceira camada, a segunda camada é mais resistiva que a primeira e a terceira camada e, finalmente, a terceira camada é menos resistiva que a segunda, porém, com resistividade maior em relação à primeira camada, no modelo 09, a segunda camada é muito mais resistiva que a primeira camada.

Agora, pode-se notar que a figura 11, referente à fase, também nos dá compreensão do número de camadas que esse meio geoeletrico possui, ou seja, observa-se um comportamento oscilatório diferente entre suas curvas, em que os pontos de mínimos e máximos dividem cada uma das curvas em três ramos no modelo 08 e dois ramos no modelo 09 (Figura 11): o primeiro ramo do modelo 08, parte aproximadamente de 46° e culmina em seu ponto de mínimo (ramo decrescente), em seguida, a partir do seu ponto de mínimo, culmina em seu ponto de máximo (ramo crescente) e, por fim, a partir do seu ponto de máximo tende para 45° (ramo decrescente). Já no modelo 09, o primeiro ramo parte de 46° e culmina em seu ponto de mínimo (ramo decrescente) para assim tender a, aproximadamente, 36° (ramo crescente).

Já os cinco outros modelos geoeletrico para o MMT 1D, também aqui propostos, segundo características altamente resistivas em águas profundas são formados pela camada de ar com resistividade elétrica ρ_0 infinita. A camada do mar, com resistividade ρ_1 igual a 0,33 ohms-m e espessura h_1 igual a 2000 m. A camada das rochas sedimentares encaixantes (folhelho, siltito, etc.), com resistividade ρ_2 igual a 1,0 ohms-m e espessura h_2 igual a 1000 m. A camada de sal (rochas sedimentares salinocarbonáticas) com resistividade ρ_3 igual a 100 ohms-m e espessura h_3 igual a 2000 m. Agora, as camadas planas paralelas, as quais representam os reservatórios de hidrocarbonetos para cada um dos outros cinco modelos geoeletrico propostos, Fig.8-Fig.12, possuem resistividade ρ_4 , comum a todos estes cinco modelos, igual a 50 ohm, e espessuras h_4 , iguais a 250 metros, 750 metros, 1500 metros, 2000 metros e 2750 metros, Fig.12-Fig.16 respectivamente. Finalmente a camada das rochas sedimentares encaixantes (semi-espaço inferior) apresenta resistividade ρ_5 igual a 1,0 ohm-m.

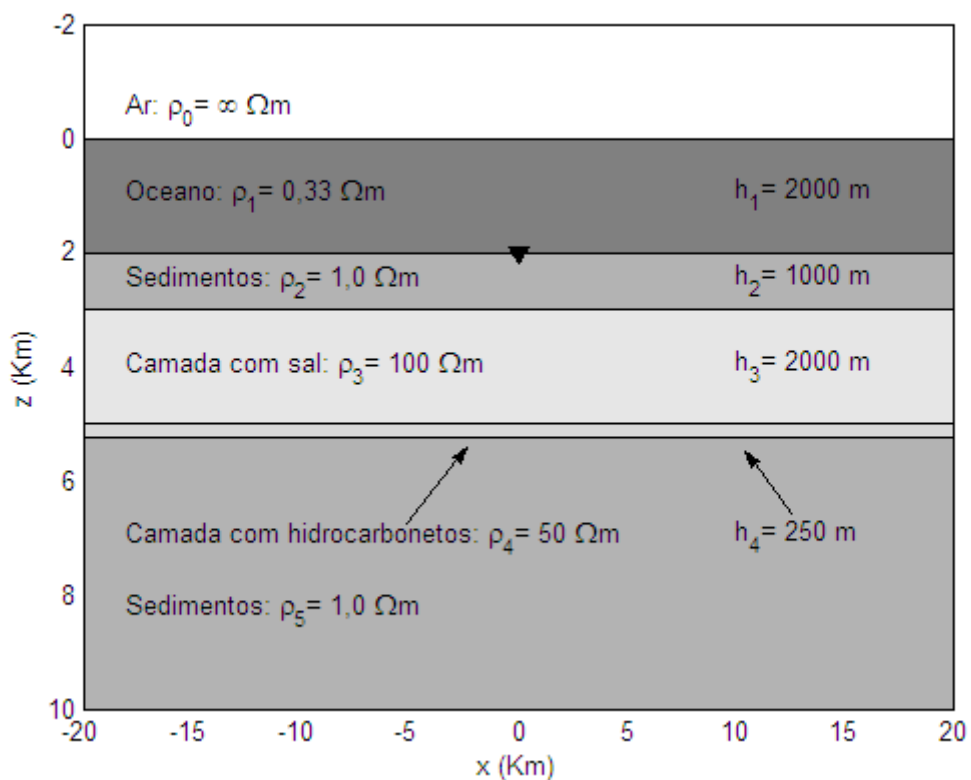


Figura 12- Modelo geológico 1D com camada salina possuindo espessura h_3 igual a 2000 metros, e com camada reservatório de hidrocarbonetos possuindo espessura h_4 igual a 250 metros.

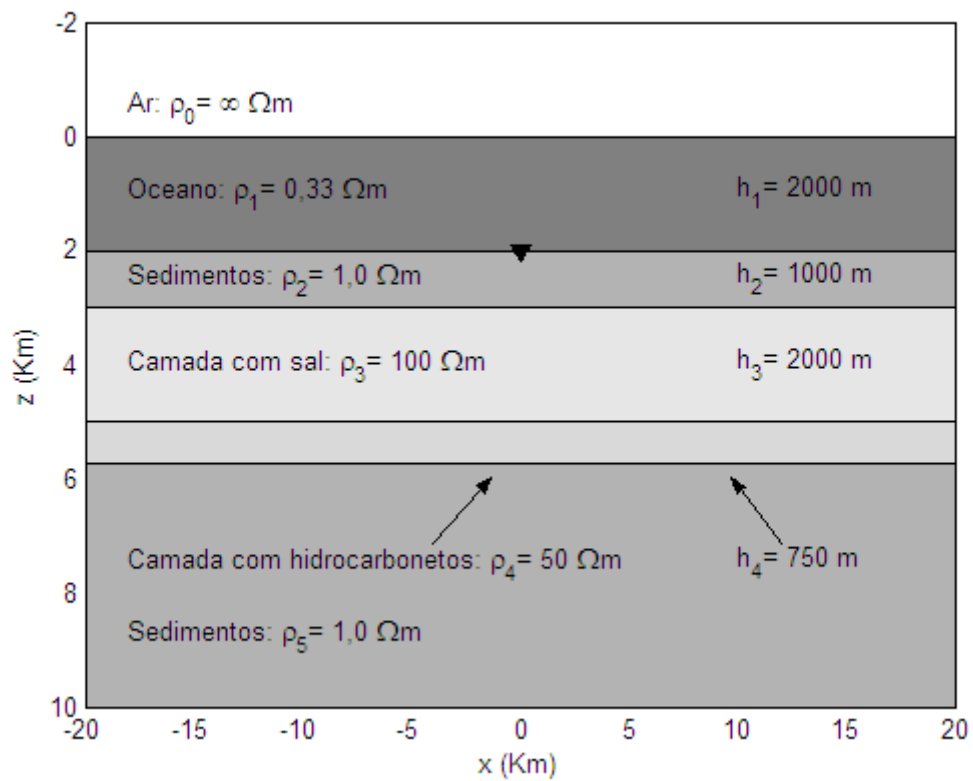


Figura 13- Modelo geológico 1D com camada salina possuindo espessura h_3 igual a 2000 metros, e com camada reservatório de hidrocarbonetos possuindo espessura h_4 igual a 750 metros.

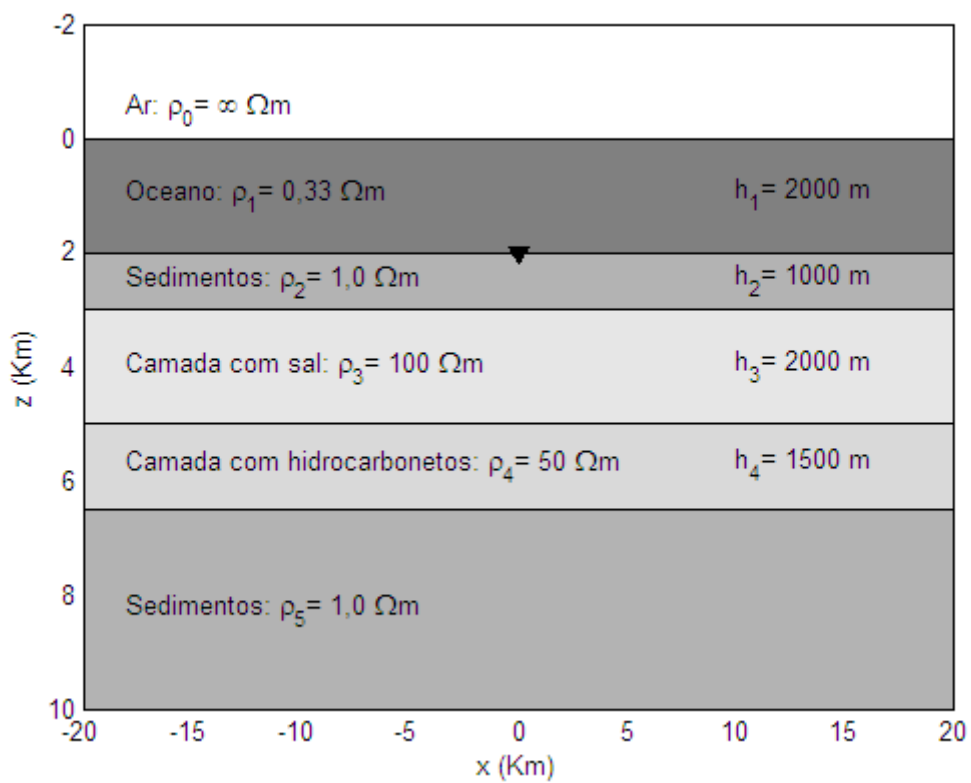


Figura 14- Modelo geológico 1D com camada salina possuindo espessura h_3 igual a 2000 metros, e com camada reservatório de hidrocarbonetos possuindo espessura h_4 igual a 1500 metros.

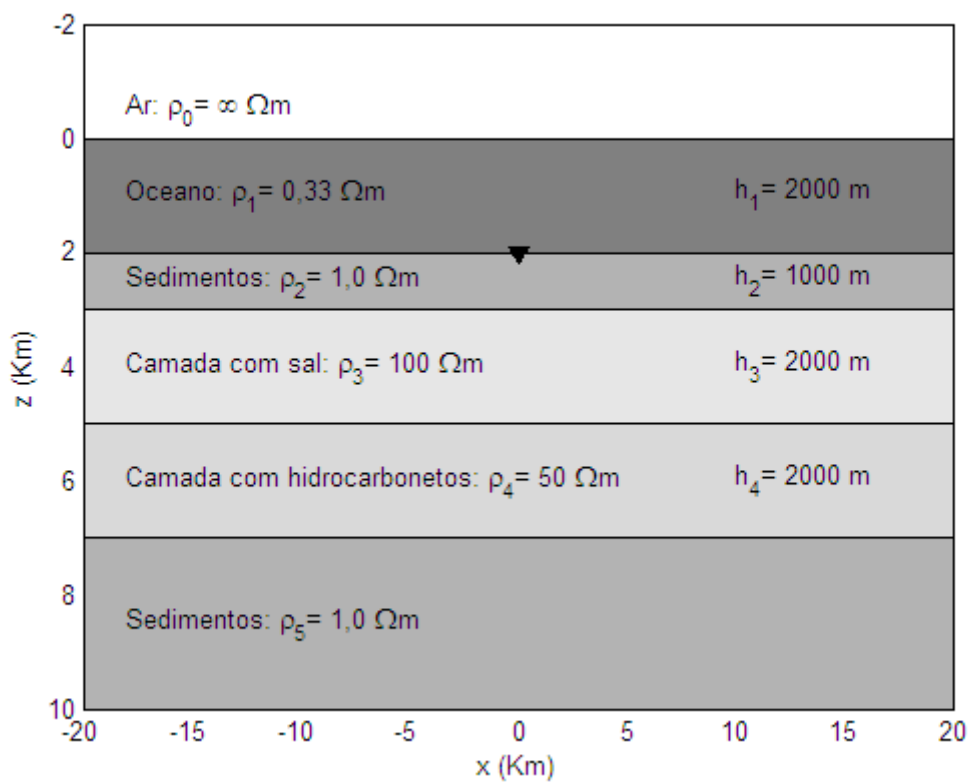


Figura 15- Modelo geológico 1D com camada salina possuindo espessura h_3 igual a 2000 metros, e com camada reservatório de hidrocarbonetos possuindo espessura h_4 igual a 2000 metros.

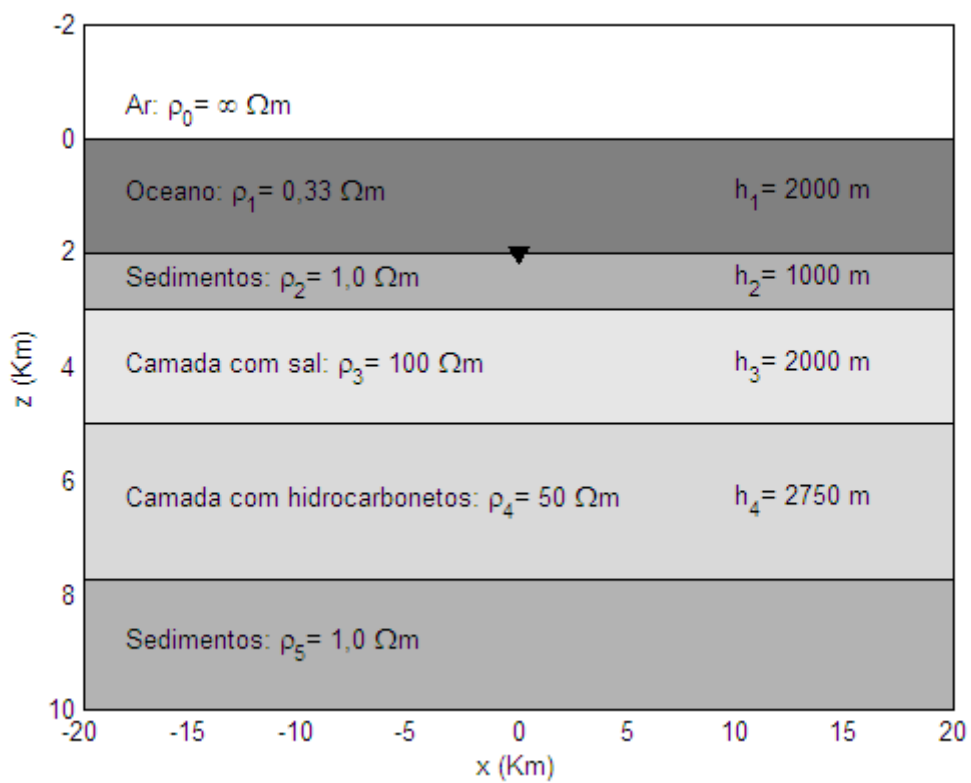


Figura 16- Modelo geológico 1D com camada salina possuindo espessura h_3 igual a 2000 metros, e com camada reservatório de hidrocarbonetos possuindo espessura h_4 igual a 2750 metros.

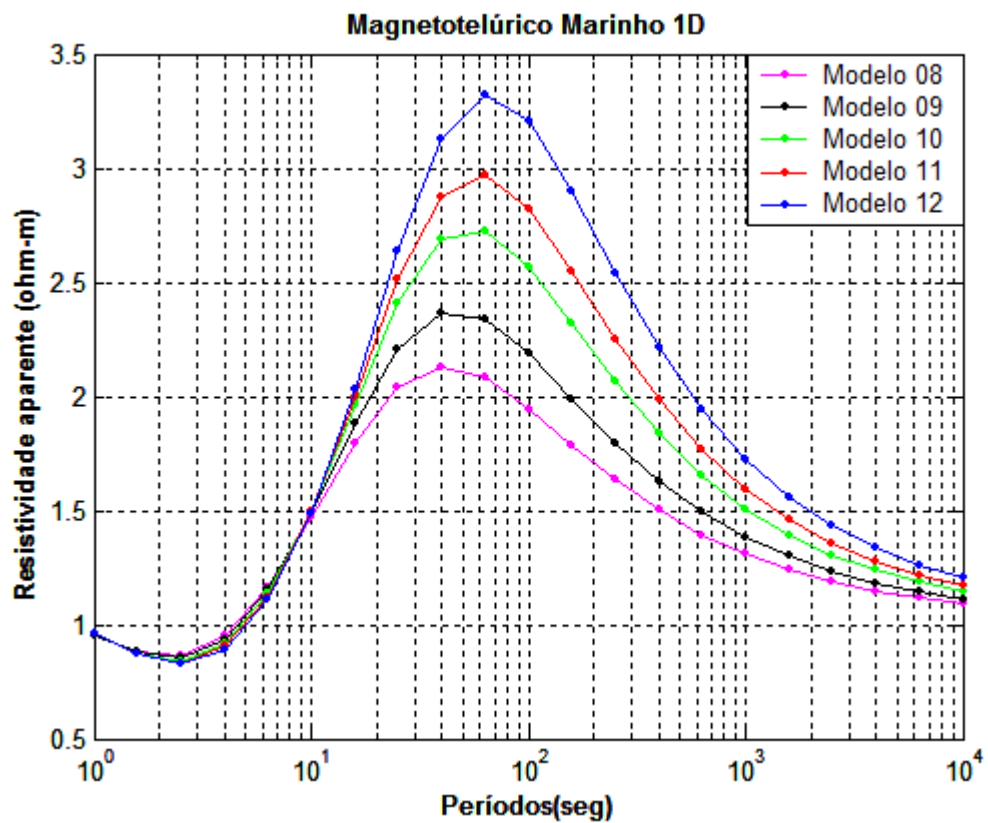


Figura 17– Gráfico da resistividade da figura 12 à figura 16 dos Modelos geoeletrico para o MMT 1D segundo características altamente resistivas.

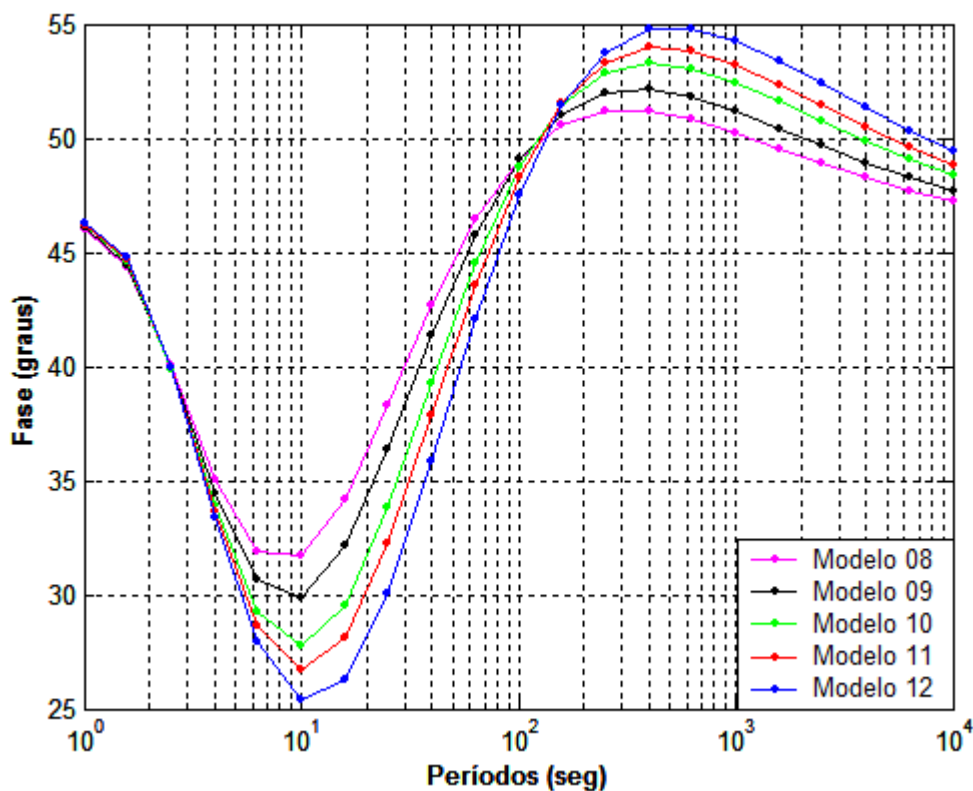


Figura 18– Gráfico da fase da figura 12 à figura 16 dos Modelos geoeletrico para o MMT 1D segundo características altamente resistivas.

As figuras 17 e 18 mostram, respectivamente, a resistividade aparente e a fase referentes aos modelos geoeletrico 12 a 16, propostos para o MMT 1D (Figs.12-16). A figura 17 nos mostra a resistividade aparente com proximidade na sua variação na primeira e segunda camada, porém, com um distanciamento na terceira camada, donde se entende a existência de modelos geoeletrico variados entre si em relação às resistividades absolutas entre suas camadas, respectivamente. Ou seja, percebemos três camadas geoeletrico, sendo a primeira com muito pouca resistividade aparente em relação à segunda camada, já a segunda camada, por sua vez, é bastante resistiva em relação à primeira e a terceira camada e, finalmente, entende-se que a terceira camada é pouco mais resistiva em relação à primeira. Interpreta-se também sobre a figura 17, a existência de corpos mais resistivos em um meio menos resistivo e que não possuem raízes profundas, pois, observa-se o decaimento da resistividade aparente.

Agora, pode-se notar que no gráfico da figura 18, referente à fase, também nos dá compreensão do número de camadas que esse meio geoeletrico possui, ou seja, observa-se um comportamento oscilatório similar entre as curvas, em que os seus pontos de mínimos e máximos dividem cada uma das curvas acima em três ramos (Figura 18): nos cinco primeiros ramos, para cada uma das curvas, partem aproximadamente de 46° e culminam em seus pontos de mínimo (ramos decrescentes), em seguida, a partir dos seus pontos de mínimo os cinco segundos ramos, para cada uma das curvas, culminam em seus pontos de máximos (ramos crescentes) e, por fim, a partir dos seus pontos de máximos os cinco terceiros ramos tendem para 46° novamente (ramos decrescentes).

Ao associar o comportamento dessas curvas de fase aos seus respectivos modelos geoeletrico, figs.12-16, respectivamente, interpreta-se em linhas gerais a predominância da existência de três camadas geoeletrico distintas a partir do assoalho marinho. Dessa forma, verifica-se a limitação do método MMT, uma vez que, o método também não diferenciou e/ou identificou através da fase o contato entre a camada de sal e a camada de hidrocarbonetos (Figs.12-16).

Finalmente os cinco outros modelos geoeletrico para o MMT 1D, também aqui propostos, segundo características altamente resistivas em águas profundas são formados pela camada de ar com resistividade elétrica ρ_0 infinita. A camada do mar, com resistividade ρ_1 igual a 0,33 ohms-m e espessura h_1 igual a 2000 m. As camadas das rochas sedimentares encaixantes (folhelho, siltito, etc.) representam as cinco camadas com espessuras distintas h_2 de 500 metros, 1000 metros, 1500 metros, 2000 metros e 3000 metros, para cada um dos cinco modelos geoeletrico propostos, respectivamente, com resistividade ρ_2 igual a 1,0 ohms-m comum a todos estes cinco modelos. A camada de sal (rochas sedimentares salinocarbonáticas) com resistividade ρ_3 igual a 100 ohms-m e espessura h_3 igual a 2000 m. A camada plano paralela possui resistividade ρ_4 igual a 50

ohm, e espessuras h_4 , igual a 1500 metros. Finalmente a camada das rochas sedimentares encaixantes (semi-espaço inferior) apresenta resistividade ρ_5 igual a 1,0 ohm-m.

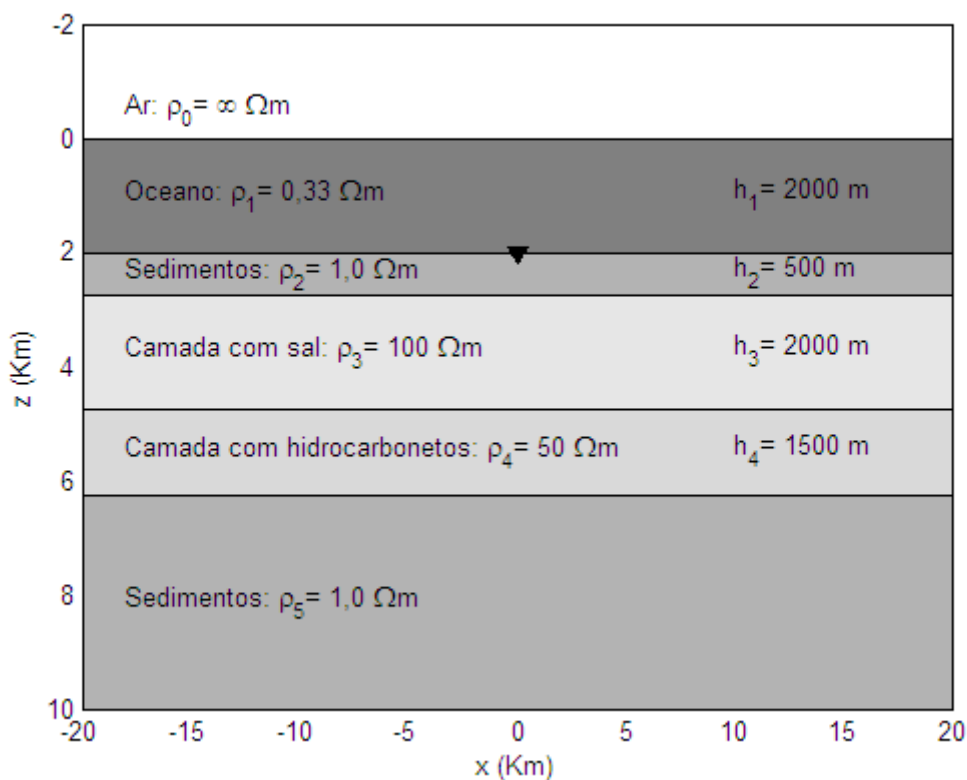


Figura 19- Modelo geológico 1D com bloco resistivo à uma profundidade em relação ao assoalho marinho de 500 metros, constituído pela camada salina possuindo resistividade elétrica ρ_3 igual a 100 ohm-m e espessura h_3 igual a 2000 metros, e pela camada reservatório de hidrocarbonetos com resistividade elétrica ρ_4 igual a 50 ohm-m e espessura h_4 igual a 1500 metros.

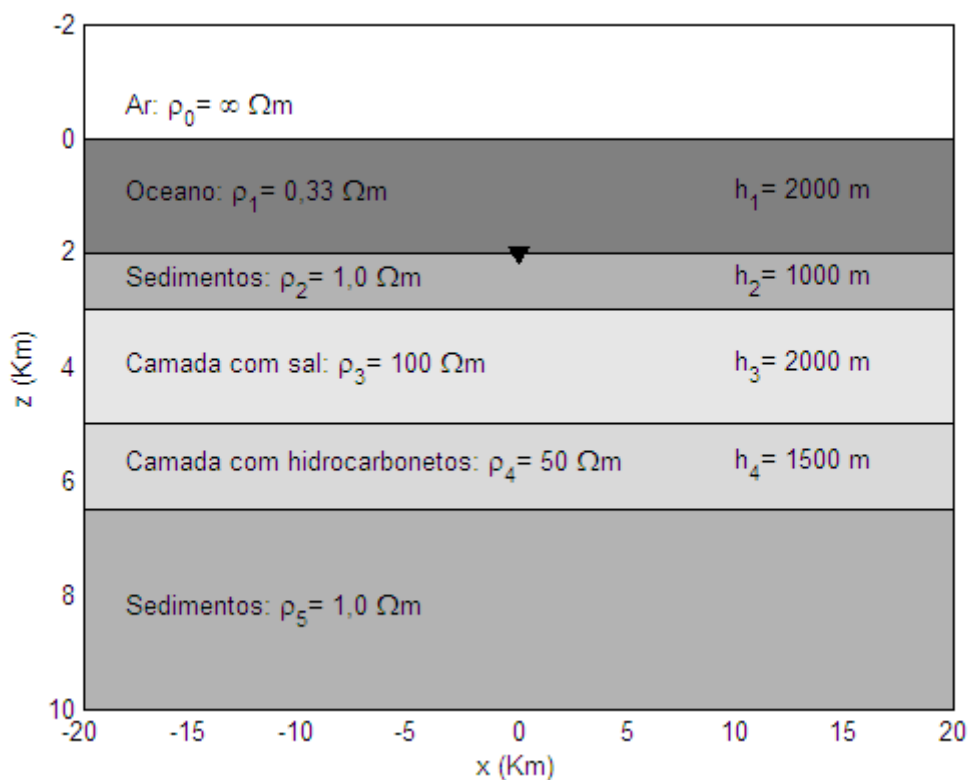


Figura 20- Modelo geológico 1D com bloco resistivo à uma profundidade em relação ao assoalho marinho de 1000 metros, constituído pela camada salina possuindo resistividade elétrica ρ_3 igual a 100 ohm-m e espessura h_3 igual a 2000 metros, e pela camada reservatório de hidrocarbonetos com resistividade elétrica ρ_4 igual a 50 ohm-m e espessura h_4 igual a 1500 metros.

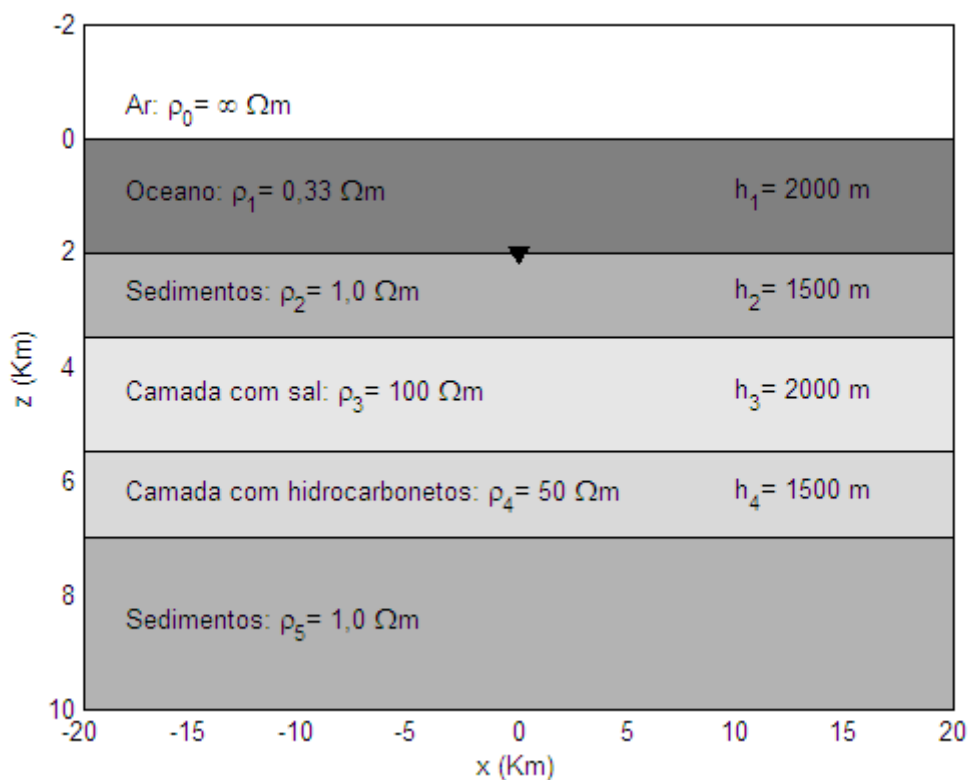


Figura 21- Modelo geológico 1D com bloco resistivo à uma profundidade em relação ao assoalho marinho de 1500 metros, constituído pela camada salina possuindo resistividade elétrica ρ_3 igual a 100 ohm-m e espessura h_3 igual a 2000 metros, e pela camada reservatório de hidrocarbonetos com resistividade elétrica ρ_4 igual a 50 ohm-m e espessura h_4 igual a 1500 metros.

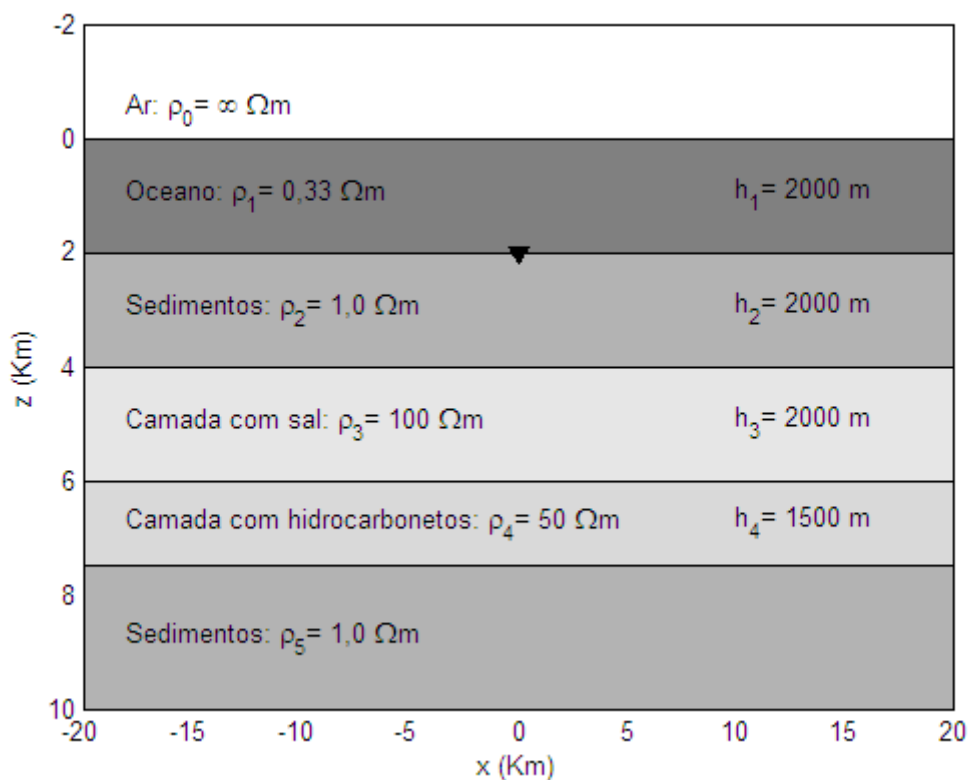


Figura 22- Modelo geológico 1D com bloco resistivo à uma profundidade em relação ao assoalho marinho de 2000 metros, constituído pela camada salina possuindo resistividade elétrica ρ_3 igual a 100 ohm-m e espessura h_3 igual a 2000 metros, e pela camada reservatório de hidrocarbonetos com resistividade elétrica ρ_4 igual a 50 ohm-m e espessura h_4 igual a 1500 metros.

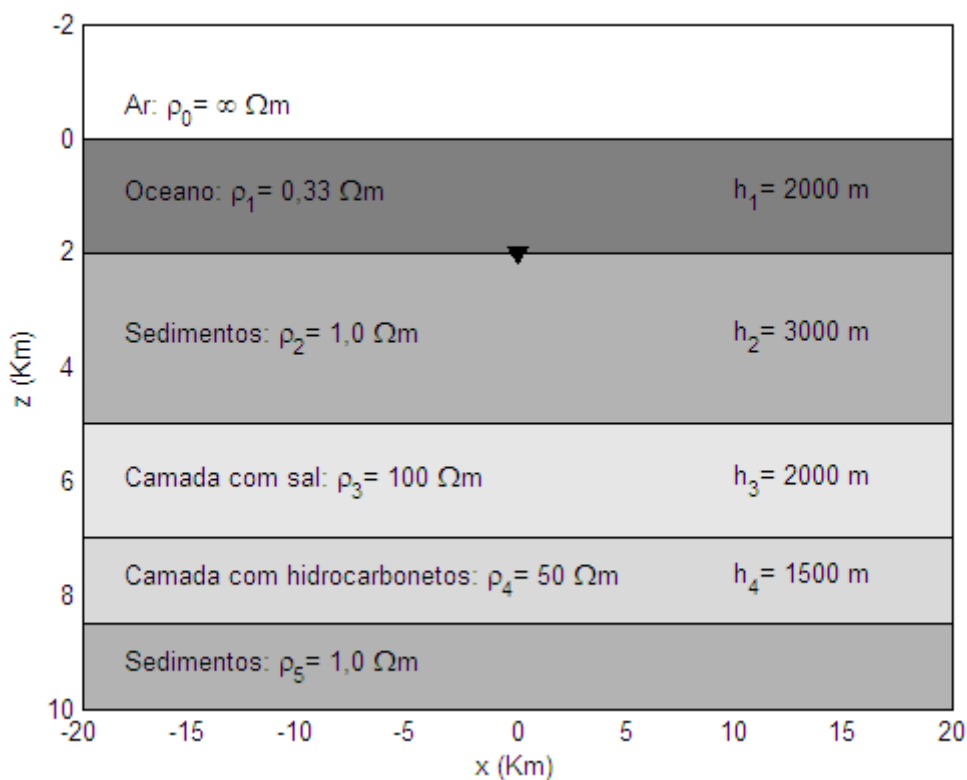


Figura 23- Modelo geoeletrico 1D com bloco resistivo à uma profundidade em relação ao assoalho marinho de 3000 metros, constituído pela camada salina possuindo resistividade elétrica ρ_3 igual a 100 ohm-m e espessura h_3 igual a 2000 metros, e pela camada reservatório de hidrocarbonetos com resistividade elétrica ρ_4 igual a 50 ohm-m e espessura h_4 igual a 1500 metros.

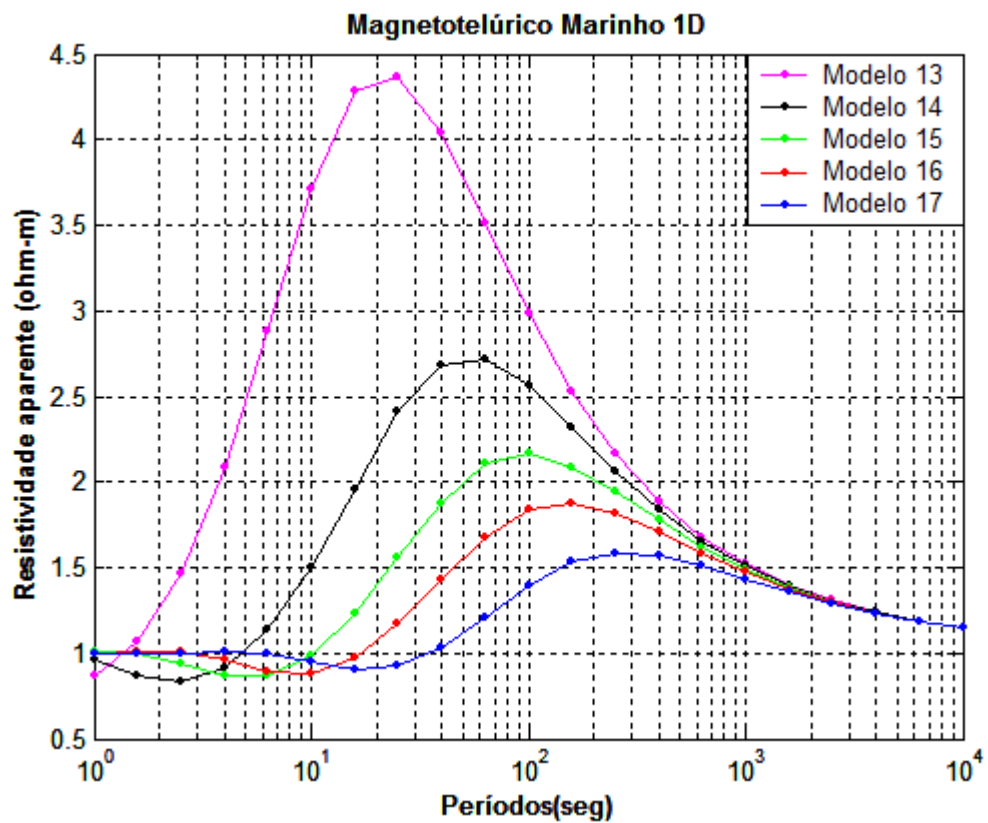


Figura 24– Gráfico da resistividade da figura 19 à figura 23 dos Modelos geoeletrico para o MMT 1D segundo características altamente resistivas.

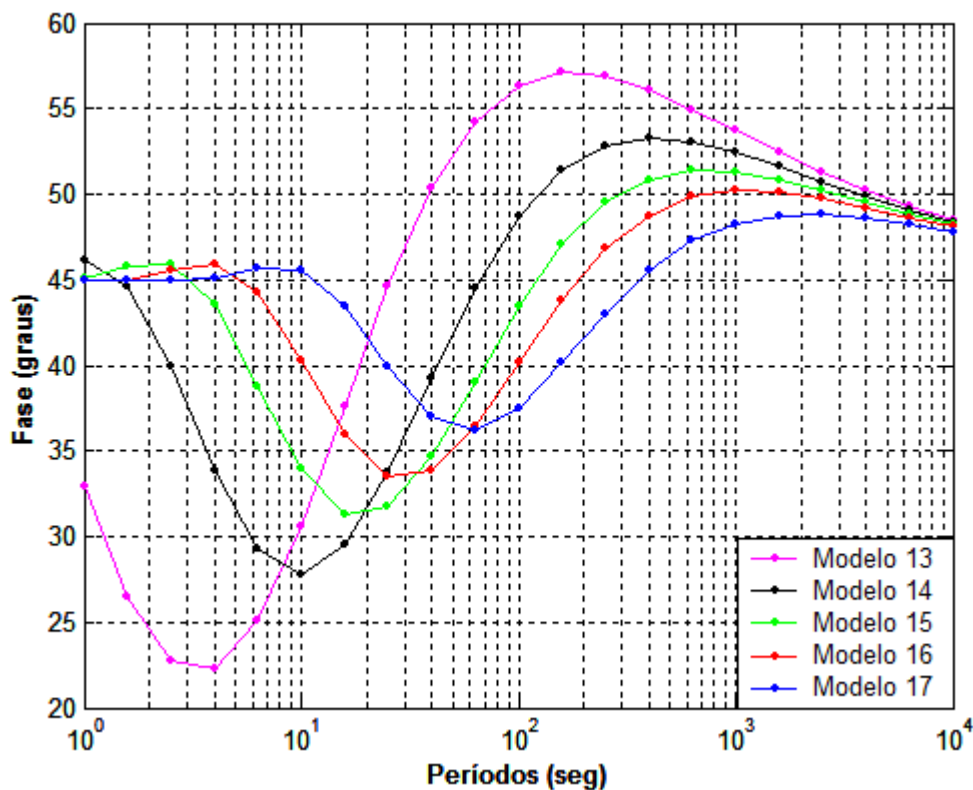


Figura 25– Gráfico da fase da figura 19 à figura 23 dos Modelos geoeletrico para o MMT 1D segundo características altamente resistivas.

As figuras 24 e 25 mostram, respectivamente, a resistividade aparente e a fase referentes aos modelos geoeletrico 19 a 23, propostos para o MMT 1D (Figs.19-23). O gráfico da figura 24 nos mostra a resistividade aparente com distanciamento no que se refere à sua variação na primeira e segunda camada, mas, com proximidade na terceira camada, donde se entende a existência de modelos geoeletrico variados entre si em relação às resistividades absolutas entre suas camadas, respectivamente. Ou seja, percebemos três camadas geoeletrico, sendo a primeira com muito pouca resistividade aparente em relação à segunda camada, já a segunda camada, por sua vez, é bastante resistiva em relação à primeira e a terceira camada e, finalmente, a terceira camada é pouco mais resistiva em relação à primeira. Nota-se também, a existência de corpos mais resistivos em um meio menos resistivo e que não possuem raízes profundas, pois, observa-se o decaimento da resistividade aparente.

Em seguida, percebemos no gráfico da figura 25, no que se refere à fase, e também nos dá compreensão do número de camadas que esse meio geoeletrico possui, ou seja, observa-se um comportamento oscilatório similar entre as curvas, em que os seus pontos de mínimos e máximos dividem cada uma das curvas acima em três ramos (Figura 25): os cinco primeiros ramos, para cada uma das curvas, partem aproximadamente de 45° e a curva referente ao Modelo 19 parte de, aproximadamente, 34° , e culminam em seus pontos de mínimo (ramos decrescentes), em seguida, a partir dos seus pontos de mínimo os cinco segundos ramos, para cada uma das curvas, culminam em seus pontos de máximos (ramos crescentes) e, por fim, a partir dos seus pontos de máximos os cinco terceiros ramos tendem para 46° (ramos decrescentes).

Ao associar o comportamento dessas curvas de fase aos seus respectivos modelos geoeletrico, figs.19-23, respectivamente, interpreta-se em linhas gerais a predominância da existência de três camadas geoeletrico distintas a partir do assoalho marinho. Dessa forma, verifica-se a limitação do método MMT, uma vez que, o método também não diferenciou e/ou identificou através da fase o contato entre a camada de sal e a camada de hidrocarbonetos (Figs.19-23).

4 – CONCLUSÃO

Nos últimos anos, muitas têm sido as inovações para descobertas de hidrocarbonetos em águas profundas, principalmente, técnicas utilizando métodos eletromagnéticos. O método magnetotelúrico marinho, que é uma adaptação do método magnetotelúrico, é uma dessas novas ferramentas, que se apropria da obtenção de dados eletromagnéticos, tornando-se de suma importância no que diz respeito à exploração dos hidrocarbonetos em águas profundas no Brasil. Neste trabalho, a partir das bases teóricas, descrevemos a metodologia acerca da modelagem MMT 1D, no sentido de como determinar as resistividades aparentes e fases do referido método, notamos que sua fonte são as ondas planas oriundas basicamente de interações entre os ventos solares, o campo magnético terrestre e a ionosfera. Apresentamos as componentes H_y e E_x que são usadas para o MMT 1D e vimos que essas componentes são determinadas segundo um modelo geoeletrico de n camadas horizontais homogêneas e isotrópicas. Apresentamos propostas e noções preliminares de ambientes geoeletrico altamente resistivos característicos na prospecção de hidrocarbonetos em águas profundas do MMT 1D, segundo as características das bacias brasileiras e analisamos respectivamente, cada uma das referidas propostas concluindo que, nos cinco primeiros modelos geoeletrico (Figs. 1-5), a partir da análise da figura 6, percebemos três camadas geoeletrico, sendo a primeira com muito pouca resistividade aparente em relação à segunda camada, já a segunda camada, por sua vez, bastante resistiva em relação à primeira e a terceira camada e, finalmente, a terceira camada sendo mais resistiva que a primeira. Além disso, concluímos a existência de corpos mais resistivos em um meio menos resistivo e que não possuem raízes profundas, pois, observa-se o decaimento da resistividade aparente. Em relação à fase (Fig. 7), observamos um comportamento oscilatório similar entre as curvas, em que os seus pontos de mínimos e máximos dividiram cada uma das curvas em três ramos, concluindo a predominância da existência de três camadas geoeletrico distintas a partir do assoalho marinho. Dessa forma, verificou-se uma primeira limitação do método

MMT. O método não diferenciou e/ou identificou através da fase o contato entre a camada de sal e a camada de hidrocarbonetos (Figs.1-5), uma vez que não existe uma “grande” razão de resistividade elétrica entre ambas as camadas (Max-Resistividade/Min-Resistividade). Diferentemente do contato da camada dos sedimentos versus a camada de sal (Figs.1-5), pois, neste caso, existe uma “grande” razão de resistividade elétrica entre ambas as camadas. Da mesma forma, o contato da camada com hidrocarbonetos versus a camada dos sedimentos (Figs.1-5), em que neste caso, também existe uma “grande” razão de resistividade elétrica entre ambas as camadas. A figura 17, referente aos modelos geoeletrico 12 a 16 (Fig. 12-16), mostrou resistividade aparente com proximidade na sua variação na primeira e segunda camada, porém, com um distanciamento na terceira camada, donde se entende a existência de modelos geoeletrico variados entre si em relação às resistividades absolutas entre suas camadas, respectivamente. Ou seja, percebemos três camadas geoeletrico, sendo a primeira com muito pouca resistividade aparente em relação à segunda camada, já a segunda camada, por sua vez, bastante resistiva em relação a primeira e a terceira camada e, finalmente, a terceira camada sendo pouco mais resistiva em relação à primeira. Interpreta-se também sobre a figura 17, a existência de corpos mais resistivos em um meio menos resistivo e que não possuem raízes profundas, pois, observa-se o decaimento da resistividade aparente. Notamos no gráfico da figura 18, referente à fase, também nos dá compreensão do número de camadas que esse meio geoeletrico possui, ou seja, observa-se um comportamento oscilatório similar entre as curvas, em que os seus pontos de mínimos e máximos dividem cada uma das curvas acima em três ramos. Ao associar o comportamento dessas curvas de fase aos seus respectivos modelos geoeletrico (Figs. 12-16), respectivamente, interpretamos em linhas gerais a predominância da existência de três camadas geoeletrico distintas a partir do assoalho marinho. Dessa forma, verificou-se a limitação do método MMT, uma vez que, o método também não diferenciou e/ou identificou através da fase o contato entre a camada de sal e a camada de hidrocarbonetos (Figs.12-16).A figura 24, referente aos modelos geoeletrico 19 a 25 (Fig. 12-16), mostrou a resistividade aparente com distanciamento no que se refere à sua variação na primeira e segunda camada, porém, com proximidade na terceira camada, donde se

entende a existência de modelos geoeletrico variados entre si em relação às resistividades absolutas entre suas camadas, respectivamente. Ou seja, percebemos três camadas geoeletrico, sendo a primeira com muito pouca resistividade aparente em relação à segunda camada, já a segunda camada, por sua vez, bastante resistiva em relação à primeira e a terceira camada e, finalmente, a terceira camada sendo pouco mais resistiva em relação à primeira. Notou-se também, a existência de corpos mais resistivos em um meio menos resistivo e que não possuem raízes profundas, pois, vimos o decaimento da resistividade aparente. Em seguida, percebemos no gráfico da figura 25, no que se refere à fase, e também nos dá compreensão do número de camadas que esse meio geoeletrico possui, ou seja, observamos um comportamento oscilatório similar entre as curvas, em que os seus pontos de mínimos e máximos dividiram cada uma das curvas em três ramos. Ao associar o comportamento dessas curvas de fase aos seus respectivos modelos geoeletrico (Figs.19-23), respectivamente, interpretou-se em linhas gerais a predominância da existência de três camadas geoeletrico distintas a partir do assoalho marinho. Dessa forma, verificou-se, mais uma vez, a limitação do método MMT, uma vez que, o método também não diferenciou e/ou identificou através da fase o contato entre a camada de sal e a camada de hidrocarbonetos (Figs.19-23). Por fim, as figuras 10 e 11 mostraram, respectivamente, a resistividade aparente e a fase referentes aos modelos geoeletrico 08 e 09 propostos para o MMT 1D (Figs. 8-9). A figura 10 nos mostrou a resistividade aparente com um distanciamento bastante elevado na sua variação, donde se percebeu a existência de modelos geoeletrico diferentes entre si em relação às resistividades absolutas entre suas camadas, respectivamente. Ou seja, percebemos três camadas no modelo 08 e duas camadas no modelo 09. A primeira camada do modelo 08, constante, porém, menos resistiva que a segunda e a terceira camada, a segunda camada mais resistiva que a primeira e a terceira camada e, finalmente, a terceira camada sendo menos resistiva que a segunda, porém, com resistividade maior em relação à primeira camada, no modelo 09, a segunda camada muito mais resistiva que a primeira camada. A figura 11, referente à fase, também nos dá compreensão do número de camadas que esse meio geoeletrico possui, ou seja, observou-se um comportamento oscilatório diferente entre suas curvas,

em que os pontos de mínimos e máximos dividem cada uma das curvas em três ramos no modelo 08 e dois ramos no modelo 09 (Figura 11). Portanto, de maneira geral, concluímos que, se não existir uma “grande” razão de resistividade elétrica entre as camadas o método não diferenciará e/ou identificará através da fase o contato entre essas camadas, porém se existir uma “grande” razão de resistividade elétrica entre as camadas, o método com certeza diferenciará e/ou identificará através da fase o contato entre as camadas.

5 – REFERENCIAIS BIBLIOGRÁFICOS

ALMEIDA, F. L. –2013 – **Modelagem Direta de dados 1D e 3D do Método MMT na Investigação para Mapeamento da Base de Camadas de Sal em Águas Profundas**. Projeto de Pesquisa: Relatório Técnico Final. Faculdade de Matemática/Campus Castanhal/UFPA.

FONTES, Sergio L.. **O Método Magnetotelúrico: fundamentos, resultados e simulações na bacia do Paraná**. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/SITE/acao/download/?id=4450>

LUIZ, José Gouvêa. **Informação a priori na inversão de dados magnetotelúricos**. 1999. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém 1999. Disponível em: http://cpgf.ufpa.br/spgf/cpgf2/ger_arquivos/arquivos/TESES%20E%20DISSERTACOES/Jos%C3%A9%20Gouv%C3%Aa%20Luiz%20.pdf.

RIJO, L. – 2001 – "**Teoria dos Métodos Eletromagnético I, II e III**". UFPa, Departamento de Geofísica.(Notas de aula).

SAITO, Kymie Karina Silva. **Modelagem computacional de dados magnetotelúricos marinhos 2-D**. 2009. 46 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2009. Programa de Pós-Graduação em Geofísica. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/5922>.