



República Federativa do Brasil  
Ministério do Desenvolvimento, Indústria  
e do Comércio Exterior  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

(21) **PI0707773-4 A2**



(22) Data de Depósito: 12/02/2007  
(43) Data da Publicação: 10/05/2011  
(RPI 2105)

(51) Int.Cl.:  
G01V 3/12  
G01V 3/38

(54) Título: **MÉTODO ELETROMAGNÉTICO EM ÁGUAS RASAS USANDO UMA FONTE CONTROLADA**

(30) Prioridade Unionista: 13/02/2006 NO 20060685

(73) Titular(es): Multifield Geophysics AS

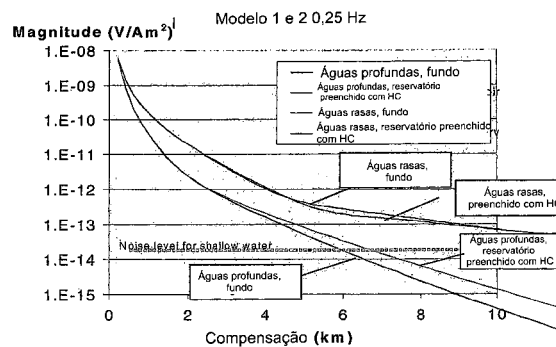
(72) Inventor(es): Brian Anthony Farrely, Harald Westerdahl, Svein Erling Johnstad

(74) Procurador(es): Dannemann, Siemsen, Bigler & Ipanema Moreira

(86) Pedido Internacional: PCT NO2007000044 de 12/02/2007

(87) Publicação Internacional: WO 2007/094676 de 23/08/2007

(57) **Resumo:** MÉTODO ELETROMAGNÉTICO EM ÁGUAS RASAS USANDO UMA FONTE CONTROLADA. A presente invenção refere-se a um método para analisar medidas eletromagnéticas adquiridas (R) efetuadas em ou no oceano (4) ou acima do leito submarino (1) com formações rochosas (3) com resistividade relativamente baixa (p3) para detectar uma possível formação subjacente de um reservatório produtor de petróleo (2) com uma resistividade relativamente elevada (p2), em que um transmissor eletromagnético de baixa frequência (5) disposto no oceano (4) emite um campo eletromagnético (P) que se propaga no oceano (4) nas rochas (3, 2) e no ar (O) acima do oceano; em que os sensores eletromagnéticos (6) são dispostos com os desvios desejadas (x) no oceano (4) para medir o campo eletromagnético P(x), enquanto o campo se propaga, caracterizado pelo fato de que um ou mais componentes do campo eletromagnético (P) é medido em pelo menos um grande desvio (XL) a partir do transmissor (5), onde o campo (P) essencialmente possui apenas sua origem no campo de propagação como um campo (Po) através do ar (O); que os um ou mais componentes do campo eletromagnético (P) medidos no desvio grande (XL) são calculados novamente para um campo recalculado (Fo(x)) até um ou mais desvios (x) que são menores do que o desvio grande (XL); que o campo recalculado (Po(x)) é subtraído do campo (P(x)) para possivelmente salientar um campo cuja origem se deve à possível formação de um reservatório produtor petróleo (2) com uma resistividade relativamente elevada (p2).



O modelo 1 e o modelo 2, 0,25 Hz, resposta de magnitude em e sem hidrocarbonetos no reservatório. Observe que em águas rasas, os hidrocarbonetos fornecerão uma resposta negativa.

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "MÉTODO ELETROMAGNÉTICO EM ÁGUAS RASAS USANDO UMA FONTE CONTROLADA".

Introdução

5 A presente invenção refere-se à geofísica. Mais particularmente a presente invenção refere-se à geofísica eletromagnética no oceano para detecção de estratos rochosos produtores de petróleo nas camadas rochosas geológicas abaixo do leito submarino.

Antecedentes da Invenção

10 As camadas rochosas abaixo do leito submarino serão saturadas por água e contêm íons que tornam as rochas eletricamente condutivas, proporcionando desta forma uma condutividade elevada ou uma resistividade baixa,  $\rho = 0,7$  a  $3 \Omega m$ . Neste relatório descritivo usou-se o termo resistividade, expressos pela abreviação de omímetro,  $\Omega m$ . O petróleo na forma de  
15 óleo ou gás desloca água nos espaços porosos das ditas camadas rochosas produtoras de petróleo  $\Omega m$ . O petróleo não dissolve sais, portanto, não é um bom condutor de eletricidade, e assim sendo, as camadas rochosas produtoras de petróleo fornecem uma resistividade elevada,  $\rho = 20$  a  $200 \Omega m$ , e em alguns casos possui uma resistividade de até  $1000 \Omega m$ . A água marinha  
20 contém diversos sais dissolvidos diferentes, e geralmente possui uma resistividade de cerca de  $0,3 \Omega m$ .

Demonstração do Problema e Técnica Anterior

É desejável encontrar possíveis camadas rochosas produtoras de petróleo. É possível explorar estruturas geológicas por meio de prospecção sísmica, por exemplo, sísmica de reflexão ou sísmica de refração, variação de amplitude com desvio, etc., mas, nem sempre as partes produtoras de petróleo de uma camada rochosa ou de uma formação geológica podem, na análise sísmica, ser significativamente distinguíveis das partes não produtoras de petróleo da mesma formação ou de outras formações não produtoras de petróleo. No pedido de patente norte-americana US2003/0052685 e no artigo denominado "Remote detection of hydrocarbon filled layers using marine controlled source electromagnetic sounding", 64ª Conferência e Mos-  
30

tra EAGE, Florença, Itália, 27 a 30 de maio de 2002, Eidesmo et al. descreve a prospecção eletromagnética por meio de um transmissor de dipolo elétrico disposto horizontalmente e de uma antena de dipolo elétrico no oceano acima do leito submarino com uma camada de hidrocarboneto profundamente enterrada. A antena dipolo dos receptores são dois conjuntos horizontais de eletrodos ortogonais. Eidesmo compara os cálculos dos dois modelos. Um dos modelos compreende uma camada de hidrocarboneto de 100m de espessura com resistividade de 100  $\Omega$ m, e situadas 1000 m abaixo do leito submarino com resistividade de 1  $\Omega$ m em 800 m de profundidade da água do oceano. O outro modelo não possui camada de hidrocarboneto. A camada de hidrocarboneto aumenta em dez vezes a amplitude do sinal relativo entre a fonte elétrica horizontal em linha e uma fonte elétrica horizontal de linha cruzada, em um desvio de 4 a 6 km da fonte. A camada de hidrocarboneto também fornece diferenças de fase significativas entre essas duas direções do transmissor elétrico. Esta divisão da amplitude é mais significativa do que as variações de resistividade ordinárias esperadas nas camadas rochosas acima do reservatório.

O método EMG também é descrito no documento WO200013046.

Para Eidesmo et al. a patente US 6628119 "Method and apparatus for determining the content of subterranean reservoirs" descreve um método para determinação das propriedades de um reservatório subterrâneo, cuja posição e geometria são conhecidas a partir do prévio mapeamento sísmico. Um campo eletromagnético é imposto por um transmissor e é detectado pela antena, os quais também estão dispostos no leito submarino. As propriedades das ondas detectadas são utilizadas para determinar se o reservatório contém água ou hidrocarbonetos.

O pedido de patente internacional WO01/57555 define um método para determinar as propriedades de um reservatório submarino de geometria aproximadamente conhecida, sendo que o dito método compreende as seguintes etapas: aplicar um campo eletromagnético de período variável às camadas que contêm o reservatório, detectar a resposta do campo de

onda EM, pesquisar no campo de onda a resposta para um componente que representa uma onda refratada, e determinar o conteúdo do reservatório com base na presença ou ausência de um componente de onda refratado.

O pedido de patente internacional WO00/54075 descreve aproximadamente a emissão vertical de ondas eletromagnéticas para a reflexão emitida por um reservatório em potencial, e se restringe a efetuar a prospecção imediatamente acima da extensão horizontal do reservatório. São empregados uma antena parabólica de emissão vertical e receptores próximos a essa antena, sendo que todas as antenas estão dispostas praticamente logo acima do reservatório.

A patente norte-americana US 4258321 *Neale* descreve uma antena transmissora vertical para a emissão selecionada de sinais polarizados verticalmente ou um antena de quadro, e um par de receptores, sendo que um deles possui uma antena vertical e o outro uma antena de quadro. Um sinal de calibração é emitido ao longo da superfície terrestre e é recebido por todos os receptores, e um sinal diferencial em amplitude e fase é amplificado e registrado, sendo subtraído dos sinais de medição em cada receptor subsequente na investigação.

O pedido de patente norte-americana WO02/14906 do EMGS descreve a prospecção de um reservatório submarino através da transmissão emitida pela antena dipolo elétrica em linha com a antena do receptor rebocada no oceano, para a recepção de um primeiro modo de resposta refratada de um reservatório, e a comparação com o segundo modo refratado a partir do mesmo reservatório, sendo que os dois modos podem ser ortogonais, ou um deles um modo TM e o outro um modo TE, e assim por diante.

Eletromagnetic Geoservices redigiu em documento publicado na Internet em [www.emgs.no](http://www.emgs.no), uma "Revisão Inter pares" (*Peer Review*) de Constable da Scripps Institution of Oceanography, que "As conclusões da avaliação do modelo são que, se o alvo não for muito pequeno quando comparado com sua profundidade de soterramento, e se a profundidade da água for suficiente para suprimir a onda atmosférica, então a assinatura da fonte controlada da camada preenchida por óleo é detectável, produzindo de duas

a dez amplitudes diferentes de fonte controlada do que os modelos sem camada. Os sinais estão acima do limiar de ruído, e os parâmetros experimentais (frequência, faixa, antena e potência) são exeqüíveis".

A presente invenção visa priorizar a exploração, e não se restringir à limitação anterior expressa como "se a profundidade da água for suficiente para suprimir a onda atmosférica" citada acima. Os inventores sugerem conduzir as medições eletromagnéticas usando, preferencialmente, um transmissor rebocado e receptores estacionários no oceano, e medir o sistema elétrico na distância em que se esteja bastante seguro de que a onda atmosférica é essencialmente dominante, e as ondas através das rochas e do oceano estejam essencialmente atenuadas. Subseqüentemente, o campo elétrico, conforme medido nos desvios distantes, é recalculado para desvios curtos, e o campo recalculado é subtraído das medições. O que resta, portanto, é um campo elétrico corrigido em que as contribuições das camadas produtoras de petróleo de resistividade elevada apareceriam com maior nitidez.

Um dos pedidos de patente internacionais de patente da Statoil WO03/100467 *Amundsen*, "System and method for electromagnetic wavefield resolution", descreve um método pra processar a resposta de um campo de onda eletromagnética durante a operação de perfilagem do leito do oceano. O campo de onda é separado em componentes de propagação ascendentes e descendentes. O componente de propagação descendente representa as reflexões da superfície do oceano, enquanto o componente de propagação ascendente representa as reflexões e as refrações das camadas subterrâneas. O componente de propagação ascendente é então submetido à análise. De acordo com a página 2, linhas 7 a 10 de *Amundsen*, o processamento, a análise e a interpretação perfeita dos dados eletromagnéticos, exigem, de modo ideal, informações completas sobre o campo de onda quanto ao campo de onda a ser separado em componentes de propagação ascendente e descendente. Na página 3, linhas 25 a 28, *Amundsen* descreve os componentes  $E_1$  e  $E_2$  como campos elétricos na primeira e na segunda direção longitudinal, e  $H_1$  e  $H_2$  como campos magnéticos na primeira e na

segunda direção. Na página 3, linhas 8 e 9, Amundsen também declara claramente que cada componente registrado do campo de onda eletromagnético deveria ser calibrado de forma adequada antes de a técnica de resolução se empregada. Amundsen também descreve que a calibração das sensibilidades do sensor para os campos E e H pode ser conduzida no campo próximo. Entretanto, os gradientes do campo podem ser consideráveis no campo próximo, podendo prevalecer os componentes que talvez não sejam facilmente controlados. O presente método fornece um método alternativo para calibração de receptores, favor examinar abaixo. Outro pedido de patente internacional de Statoil, WO2005/096021 Amundsen, "Electromagnetic wavefield analysis" descreve um método para análise de campos de onda eletromagnéticos. O método compreende etapas de medição dos campos magnéticos e elétrico usando ao menos um receptor, filtros de formulação relativos a cada um dos componentes mutuamente ortogonais para cada um dos campos elétricos e magnéticos, e a aplicação dos filtros nos dados medidos para decompor o campo de onda em componentes de propagação ascendente e descendente.

A presente invenção visa preponderantemente à utilização, e não a limitação imposta pela limitação anterior expressa como "se a profundidade da água for suficiente para suprimir a onda atmosférica" acima. Os inventores sugerem conduzir medições eletromagnéticas, preferencialmente, com um transmissor rebocado e receptores estacionários no oceano, e medir o sistema elétrico em um desvio tão grande que é razoável confiar que a onda atmosférica é essencialmente dominante, e que as ondas através das rochas e do oceano estejam essencialmente atenuadas. Subseqüentemente, o recálculo do campo elétrico, conforme medido nos desvios grandes, é efetuado para desvios mais curtos, e o campo recalculado é subtraído das medições. O que resta é um campo elétrico corrigido em que as contribuições das camadas produtoras de petróleo de resistividade elevada apareceriam com maior nitidez. Um das vantagens da presente invenção é que são exigidos os dados de apenas um componente do campo, por exemplo, o campo E em linha, a fim de atingir o efeito desejado, em contraste aos métodos de

Lasse Amundsen descritos no pedido de patente WO2005/096021, que em sua reivindicação principal descreve que ao menos dois componentes deveriam ser medidos, ambos um componente elétrico e um componente magnético do campo, conforme citado: "Método de análise de um campo de onda eletromagnético, sendo que o método compreende as etapas de: medição dos campos elétrico e magnético de ao menos um receptor;...".

Como complemento, a presente invenção também não é confiável no sentido de o sensor possuir uma constante de calibração correta para o nível absoluto (visto que todos os sensores são iguais), já que a "calibração" é conduzida através das medições nos desvios distantes. As constantes de calibração correta para os campos E e H são condicionais, conforme descrito no pedido de patente de Amundsen WO03/100467 citada acima.

#### Breve Sumário da Invenção

A presente invenção refere-se a uma solução para alguns dos inconvenientes citados acima, e é um método para análise de medições eletromagnéticas adquiridas R, efetuadas sobre ou no oceano 4 acima do leito submarino 1 com formações rochosas 3 dotadas de resistividade relativamente baixa  $\rho_3$  para detectar uma possível formação de um reservatório produtor de petróleo subjacente 2 que possui resistividade relativamente elevada  $\rho_2$ , em que o transmissor eletromagnético de baixa frequência 5 é disposto no oceano 4 e emite um campo eletromagnético P que se propaga no oceano 4, nas rochas 3 e 2 e no ar 0 acima do oceano; em que os sensores eletromagnéticos 6 são dispostos com os desvios desejados x no oceano 4 para medição do campo eletromagnético P(x), enquanto o campo se propaga, caracterizado pelo fato de que um ou mais componentes do campo eletromagnético P são medidos em um desvio grande  $x_L$  a partir do transmissor 5, onde o campo P possui apenas, essencialmente, sua origem a partir do campo que se propaga como campo  $P_0$  através do ar 0; que um ou mais componentes do campo eletromagnético P medido no desvio grande  $x_L$  é calculado para um campo recalculado  $P_0(x)$  para um ou mais desvios x que são mais curtos que o desvio grande  $x_L$ ; que o campo recalculado  $P_0(x)$  é subtraído do campo P(x) para, possivelmente, destacar um campo que pos-

sua origem nas anomalias de resistividade no subsolo, como a possível formação de um reservatório produtor de petróleo 2 dotado de resistividade relativamente elevada  $\rho_2$ .

5 As especificações complementares e vantajosas da invenção são constatadas nas reivindicações anexas da patente.

A invenção é ilustrada nos desenhos anexas, que pretendem ilustrar, sem, no entanto, limitar a invenção, a qual estará limitada apenas pelas reivindicações anexas.

10 A figura 1 mostra a magnitude do campo eletromagnético medido, ou "a resposta da magnitude", medida em  $V/Am^2$ , calculada a partir dos modelos da camada 1 e 2 (ilustrados na figura 13) para uma frequência de 0,25 Hz. A resposta da magnitude é calculada na ausência e na presença de hidrocarbonetos no reservatório. Favor notar que, em águas rasas, os hidrocarbonetos fornecerão uma resposta negativa entre cerca de 4 a 5 km, e  
15 cerca de 9 km a partir da fonte.

A figura 2 mostra uma resposta de magnitude padronizada (resposta relativa quando comparada com o reservatório preenchido com água). A curva de "Águas Profundas" foi interrompida no ruído de fundo esperado para águas rasas.

20 A figura 3 mostra curvas para a resposta de fase calculada sobre o modelo 1 (águas rasas), 0,25 Hz.

A figura 4 mostra curvas para a resposta de fase calculada sobre o modelo 2, 0,25 Hz (águas profundas). "O limite de desvio de ruído" indica o desvio esperado no limite de ruído para águas rasas.

25 A figura 5 mostra a resposta de fase padronizada (a diferença de fase em relação ao modelo secundário).

A figura 6 mostra uma resposta de magnitude padronizada para o modelo 1 para frequências diferentes.

30 A figura 7 mostra uma resposta de fase padronizada para o modelo 1 para frequências diferentes.

A figura 8 mostra as curvas de magnitude calculada para três valores esperados diferentes da resistividade das camadas geológicas su-

perficiais 3. As resistividades estão indicadas nos diagramas. No restante constam os mesmos parâmetros do modelo 1.

5 A figura 9 mostra curvas de fase para três valores de resistividade específicos para as camadas geológicas superficiais 3. No restante constam os mesmos parâmetros do modelo 1.

A figura 10 mostra variações da profundidade da fonte ao longo da linha HBL do levantamento de Grane em 2003. As estações receptoras ignoradas pela fonte rebocada estão indicadas como R1, R2,..., R16.

10 A figura 11 mostra as alterações nas curvas de fase como funções de pequenas alterações (10 m) nas elevações das fontes acima do leito submarino.

A figura 12 mostra os resultados do modelo (modelo 1) na ausência e na presença de hidrocarbonetos, da fonte a 50 m acima do leito submarino e na superfície do oceano (125m cima do leito submarino).

15 A figura 13A ilustra os modelos para o cálculo dos dados fictícios. Um modelo para águas rasas na ausência e na presença de uma camada produtora de hidrocarbonetos, e um modelo de águas profundas na ausência e na presença de uma camada produtora de hidrocarbonetos.

20 A figura 13B ilustra superficialmente as trajetórias ao longo da qual a energia elétrica pode propagar, e particularmente que a energia para desvios grandes se propagará pelo ar.

A figura 13C ilustra um navio rebocando uma antena eletromagnética, por exemplo, uma antena dipolo elétrica horizontal, e os receptores dispostos ao longo do leito submarino.

25 A figura 14 mostra a magnitude da subtração da onda atmosférica nos dados fictícios de águas rasas usando o modelo 1.

30 A figura 15 mostra resultados da subtração da onda atmosférica nos dados fictícios de águas rasas (modelo 1); magnitude padronizada, quando comparada com a magnitude padronizada para o caso de águas profundas.

A figura 16 ilustra os resultados da subtração da onda atmosférica nos dados fictícios de águas rasas (modelo 1); fase padronizada (diferen-

ça de fase), quando comparada com a fase padronizada para o caso de águas profundas.

A figura 17 mostra os resultados da subtração de onda atmosférica no receptor de Grane R1 - magnitude.

5 A figura 18 mostra os resultados da subtração de onda atmosférica no receptor de Grane R12 - fase.

A figura 19 mostra os resultados da subtração de onda atmosférica no receptor de Grane R11 - magnitude.

10 A figura 20 mostra os resultados da subtração de onda atmosférica no receptor de Grane R11 - magnitude.

A figura 21 mostra os resultados da subtração de onda atmosférica no receptor de Grane R12 e R11 para comparação com os gradientes dentro dos segmentos na faixa de desvio de 5 a 10 km. Para as posições dos receptores nº R11 e R12, favor examinar a figura 10 que mostra a profundidade da fonte e as posições para as estações receptoras.

15 A figura 22a ilustra as medições reais do levantamento de Grane. A representação mostra a impedância intrínseca aparente E/H para as medições eletromagnéticas executadas na transmissão de 0,25 Hz. Favor notar que o gráfico deprime nos desvios grandes, que é onde a onda atmosférica domina. Nessa distância há uma relação constante entre E e H.

20 A figura 22b mostra os dados medidos do levantamento de Grane em que é mostrada uma representação da fase relativa à distância fonte-receptor. As diferenças de fase não estão colocadas em uma relação mutuamente correta, mas flutuante.

25 A figura 22c ilustra diferenças de fase modeladas para soluções analíticas para as diferenças de fase para os componentes E em linha e H reticulados calculados para uma profundidade de 140 metros, mantendo a antena 50 metros acima do leito submarino e frequência emitida de 0,25 Hz. Os gráficos mostram fases como sendo calculadas através das resistividades na superfície de 0,5  $\Omega$ m, 1,0  $\Omega$ m e 1,5  $\Omega$ m.

30

#### Descrição da Invenção e Exemplos de Dados Medidos e Modelados

O trabalho pertinente a presente invenção focalizou a análise

dos distintos aspectos de uso de um método de acordo com a invenção, a perfilagem do leito do oceano (SBL) em águas rasas, e a testagem de um método inovador para a subtração da onda atmosférica com vistas a enfatizar uma resposta do reservatório sob tais condições.

5           A aquisição de dados em si pode ser conduzida da seguinte forma: O campo eletromagnético emitido F é um campo alternado com frequências na faixa de 0,01 a 200 Hz. O campo eletromagnético emitido F pode, em uma modalidade preferencial, compreender frequências na faixa de 0,1 a 1,0 Hz, por exemplo, 0,25 Hz. O componente medido do campo eletromagnético F é, preferencialmente, o campo elétrico F. Um componente do  
10 campo eletromagnético F a ser medido também pode ser o campo magnético B.

O transmissor 5 a ser usado pode compreender eletrodos 50a e 50b dispostos em separado no leito submarino, de modo a formar um transmissor dipolo elétrico 5, porém também pode compreender um transmissor  
15 magnético. O transmissor 5 é, nesta descrição, uma antena de transmissão geralmente horizontal com eletrodos 50a e 50 b dispostos, em geral, na mesma profundidade, de preferência rebocada atrás de um navio que fornece energia elétrica ao transmissor 5. Alternativamente, um transmissor magnético pode ser usado e disposto para gerar um campo geralmente correspondente ao campo do transmissor dipolo elétrico 5.  
20

Os eletrodos de medição ou o sensor 6 são dispostos, preferencialmente, em pares ao longo da linha reta 7 que se estende a partir do transmissor 5. Um eixo geométrico principal no transmissor 5, isto é, um eixo geométrico entre os eletrodos 50A e 50B se estende geralmente no mesmo plano vertical que a linha 7, ou seja, o campo E em linha é medido, em outras palavras, o denominado magnético transversal ou TM é descrito e usado nestes experimentos. De acordo com um método alternativo segundo a invenção, o eixo geométrico principal no transmissor 5, isto é, um eixo geométrico entre os eletrodos 50 e 50B estão dispostos, em geral, transversalmente ao plano vertical através da linha 7 com os sensores 6.  
25  
30

O transmissor 5 pode estar disposto a pouca profundidade ou na

superfície de 4, ou rebaixado em direção ao leito submarino 1 ou no leito submarino 1.

Em uma modalidade preferencial da invenção, o levantamento é conduzido em uma área do oceano, cuja profundidade de leito submarino 1  
5 abaixo da superfície do oceano 4 é essencialmente menor do que a profundidade da formação do reservatório produtor de petróleo subjacente 2 abaixo do leito submarino 1.

A análise que foi executada mostra que deveria ser considerado o uso de outras frequências além da que é usada atualmente em águas profundas, e que o uso de frequências variadas e iniciando com frequências  
10 mais baixas pode contribuir com informações adicionais, as quais podem ser decisivas no posterior trabalho de interpretação e processamento dos dados. Os resultados também mostram que, em águas rasas, é possível permitir a condução da aquisição de dados com uma fonte próxima ou na superfície,  
15 com as vantagens assim inferidas em relação ao aumento do controle e da estabilidade da fonte.

O método proposto por esta invenção para a subtração de ar atmosférico foi testado em um grupo de dados fictícios e também em um grupo de dados reais a partir do levantamento geofísico no campo de Grane,  
20 o denominado Levantamento Grane em 2003. O método de acordo com a invenção parece operar de forma satisfatória, entretanto, é necessário estudar uma testagem mais completa com vistas a conhecer os pontos fracos e os pontos fortes do método. Acreditamos que o método de acordo com a invenção pode ser aperfeiçoado calculando-se uma onda atmosférica mais  
25 precisa para subtração que melhor contabilize o padrão de radiação para a fonte aplicada no levantamento, e a resistividade da camada geológica superficial, isto é, as rochas 3 entre o leito submarino 1 e a camada 2 que pode ser produtora de petróleo e, portanto, de alta resistividade. O termo "superficial" será usado no lembrete desta descrição. Uma das vantagens principais  
30 é que não são exigidos mais de um componente vetorial (aqui é utilizado o campo E em linha). O método pode ser aperfeiçoado incluindo-se componentes vetoriais adicionais e, por exemplo, utilizando informações sobre a

direção de propagação da onda que pode ser obtida a partir do produto vetorial dos campos E e H.

### Motivação

O desejo de estender o uso do HBL para profundidades de águas progressivamente rasas necessita considerar a influência das ondas atmosféricas com mais detalhe. Para a maior parte dos casos, a não ser quando o reservatório está localizado em águas rasas, o parecer geral é que se dependeria da atenuação da contribuição da onda atmosférica para o fornecimento de uma diferença suficiente da resposta eletromagnética acima e fora do reservatório. Conforme citado acima, uma das condições para a perfilação eletromagnética das rochas no leito submarino de acordo com Constable, é que se possua o suficiente para que a onda atmosférica seja suprimida.

O fundamento para a produção da invenção foi uma tentativa de se desenvolver rotinas para a remoção de onda atmosférica usando separação de campo de onda, o que, no entanto, não parece proporcionar o efeito desejado para águas rasas. A razão pode ser o início a partir de um modelo um tanto simplificado do mundo real, o modelo entre outros que exige um controle absoluto dos parâmetros de calibração para os receptores elétrico e magnético, os quais, na prática, não se revelaram triviais.

Os inventores, com base nessas experiências, sugeriram testar um método alternativo que, em lugar de se basear na calibração absoluta, usa os dados de medição adquiridos na faixa longa de desvios para a "calibração" e o cálculo de atributos. Com o método sugerido de acordo com a invenção, a calibração absoluta será supérflua, já que as condições elétricas e magnéticas no ambiente dos receptores serão automaticamente levadas em consideração.

O propósito é tentar utilizar o fato de que a onda atmosférica que desejamos reduzir se propaga através de dois meios homogêneos, água e ar, sendo que ambos possuem valores de condutividade e de permissividade facilmente mensurados ou precisamente bastante conhecidos. No entanto, o trabalho neste projeto demonstra que a onda atmosférica registrada desta

forma em desvios distantes contém bastante energia oriunda do subsolo mais próximo à fonte.

Para os desvios longos fonte-receptor comparados à profundidade da água, por exemplo, na faixa de 10 a 15 km, não chegaram outros sinais além da onda atmosférica. Com base no fato de que a onda atmosférica isoladamente é medida nesta faixa, acreditamos que seria possível recalcular a influência da onda atmosférica para desvios um pouco mais curtos, por exemplo, 4 a 8 km onde será obtida uma resposta do reservatório. A resposta estimada de onda atmosférica pode ser usada posteriormente para subtração ou outra forma de compensação ou "construção de atributo" de modo a aumentar a visibilidade do reservatório nos dados.

Os métodos baseados no princípio de acordo com a invenção podem ser usados para manipular as variações locais na resposta do receptor ("acoplamento"), já que é possível optar por utilizar os mesmos grupos físicos de receptor/receptores nas duas classes de desvio (10 a 15 km e 4 a 8 km). As classes de desvio ideais dependerão do modelo e dos parâmetros de aquisição, em frequência particular, e devem ser avaliados em cada caso específico pela análise dos dados de medição e do modelo.

#### Modelo 1D

Para melhor entendimento da contribuição a partir das ondas atmosféricas nos dados para águas rasas, realizou-se o modelo 1D. Como base, um modelo que é uma versão simplificada da situação de Grane:

O Modelo 1 é definido da seguinte forma:

- Profundidade da água: 130 m
- Resistividade de Sobrecarga: 1,5  $\Omega$ m
- Resistividade do reservatório: 50 ... (0,8  $\Omega$ m se não produtora de petróleo, isto é, contendo água)
- Profundidade do reservatório (abaixo do leito submarino): 1700 m
- Espessura do reservatório: 80 m
- "semi-espaco", que consiste em tudo no "semi-espaco", abaixo do supramencionado: 2  $\Omega$ m.

Definiu-se o modelo 2 idêntico ao modelo 1, diferindo apenas pelo fato de que a profundidade da água é definida como sendo de 2.000 metros no lugar de 130m, de modo que o pulso do ar não influencie os resultados (se o transmissor e o receptor estiverem situados no leito submarino).

5 Dessa forma, possuímos um modelo para águas rasas e um para águas profundas.

Em primeiro lugar, considerou-se a frequência de 0,25 Hz, subsequentemente também conduziu-se a alguns modelos para comparação com outras frequências.

10 Resposta do Reservatório na Presença ou na Ausência de onda Atmosférica (águas rasas e profundas)

As figuras 1 a 5 mostram os resultados do modelo 1D usando os modelos 1 e 2 na ausência e na presença de hidrocarbonetos para 0,25 Hz. A partir da figura 1, que exibe magnitude versus desvio, observou-se que o modelo 1 (águas rasas), em geral, fornece sinais mais fortes, mas menor separação entre o reservatório contendo água e contendo hidrocarboneto. Também observou-se que a resposta a um reservatório produtor de hidrocarboneto presente no modelo com águas rasas é o oposto (negativo) quando comparado ao modelo com águas profundas, favor observar a partir do desvio de cerca de 4,5 km a partir da fonte. Este ponto é mais bem-ilustrado nos gráficos padronizados mostrados na figura 2, onde, para águas rasas, o gráfico incide abaixo de 1 quando 4 km forem ultrapassados. Na figura 1 indicou-se por uma linha vermelha o nível de ruído esperado, o que se baseia nos dados do levantamento HBL no campo Grane em 2003. Estudou-se em quais desvios o ruído começa a dominar e relacionados aos resultados do modelo para águas rasas. Considerando que o nível de ruído para águas rasas é mais elevado do que para águas profundas devido a um efeito reduzido de classificação contra o ruído magnético-telúrico, um ruído denominado ruído MT, não seria possível obter uma separação mais adequada além da que é limitada pela linha de ruído, mesmo com um método "perfeito" de separação tradicional. Assim, colocou-se a escala vertical das figuras 2 e 4 de modo que os gráficos não sejam mostrados quando passarem abaixo do

15

20

25

30

limite de ruído.

As figuras 3 e 4 mostram respostas de fase. Observou-se que tem-se uma situação semelhante para a fase como para a magnitude que é uma resposta oposta à presença de uma camada produtora de hidrocarbureto entre os modelos para águas profundas e rasas respectivamente. Além disso, notou-se que a resposta da fase para águas rasas não é muito inferior à de águas profundas se forem considerado o nível de ruído esperado.

#### Variações na Resposta para Diferentes Freqüências

A resposta varia conforme a freqüência. Isto é válido para o modelo de águas rasas e para o modelo de águas profundas, considerando que o efeito é expresso de modo um pouco diferente nos dados brutos. Em águas rasas a resposta visível do reservatório nos dados brutos diminuirá em freqüências mais elevadas, enquanto é normalmente amplificada para freqüências mais baixas. A razão para isto é, provavelmente, que o teor das ondas atmosféricas das "ondas refratadas" a partir dos substratos é reduzido para freqüências mais elevadas, considerando que, simultaneamente, a perda na "onda direta" nos substratos aumenta.

As figuras 6 e 7 mostram a resposta nas águas rasas (modelo 1) para três freqüências distintas (0,1, 0,25 e 1 Hz).

#### A Onda Atmosférica Compreende Informações sobre o Substrato

Ao estudar os resultados do modelo, é possível observar que os substratos afetam a onda atmosférica, quer dizer, a energia que primeiramente se propaga de modo descendente para o substrato e em seguida reaparece na superfície atravessa a camada de água e o ar para depois ser registrada como parte de uma onda atmosférica em um desvio distante do receptor. Favor observar a figura 13b. A energia também atravessará o ar para dentro do solo. A proporção de energia que pertence às diferentes trajetórias dependerá do modelo de resistividade, da freqüência, da elevação da fonte acima do leito submarino, do padrão de radiação (a assinatura da fonte) e da profundidade da água.

O padrão de radiação oriundo de uma antena elétrica (no campo próximo) pode implicar em um cálculo especialmente complicado para as

condições de águas rasas, em particular para as propriedades eletromagnéticas variáveis dos substratos. Presentemente os programas de cálculo que lidam bem com esses problemas e em detalhe não estão disponíveis. Entretanto, pode-se obter uma solução simplificada usando um programa de modelo 1D que calcula a resposta de uma fonte dipolo unitária. Neste projeto, tenta-se usar um programa 1D para descobrir a potência do pulso de ar para desvios distantes como uma função da resistividade da camada superficial. Foram selecionadas três resistividades distintas na superfície: 0,3  $\Omega\text{m}$  (correspondente à água do oceano), 1,5  $\Omega\text{m}$  (camada superficial "ordinária"), e 5  $\Omega\text{m}$  ("camada superficial de resistividade elevada"). Os demais parâmetros (por exemplo, fonte, profundidade, etc.) são idênticos, conforme definido para o modelo 1 (veja abaixo na especificação).

Os resultados destes cálculos são exibidos na figura 8, que mostra gráficos de magnitude para três resistividades distintas para as camadas geológicas superficiais na camada superficial de petróleo, e na figura 9, que mostra o efeito nos gráficos de fase para resistividades variáveis nas camadas geológicas superficiais. A onda atmosférica domina onde a resposta de fase é deprimida (velocidade aparente igual ao infinito), e da figura 9 pode-se observar que a onda atmosférica começa dominando em diferentes desvios para os três modelos. Esta imagem se deve ao fato de que a contribuição da interferência oriunda da "onda direta" é mais forte e mais predominante para as resistividades da camada superficial mais elevadas.

Estudando a faixa até o ponto distante à direita nos desenhos (no desvio de 20 km), onde a onda atmosférica domina em todos os modelos, e onde os gráficos de fase se deprimem, vide a figura 9, observou-se que a potência do sinal é distinta para os três casos, vide a figura 8. As figuras mostram que a onda atmosférica é registrada com mais vigor quando a resistividade da camada superficial é alta do que quando é baixa, significando que a "onda atmosférica" contém informações geológicas e não consiste meramente em energia que se propaga diretamente da fonte para o receptor. Não analisar-se-á os problemas quanto a que proporção deste aumento é resultado de mudanças no campo próximo à fonte (impedância da fonte,

etc.) ou quanto aos receptores, ou na forma de reflexões, refrações ao longo da trajetória. Simplesmente determinou-se que a magnitude da onda atmosférica, conforme registrado nos receptores nos desvios grandes, é afetada pela resistividade dos substratos. Compreende intrinsecamente informações geológicas que podem ser exploradas através de inversão e interpretação.

#### Efeito da Profundidade da Fonte

#### Variações na Profundidade da Fonte Afetam as Medições

Quando a elevação da fonte acima do leito submarino e/ou a profundidade abaixo da superfície do oceano é modificada, os sinais recebidos nos receptores para desvios distintos também variam. Isto se refere a águas rasas e águas profundas, mas o efeito é mais forte para águas rasas, já que a mudança da profundidade próxima à superfície do oceano é maior. Refere-se também à resposta de fase e de magnitude, mas relativamente mais à resposta da fase. O efeito aumenta com a frequência crescente.

A figura 10 mostra o modo como a profundidade da fonte pode variar ao longo de uma linha na prática. Os dados são obtidos a partir do levantamento no campo de Grane em 2003, e mostram que a profundidade para o transmissor 5 varia entre 70 m e 105 m.

Para investigações complementares acerca do efeito da variação da profundidade da fonte, conduziu-se um modelo simplificado com base no modelo 1 (modelo na ausência de hidrocarbonetos) descrito acima, no qual calculou-se a resposta para frequências e profundidades da fonte distintas. Os resultados destes cálculos são apresentados na figura 11, e mostram diferença na fase onde a elevação da fonte acima do leito submarino varia de 40 m a 60 m. Em particular, durante a inversão de dados com múltiplas frequências, a frequência elevada deve ser corrigida para mudanças de fase relativamente grandes. Nas situações em que se procuram ligeiras mudanças no subsolo geológico, também é preciso corrigir para as frequências mais baixas para as alternâncias de fase que são introduzidas devido à variação na elevação da fonte ao longo da linha.

#### Nova Possibilidade: a Fonte Pode Ser Rebocada na ou Próxima à Superfície

Conduziu-se o modelo 1D com a fonte 50m acima do leito sub-

marino e com a fonte logo abaixo da superfície (125 m acima do leito submarino), com e sem hidrocarbonetos, para estudar o efeito na resposta.

Os resultados apresentados na figura 12 mostram que as mudanças na resposta da magnitude como função da posição da fonte são pequenas (diferença na presença e na ausência de hidrocarbonetos) é aproximadamente equivalente.

Isto significa que para um modelo de águas rasas como esse (modelo 1 com profundidades distintas da fonte), a diferença em rebocar a fonte próxima à superfície de acordo com a modalidade preferencial da invenção também pode ser rebocada diretamente na superfície do oceano ou logo abaixo desse. Há vantagens consideráveis ao se proceder desta forma. Se a antena da fonte estiver conectada a elementos flutuantes na superfície, é possível verificar uma profundidade de fonte constante e uma direção constantemente horizontal da antena ao longo de todo o percurso do levantamento. Além disso, seria mais simples controlar e fornecer um registro mais preciso do azimute da fonte. No total, proporcionaria o aperfeiçoamento do controle da fonte e maior estabilidade da fonte. Através do reboque na superfície, seria também possível manipular outras fontes mais potentes do que as usadas no presente. Também estaria-se aptos a utilizar as possibilidades advindas do fato de que cabos de força mais curtos poderiam ser usados, reduzindo desta forma a perda de energia.

O modelo mostrou que, se a fonte e /ou receptores estiverem mais próximos à superfície do oceano, o nível do sinal pode aumentar consideravelmente sem perda significativa da diferença de resposta do reservatório. Observou-se que, por exemplo, para respostas de fase extremamente elevadas, as diferenças entre uma camada rochosa com reservatório produtor de hidrocarboneto e uma camada rochosa com reservatório preenchido por água pode ser encontrado para algumas frequências se a fonte e/ou receptores estiverem dispostos mais próximos à superfície do oceano.

### 30 Subtração de Onda Atmosférica - Método Inédito

Conforme observou-se a partir do modelo acima apresentado neste relatório descritivo, a onda atmosférica afetará uma extensa área dos

registros de águas rasas. Para desvios grandes, a onda atmosférica é totalmente dominante. Portanto, deseja-se que esse efeito seja reduzido de modo que a resposta dos substratos e, particularmente, de algumas formações geológicas seja relativamente amplificada nos dados. Abaixo apresentou-se um método em que o propósito se limita ao efeito de amplificação dos dados obtidos a partir dos substratos próximos à onda atmosférica.

#### Princípio do Método

O princípio do método possui os seguintes elementos:

\* Para desvios grandes da fonte-receptor (comparado às águas profundas), não chegarão outros sinais além da onda atmosférica.

\* Baseado no fato de que a onda atmosférica pode ser medida neste intervalo, a invenção propõe um método para recalcular o efeito da onda atmosférica para desvios mais curtos do que os desvios grandes da fonte-receptor. Para desvios mais curtos também há uma resposta a partir do reservatório altamente resistivo.

\* a resposta estimada da onda atmosférica é subtraída do sinal medido de modo a amplificar o efeito do reservatório de resistividade elevada.

A rotina de subtração da onda atmosférica pode ser descrita da seguinte forma:

\* a forma do sinal da onda atmosférica é estimada, por exemplo, por meio de um modelo, onde o modelo é um modelo secundário simplificado (ar, oceano, camada superficial geológica), por exemplo, apenas ar e água do oceano. Esta forma de cálculo da forma do pulso de ar é uma simplificação, e pode ser aperfeiçoada usando-se um modelo mais detalhado para a camada superficial geológica. No modelo, a fonte e os receptores estão dispostos no mesmo nível abaixo da superfície do oceano, onde os dados de medição serão obtidos. Durante o modelo, usa-se um tipo correto de fonte, por exemplo, um dipolo horizontal com um dado comprimento e o tipo do receptor.

\* O nível absoluto da onda atmosférica é encontrado a partir dos dados medidos. Um ou mais locais de desvio ("desvio distante") são selecio-

nados, onde é possível observar a partir dos dados de medição que existe uma onda atmosférica apenas (ou seja, o gradiente da fase é zero). O nível da onda atmosférica é ajustado para um valor equivalente ao que é medido neste local de referência ou locais de referência (se forem usados vários locais).

\* Dessa forma, o nível e o formato da magnitude e da fase da onda atmosférica são obtidos em função do desvio, e este efeito pode ser subtraído dos dados medidos.

Os cálculos matemáticos são conduzidos no plano complexo.

O método para a separação da onda atmosférica se baseia, portanto, na "calibração" dos dados com base nos registros reais nos desvios longos. Desse modo, considera-se que a onda atmosférica é influenciada pela camada superficial. A camada superficial geológica faz com que o nível da onda atmosférica nos desvios longos seja aumentada, quando comparado com a onda atmosférica calculada através do modelo terra-mar, e este aumento é considerado movendo-se a onda atmosférica calculada inicialmente até este nível. Além disso, há uma expectativa de que os cálculos que usam a dita abordagem não serão particularmente sensíveis aos pequenos erros individuais de calibração entre os instrumentos, e aos efeitos nas mudanças geológicas e topológicas locais agregadas aos receptores únicos. Testagens adicionais empregando dados reais mostrarão o nível de robustez do método quando aplicado.

#### Testagem do Método Usando Dados Fictícios

Descreveu-se abaixo uma testagem do método usando dados fictícios. Em lugar de usar dados de campo, os dados de medição foram calculados usando o modelo EM.

De resto, o método será o mesmo com relação aos dados reais.

O método consiste no seguinte:

\* Cálculo de dados de medição fictícios usando um modelo de resistividade: Neste caso o modelo 1 é usado, apresentado acima como o modelo de Grane simplificado.

\* Execução da rotina de subtração da onda atmosférica (confor-

me descrito acima).

\* Comparação dos resultados com os resultados obtidos no modelo 2 "caso de águas profundas" (correspondente ao modelo 1, mas com profundidade das águas de 20 km).

5                   \* O cálculo é conduzido para dois casos distintos: ambos na presença e na ausência de hidrocarbonetos no nível do reservatório. Deste modo, é possível comparar os valores padronizados.

Os modelos usados para o cálculo dos "dados de medição" fictícios estão ilustrados na figura 13a. Os resultados dos testes são apresentados nas figuras 14, 15 e 16.

A partir dos resultados observamos que os métodos são satisfatórios para estes modelos. O método amplifica a magnitude do resultado do hidrocarboneto além da parte externa por cerca de 4 km a partir da fonte até um nível que é superior ao caso de águas profundas. A resposta de fase após a subtração da onda atmosférica é aproximadamente a mesma com relação ao caso de águas profundas.

#### Testagem do Método em Dados Reais Medidos a Partir do Campo de Grane

Testou-se adicionalmente o método de acordo com a invenção sobre os dados de dois dos receptores do levantamento de Grande de 2003, receptores R11 e R12 situados em cada um dos lados do reservatório, favor consultar a figura 10, em que essas duas estações estão situadas nos dois lados próximos à posição do reservatório. Os resultados dos cálculos são apresentados nas figuras 17 a 20.

Se, após a onda atmosférica ter sido subtraída, os gradientes de amplitude forem comparados com mais atenção para os desvios positivos grandes, observou-se que R11 no lado positivo do desvio possui um gradiente absoluto mais baixo do que R12. Comparando os gradientes nos desvios negativos em detalhe, o efeito é oposto, favor consultar a figura 21. Isto pode indicar que o reservatório é visível nos dados.

30                   Comentários sobre o teste dos dados reunidos a partir do levantamento de Grane:

\* Os resultados deste exercício parecem apontar para a direção

direita, porém, seria desejável obter medições a partir de um campo de petróleo em profundidades de águas relativamente rasas no oceano com melhores condições de condutividade do que o campo de Grane. As inversões 1D previamente conduzidas dos dados de Grane mostram que o perfil de resistividade é consideravelmente menos adequado à detecção do que o modelo usado no teste de dados fictícios. Em Grane parece existir resistividade variável e mais elevada na camada superficial, e resistividade elevada logo abaixo do nível do reservatório (observado usando-se os exercícios iniciais da inversão).

10                   \* Os dados deveriam ser pré-processados para remoção do ruído antes de realizar a separação do ar atmosférico, e subsequentemente escolher o ponto de referência para "contribuição plena da onda atmosférica" com zelo extremo.

15                   \* Os componentes adicionais deveriam incluir, por exemplo, dados magnéticos neste tipo de separação de onda atmosférica, e também incluir as informações direcionais  $P=ExH$ , onde  $P$  é um vetor Poynting no plano da direção de propagação de energia, como permite uma calibração específica do local.

20                   \* O método supõe que o padrão de emissão da antena é conhecido/passível de medição. Até então supõe-se que a fonte é um dipolo unitário (o que também se aplica à inversão 1D). Provavelmente não é o caso para os dados medidos no Campo de Grane, nos quais se observa assimetria dos dados, e provavelmente há muito progresso a ser feito nesta área.

25                   \* Favor notar que o método requer dados bons em desvios longos. Os dados obtidos em Grane estão no limite da qualidade exigida, alguns são bons o bastante, outros possuem excesso de ruído.

30                   \* Os cálculos de fase são sensíveis à profundidade da fonte próxima à superfície. A profundidade da fonte varia no levantamento de Grane, dentre outros, parcialmente devido à passagem de instalações marinhas, o que pode explicar a razão pela qual os dados de fase em Grane não parecem uniformes neste estágio do processamento. Independente disso, pode ser vantajoso rebocar a fonte na superfície.

### Calibração dos Receptores

A figura 22a ilustra as medições reais obtidas no levantamento de Grane. A representação mostra a denominada impedância aparente intrínseca E/H para medições eletromagnéticas medidas ao empregar a emissão de 0,25 Hz. Observa-se claramente que a representação deprime em desvios grandes nos quais a onda atmosférica domina. Nesta distância, existe uma clara relação entre E e H. Uma alternativa ao método de Amundsen pode ser a exploração desta relação constante E e H em distâncias longas. A calibração da fase relativa entre os campos E e H, onde a onda atmosférica predomina e onde a fase se deprime, pode ser realizada na medida em que se sabe que a diferença de fase entre os dois gráficos seria constante. Normalmente, equivalente a 4 graus, quase independentemente do modelo geológico subjacente, para resistividades normais nas rochas do leito do oceano. Será observado que esta diferença no modelo calculado na figura 22c confirmará este ponto, favor consultar abaixo. As magnitudes da taxa do sinal E/H também serão constantes onde a onda atmosférica predomina, mas a constante será afetada pela resistividade no substrato. No entanto, se a fase for calibrada em primeiro lugar, é possível, através da análise dos dados da fase para desvios mais curtos, calcular um perfil aproximado de resistividade e empregar nos ditos distantes para calibrar também as magnitudes.

Adicionalmente, a figura 22b mostra dados medidos a partir do levantamento de Grane em que são mostradas as representações de fase versus separação do receptor da fonte. Aqui as diferenças de fase não são mostradas na relação correta, porém atribui-se uma diferença de fase aleatória para desvios distantes. Entretanto a diferença de fase será conhecida como sendo de 45 graus para desvios grandes, e desta forma será obtida a calibragem da diferença de fase para um receptor que passa pela fonte acima do receptor.

A figura 22c ilustra diferenças de fase modeladas para soluções analíticas para diferenças de fase para componentes em linha E e reticulados H, calculados para uma profundidade de água de 150m, com antena de 50mmetros acima do leito submarino, e uma frequência emitida de 0,25 Hz.

Os gráficos mostram as fases de 0,5  $\Omega\text{m}$ , 1,0  $\Omega\text{m}$  e 1,5  $\Omega\text{m}$ . Aqui a fase é fornecida em radianos. Será notado que a diferença de fase calculada entre a resistividade de 0,5  $\Omega\text{m}$  no leito submarino e  $E_y$  e  $H_x$  calculados, resistividade de 1,0  $\Omega\text{m}$  e o  $E_y$  e  $H_x$  calculados e resistividade de 3  $\Omega\text{m}$  e o  $E_y$  e  $H_x$  calculados, são todos quase exatamente  $\pi/4$  para desvios grandes, isto é, de 45 graus.

### CONCLUSÃO

O método de acordo com a invenção para subtração de onda atmosférica parece operar de maneira satisfatória, mas testagens complementares sobre dados de campo reais podem ser necessárias para averiguar os pontos fracos e os pontos fortes com maior detalhe. O método pode ser desenvolvido e aperfeiçoado em diversos aspectos, dentre eles através do cálculo de uma onda atmosférica progressivamente correta para subtração, levando-se em consideração adicional que o padrão de radiação para a fonte aplicada (e não uma fonte teórica) que é aplicada no levantamento, e a resistividade na camada superficial. Muito embora uma das principais vantagens do método proposto seja o fato de não ser necessário mais de um componente vetorial (aqui testado nos campos em linha E), deveria ser ainda investigado se o método pode ser aprimorado incluindo-se mais componentes vetoriais.

A seguir são enumeradas algumas vantagens do perfilamento do leito submarino em águas rasas:

- \* Um método pode apresentar um nível de sinal geralmente mais elevado, mais a energia total se propaga no substrato.
- \* O método permite estabilizar a fonte e facilitar as medições da direção da fonte rebocando a fonte na ou próximo à superfície do oceano. Uma possível desvantagem do método é o risco de se obter um magnetotelúrico um pouco elevado, isto é, ruído eletromagnético gerado atmosféricamente.
- \* O método também abre horizontes para novas possibilidades através do uso de fontes mais potentes com controle de posicionamento aprimorado, na medida em que o método permite que a fonte seja rebocada

na superfície ou próximo à superfície, onde é possível observá-la e fixar bóias conectadas à fonte e aos elementos da antena.

- \* O método torna possível a utilização de informações adicionais resultantes das ondas que se propagam na vertical em desvios grandes para a calibração de instrumentos e/ou a descoberta do perfil de resistividade por inversão.
- 5

## REIVINDICAÇÕES

1. Método para processamento e análise de medidas eletromagnéticas adquiridas (R) efetuadas em ou no oceano (4), ou no leito submarino (1) com formações rochosas (3) de resistividade relativamente baixa ( $\rho_3$ ) para detectar uma possível formação subjacente de um reservatório produtor de petróleo (2) com resistividade relativamente elevada ( $\rho_2$ ), em que um transmissor eletromagnético de baixa frequência (5) é disposto no oceano (4) e emite um campo eletromagnético (F) que se propaga no oceano (4) nas rochas (3, 2) e no ar (0) acima do oceano; em que os sensores eletromagnéticos (6) são dispostos com os desvios desejados (x) no oceano (4) para medir o campo eletromagnético  $P(x)$ , enquanto o campo se propaga, caracterizado pelo fato de que:

um ou mais componentes do campo eletromagnético (F) é medido em pelo menos um grande desvio ( $x_L$ ) a partir do transmissor (5), onde o campo (F) essencialmente possui apenas sua origem no campo de propagação como o campo ( $P_0$ ) através do ar (0);

que os um ou mais componentes do campo eletromagnético (F) medidos no desvio grande ( $x_L$ ) são calculados novamente para um campo recalculado ( $F_0(x)$ ) até uma ou mais desvios (x) que são menores do que o desvio grande ( $x_L$ );

que o campo recalculado ( $F_0(x)$ ) é subtraído do campo (F(x)) para possivelmente salientar um campo que tem sua origem nas anormalidades da resistividade no subsolo, como a possível formação de um reservatório produtor petróleo (2) dotado de uma resistividade relativamente elevada ( $\rho_2$ ).

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, em que o dito transmissor (5) é rebocado no oceano, e em que os ditos receptores são estacionários.

3. Método, de acordo com a reivindicação 1, em que o dito campo eletromagnético (F) emitido é um campo alternativo com frequências na faixa entre 0,001 e 200 Hz.

4. Método, de acordo com a reivindicação 3, em que o dito cam-

po eletromagnético (F) emitido é um campo alternativo com frequências na faixa entre 0,1 e 1 Hz.

5 5. Método, de acordo com a reivindicação 1, em que o dito componente do dito campo eletromagnético (F) que é medido é um campo elétrico (E).

6. Método, de acordo com a reivindicação 1, em que o dito componente do dito campo eletromagnético (F) que é medido é um campo magnético (B).

10 7. Método, de acordo com a reivindicação 1, em que o dito transmissor (5) aplicado compreende eletrodos (50A, 50B) dispostos com uma separação do dito oceano (4) de modo a formar um transmissor de dipolo elétrico (5).

15 8. Método, de acordo com a reivindicação 7, em que o dito transmissor (5) é uma antena transmissora disposta geralmente no sentido horizontal, cujos eletrodos (50A, 50B) estão dispostos geralmente na mesma profundidade.

20 9. Método, de acordo com a reivindicação 8, em que os ditos sensores (6) estão dispostos na forma de pares de eletrodos em estações de medição separadas ou como eletrodos ao longo de um cabo sensor que é disposto ao longo de uma linha geralmente reta (7) que se estende a partir do dito transmissor (5).

25 10. Método, de acordo com a reivindicação 9, em que o eixo geométrico principal do dito transmissor (5), isto é, um eixo geométrico entre os ditos eletrodos (50A, 50B), para o caso de a dita fonte ser um dipolo elétrico, se estende geralmente no mesmo plano vertical que a dita linha (7).

30 11. Método, de acordo com a reivindicação 9, em que o eixo geométrico principal do dito transmissor (5), isto é, um eixo geométrico entre os ditos eletrodos (50A, 50B), para o caso de a dita fonte ser um dipolo elétrico, se estende geralmente no mesmo plano vertical que a dita linha (7) com os ditos eletrodos (6).

12. Método, de acordo com a reivindicação 1, em que o dito transmissor (5) é disposto na superfície, sobre a superfície ou próximo à su-

perfície do dito oceano (4).

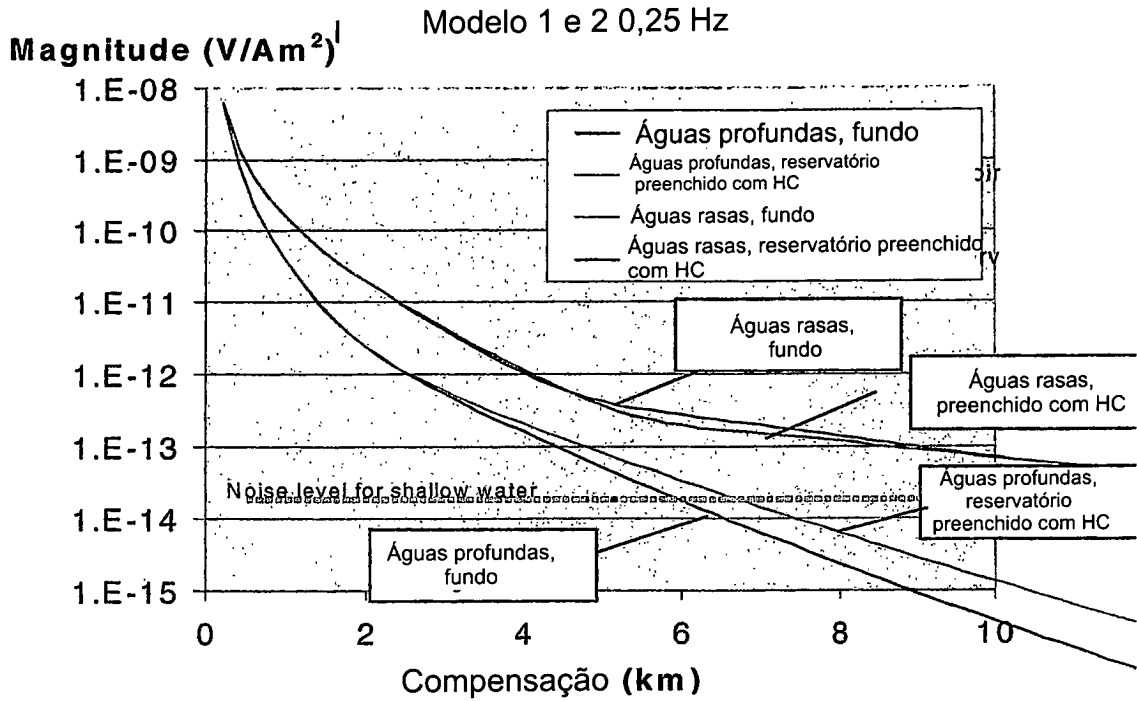
13. Método, de acordo com a reivindicação 1, em que o dito transmissor (5) está submergido no dito oceano (4).

5 14. Método, de acordo com a reivindicação 13, em que o dito transmissor (5) está disposto sobre ou próximo ao leito do oceano (1).

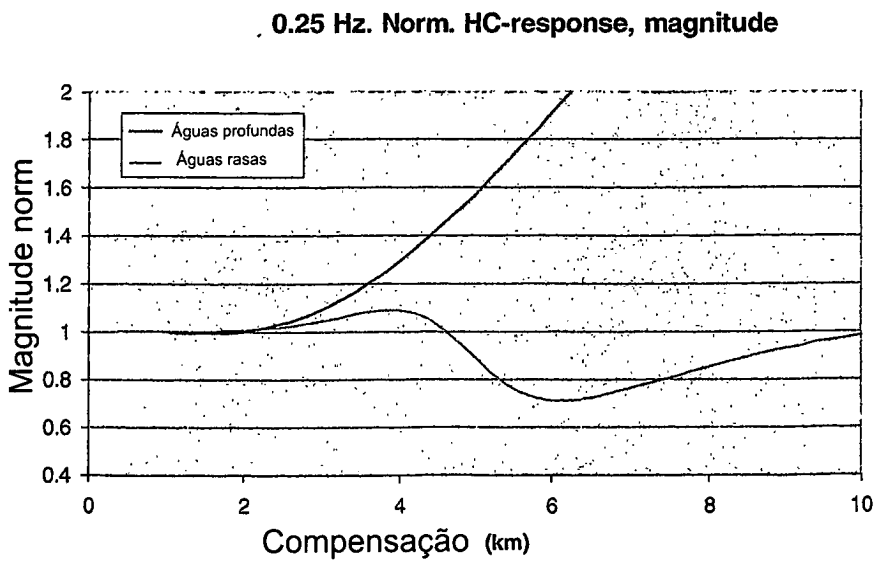
15. Método, de acordo com a reivindicação 13, em que o dito transmissor (5) está disposto entre o leito do oceano (1) e a superfície do oceano (4).

10 16. Método, de acordo com a reivindicação 1, em que a profundidade do leito do oceano (1) sob a superfície do oceano (4) é essencialmente menos rasa do que a profundidade da formação subjacente do reservatório produtor de petróleo (2) abaixo do leito do oceano (1).

15 17. Método, de acordo com a reivindicação 1, em que o transmissor (5) aplicado compreende uma fonte de dipolo magnético ou uma combinação de uma fonte de dipolo elétrico e uma fonte de dipolo magnético.



**Fig. 1:** O modelo 1 e o modelo 2, 0,25 Hz, resposta de magnitude cm e sem hidrocarbonetos no reservatório. Observe que em águas rasas, os hidrocarbonetos fornecerão uma resposta negativa.



**Fig. 2:** Resposta de magnitude normalizada (resposta normalizada em relação ao reservatório abastecido com água). A curva "Águas profundas" foi interrompida no piso de ruído esperado para águas rasas.

Modelo 1, Resposta de Fase de 0,25z.

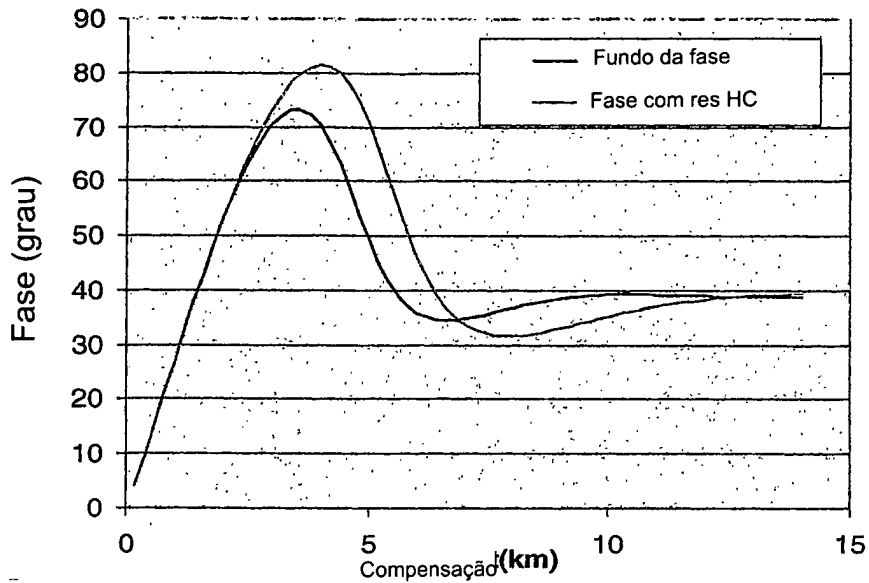


Fig. 3: Modelo 1, águas rasas, Resposta de Fase de 0,25z.

Modelo 2, 0,25 Hz, águas profundas, resposta de fase.

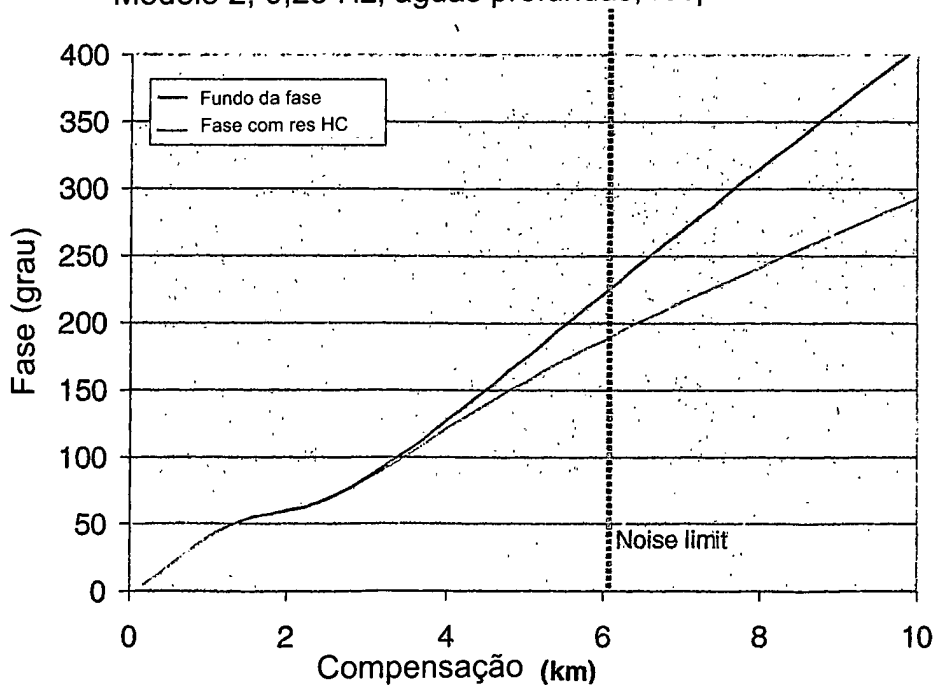


Fig. 4: Modelo 2, 0,25 Hz, águas profundas, resposta de fase. "Limite de compensação do ruído" é a compensação esperada, conforme contado a partir da fonte, para a qual os sinais estarão abaixo do limite de ruído para águas rasas.

Modelo 1, 0,25 Hz, Resposta HC Norm, dif. de fase

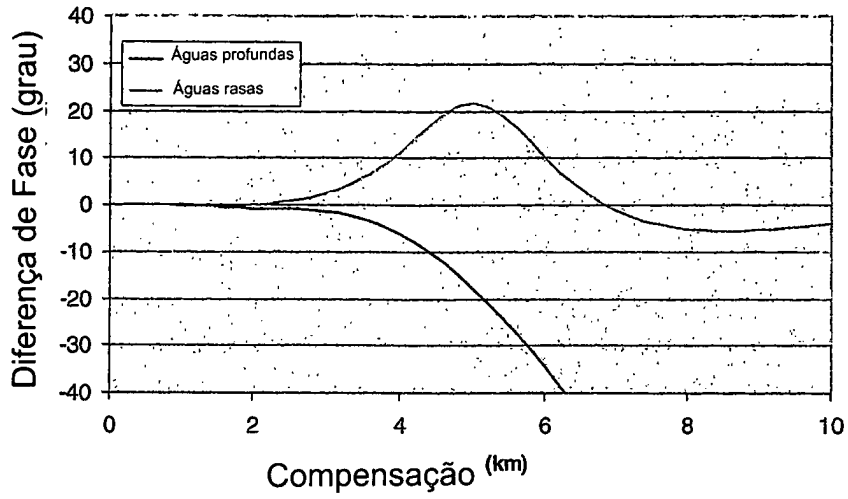


Fig. 5: Resposta de fase normalizada (diferença de fase do modelo de fundo)

Resposta de hidrocarboneto normalizada, modelo 1

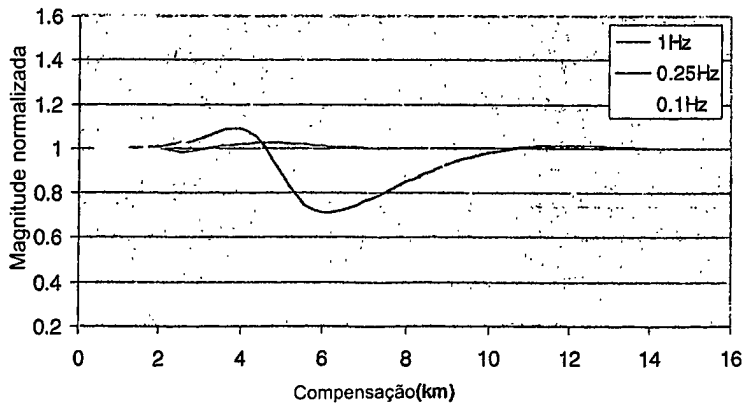
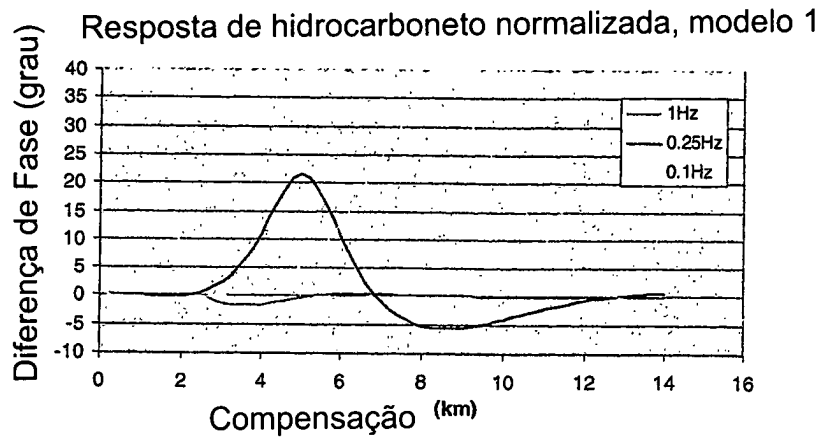
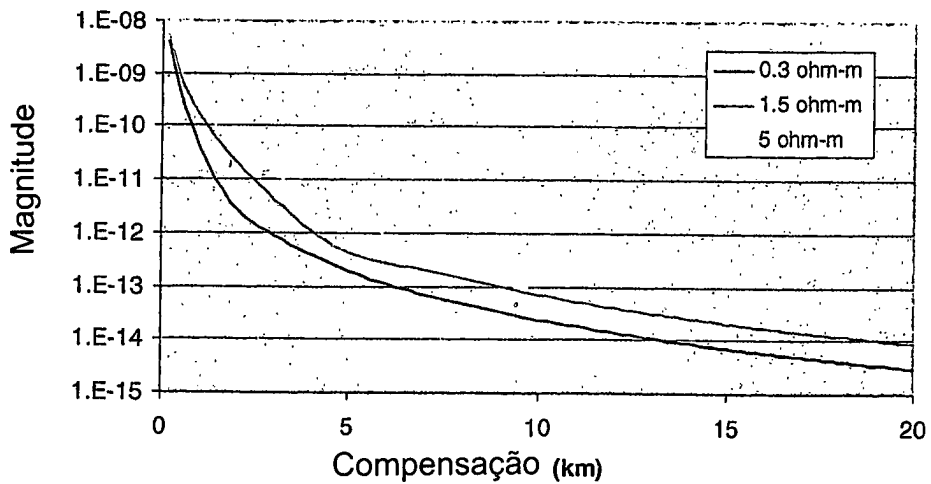


Fig. 6: Resposta de magnitude normalizada para modelo 1 para frequências diferentes



**Fig. 7:** Resposta de fase normalizada para modelo 1 para frequências diferentes

0,25 Hz - efeito da resistividade sobrecarregada



**Fig. 8:** Curvas de magnitude para três modelos de sobrecarga diferentes. Se não, os mesmos parâmetros do modelo 1.

0,25 Hz - efeito da resistividade sobrecarregada

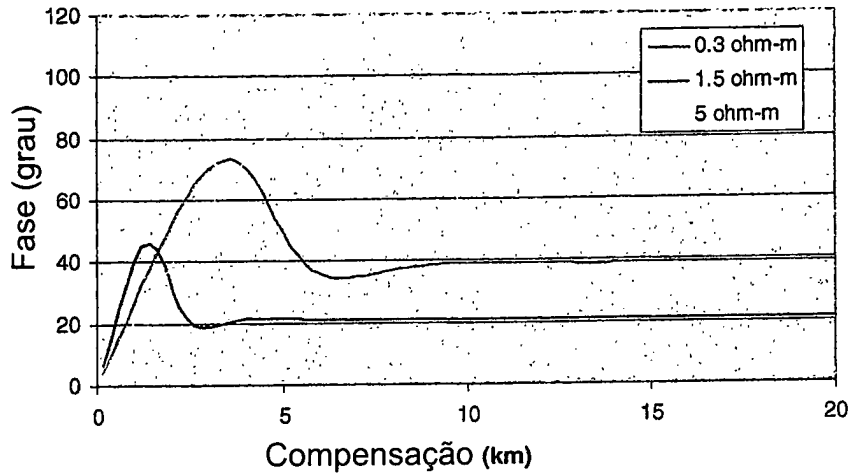


Fig. 9: Curvas de fase para três modelos de sobrecarga diferentes. Se não, os mesmos parâmetros do modelo 1.

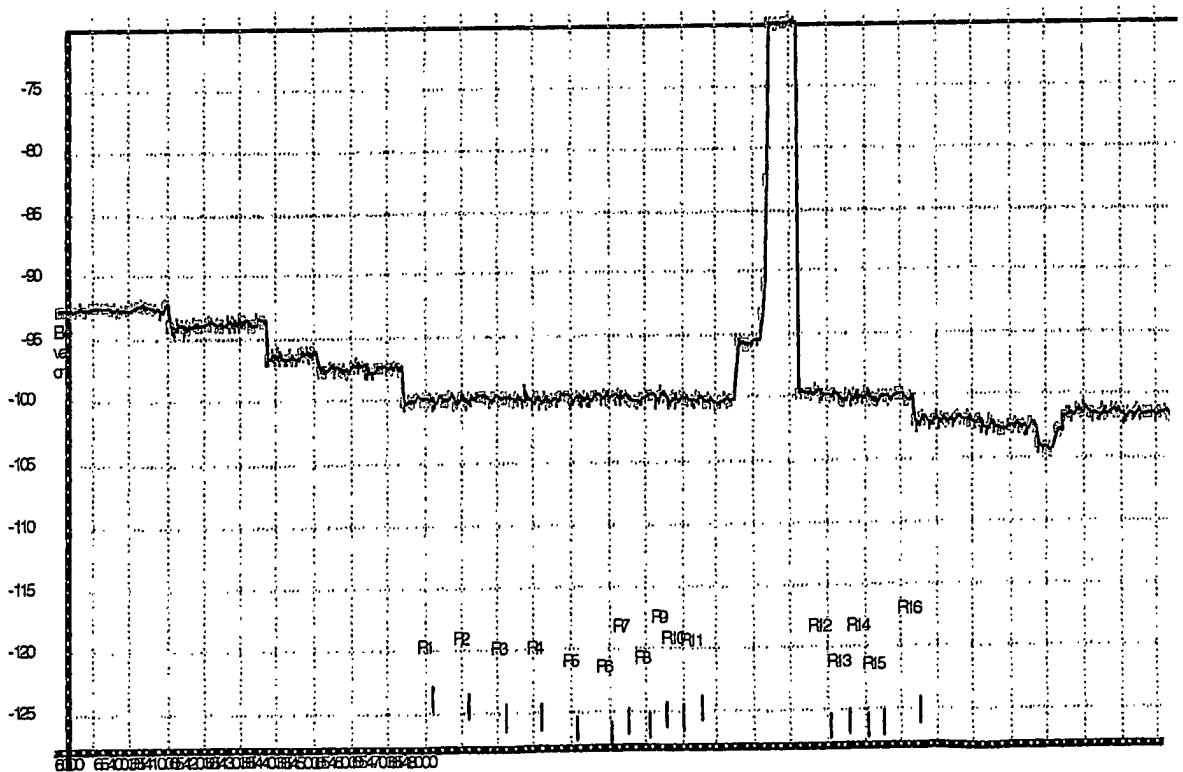
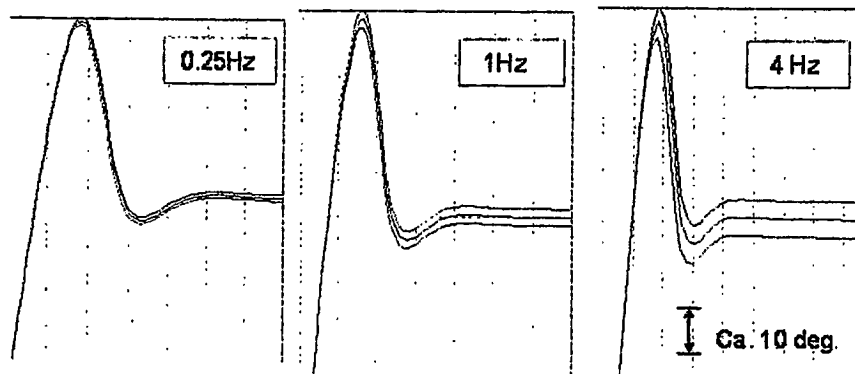
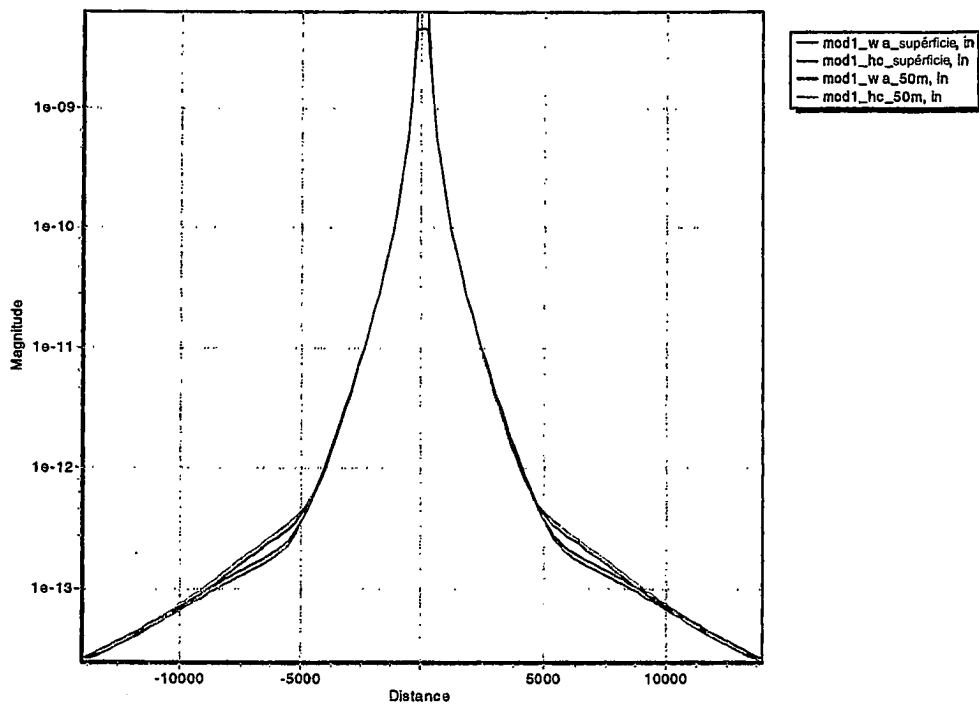


Fig. 10: Variação da profundidade da fonte ao longo da linha HBL no levantamento Grane em 2003. As estações receptoras estão indicadas como R1, R2,... R16.

Curvas de fase para as diferentes elevações de fonte:  
40m - Azul, 50m= Verde, 60m=Vermelho



**Fig: 11:** Mudança na curva de fase como uma função de pequenas variações (10m) de elevação da fonte acima do leito submarino. 40 m: azul, 50 m: verde, 60 m: vermelho.



**Fig. 12:** Resultados do modelo (modelo 1) com e sem hidrocarbonetos, da fonte colocada a 50 m acima do leito submarino e na superfície (125 m acima do leito submarino).

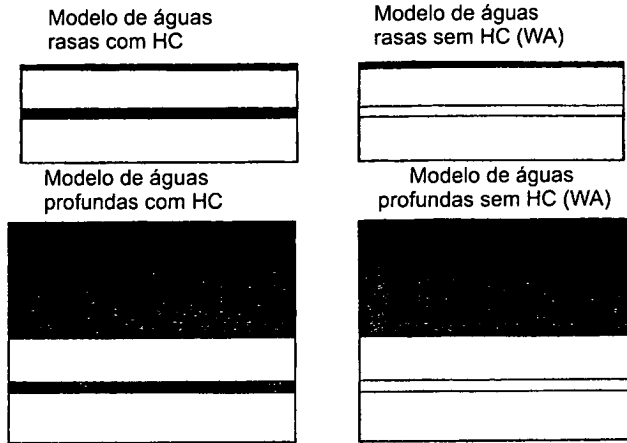
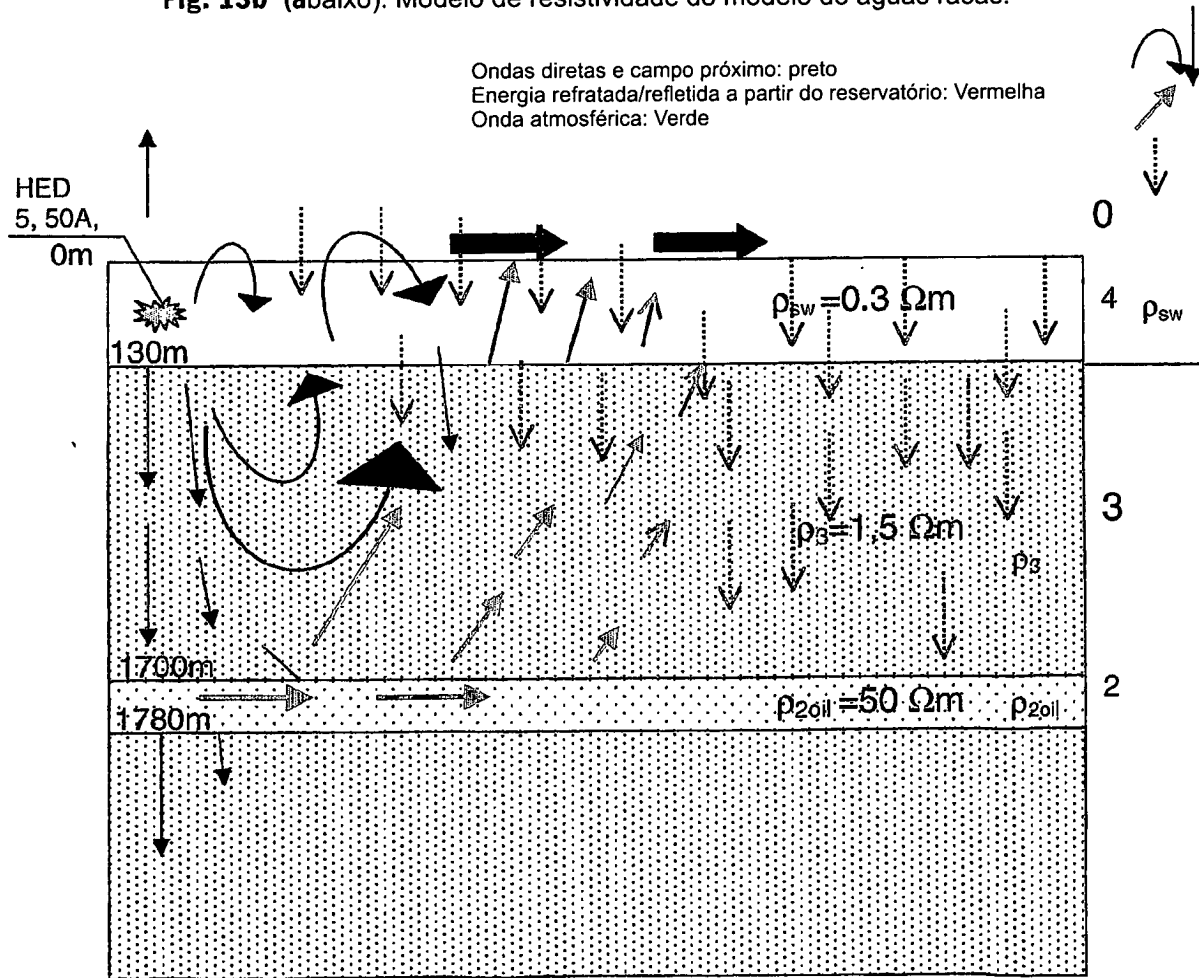


Fig. 13a (acima): Modelos para cálculo de dados artificiais, e

Fig. 13b (abaixo): Modelo de resistividade do modelo de águas rasas.



As setas mostram os trajetos de energia: em grandes compensações, todas chegam por meio do ar

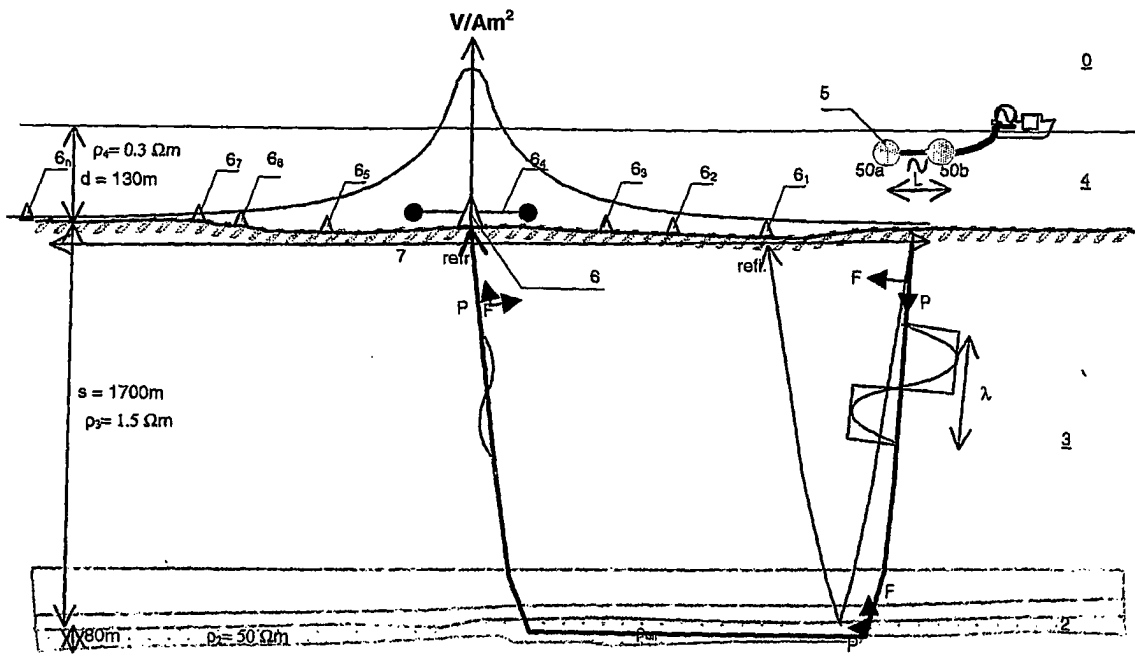
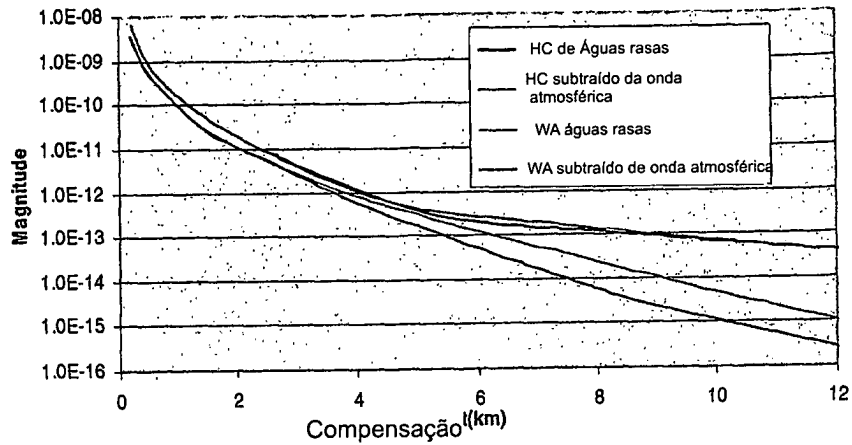


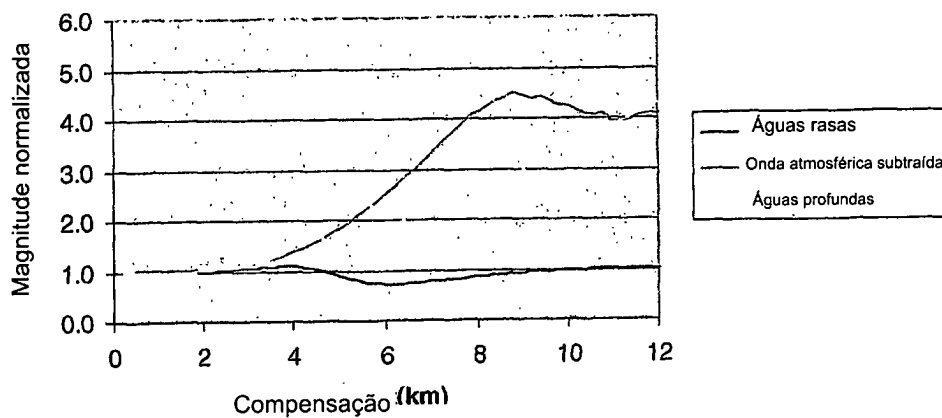
Fig. 13c

Testando a subtração da onda atmosférica sobre dados artificiais  
Modelo com e sem reservatório abastecido com água



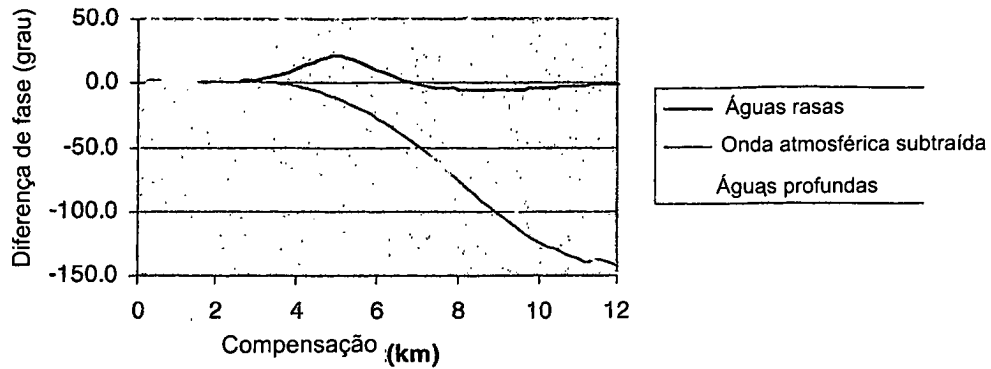
**Fig. 14:** Resultados obtidos pela subtração da onda atmosférica sobre os dados artificiais a partir das águas rasas (modelo 1): Magnitude

Testando a subtração da onda atmosférica em dados artificiais



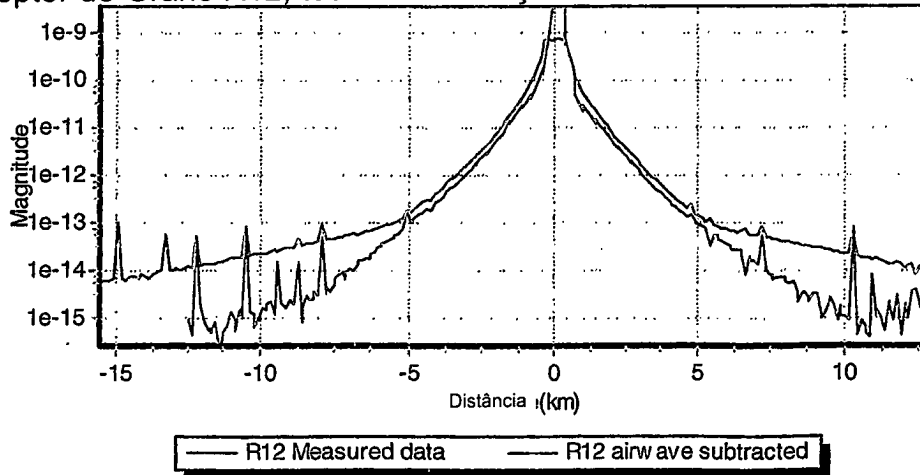
**Fig. 15:** Resultados obtidos pela subtração da onda atmosférica sobre os dados artificiais a partir das águas rasas (modelo 1): Magnitude normalizada, comparada com a magnitude normalizada para o caso de águas profundas.

Testando a subtração da onda atmosférica em dados artificiais



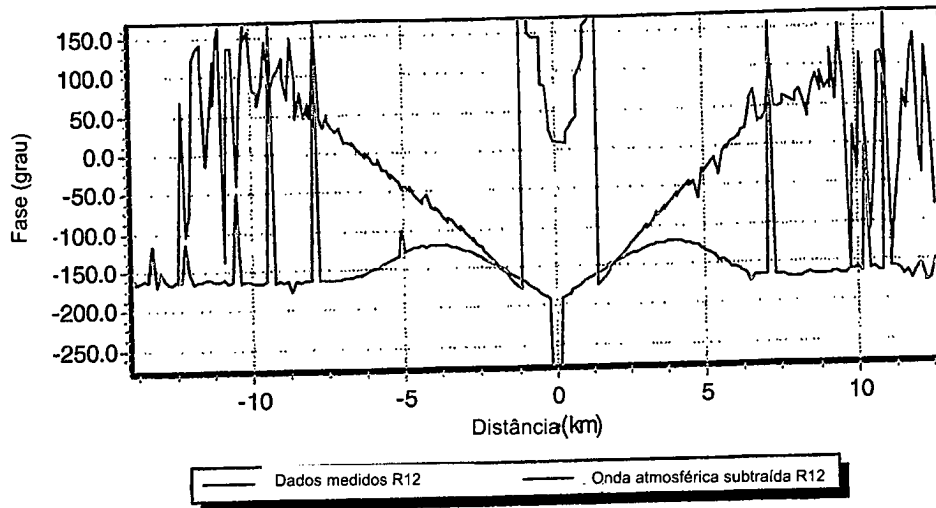
**Fig. 16:** Resultados obtidos pela subtração da onda atmosférica sobre os dados artificiais a partir das águas rasas (modelo 1): Fase normalizada (diferença de fase), comparada com a fase normalizada para o caso de águas profundas.

Receptor de Grane R12, teste de subtração de onda atmosférica, ref. = 15, 1 km



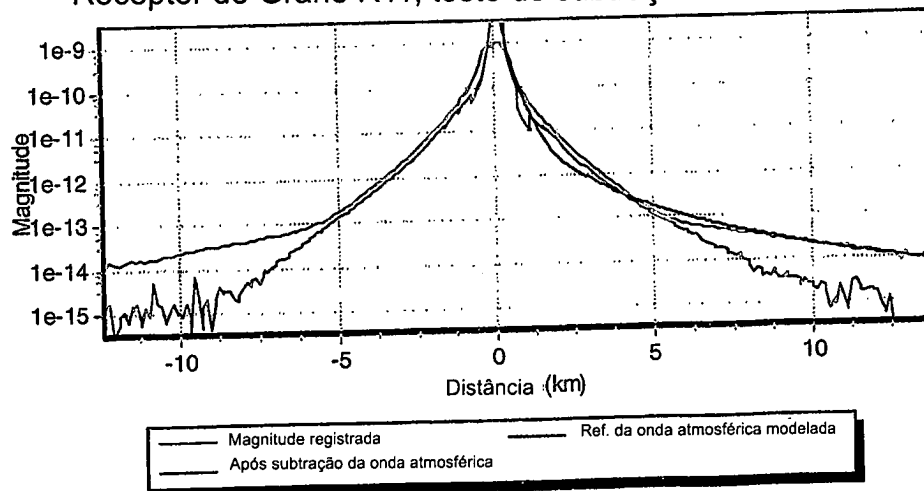
**Fig. 17:** Resultados obtidos da subtração da onda atmosférica no receptor de Grane R12 - magnitude.

Receptor de Grane R12, teste de subtração de onda atmosférica, ref. = 15, 1 km



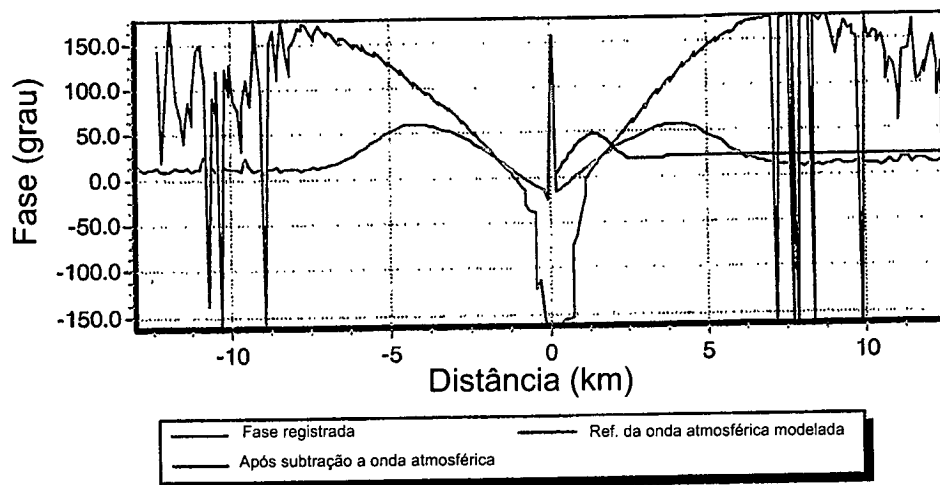
**Fig. 18:** Resultados obtidos da subtração da onda atmosférica no receptor de Grane R12: fase

Receptor de Grane R11, teste de subtração de onda atmosférica



**Fig. 19:** Resultados obtidos da subtração da onda atmosférica no receptor de Grane R11: Magnitude

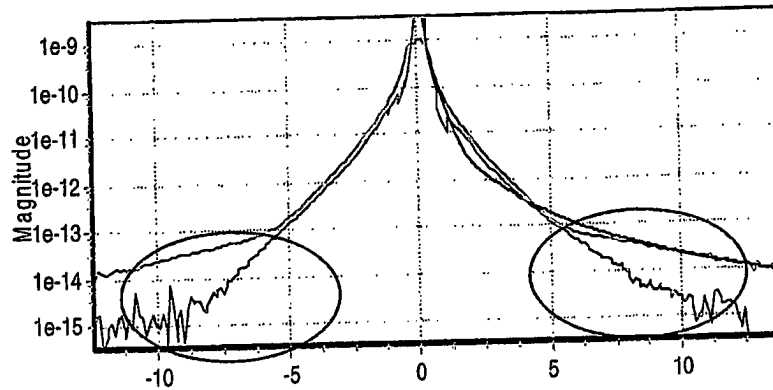
Receptor de Grane R11, teste de subtração de onda atmosférica



**Fig. 20:** Resultados obtidos da subtração da onda atmosférica no receptor de Grane R12: fase

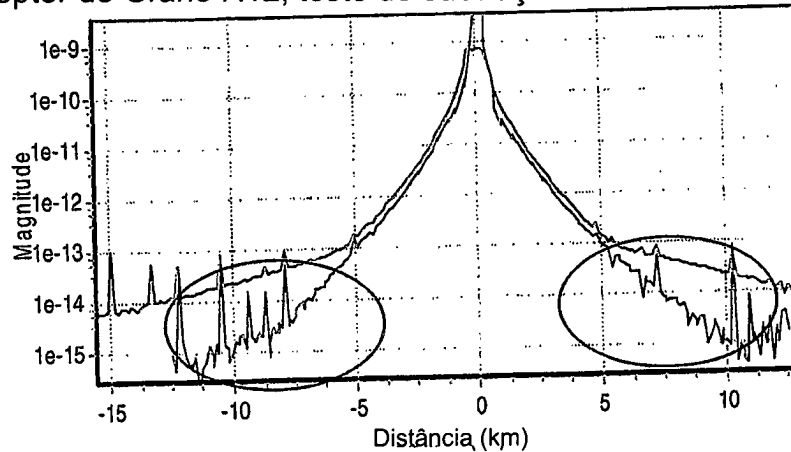
Receptor de Grane R11, teste de subtração da onda atmosférica

R11



Receptor de Grane R12, teste de subtração da onda atmosférica = 15,1 km

R12



— Dados medidos R12      — Onda atmosférica subtraída R12

**Fig. 21:** Resultados obtidos da subtração da onda atmosférica no receptor de Grane R12 e R11, para comparar os gradientes dentro dos segmentos na faixa de compensação de 5-10 km.

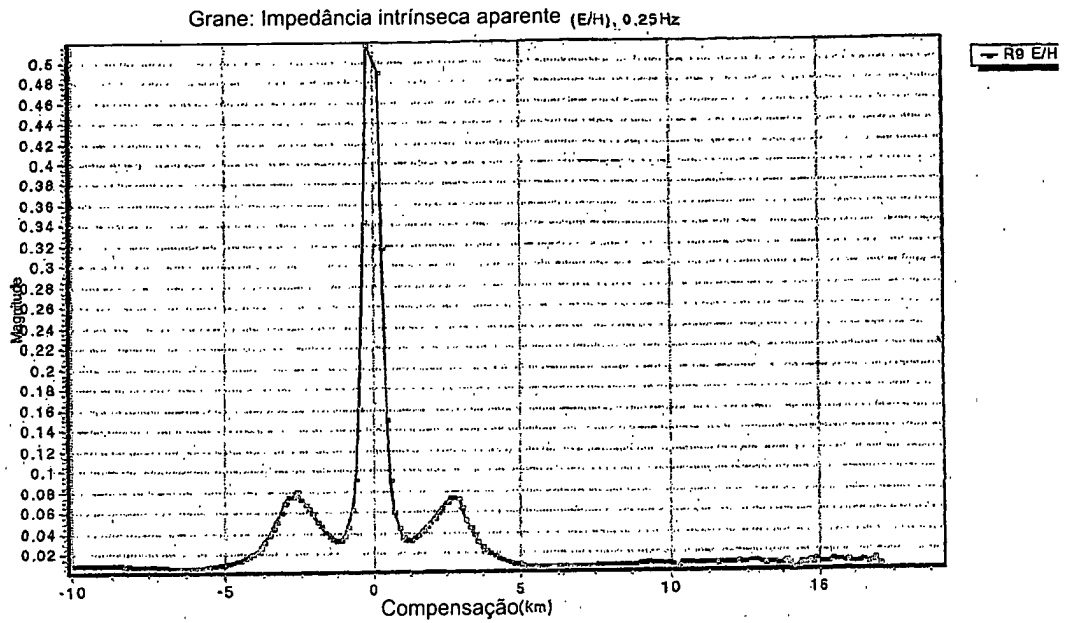


Fig. 22a: Dados obtidos a partir do campo de Grane: impedância intrínseca aparente

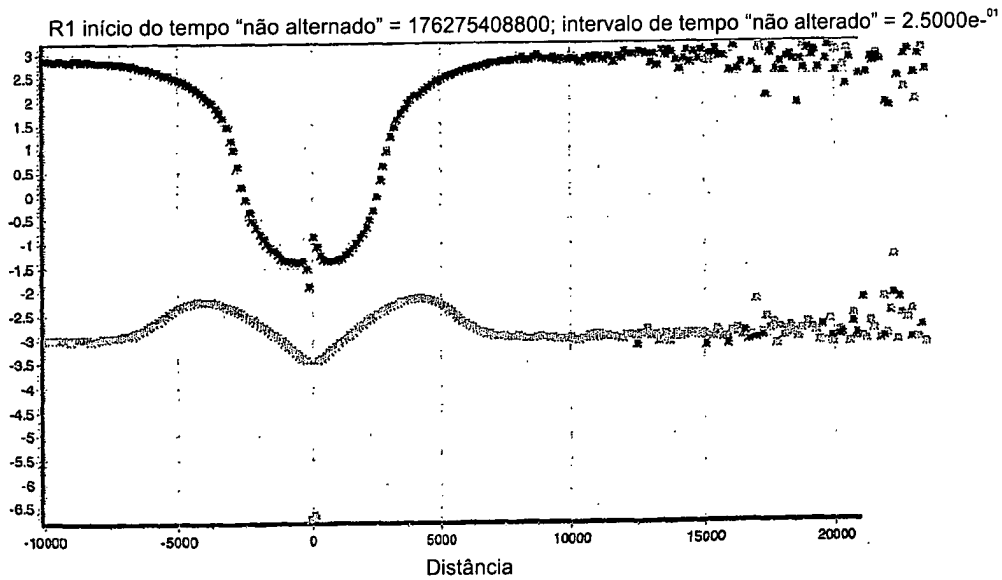
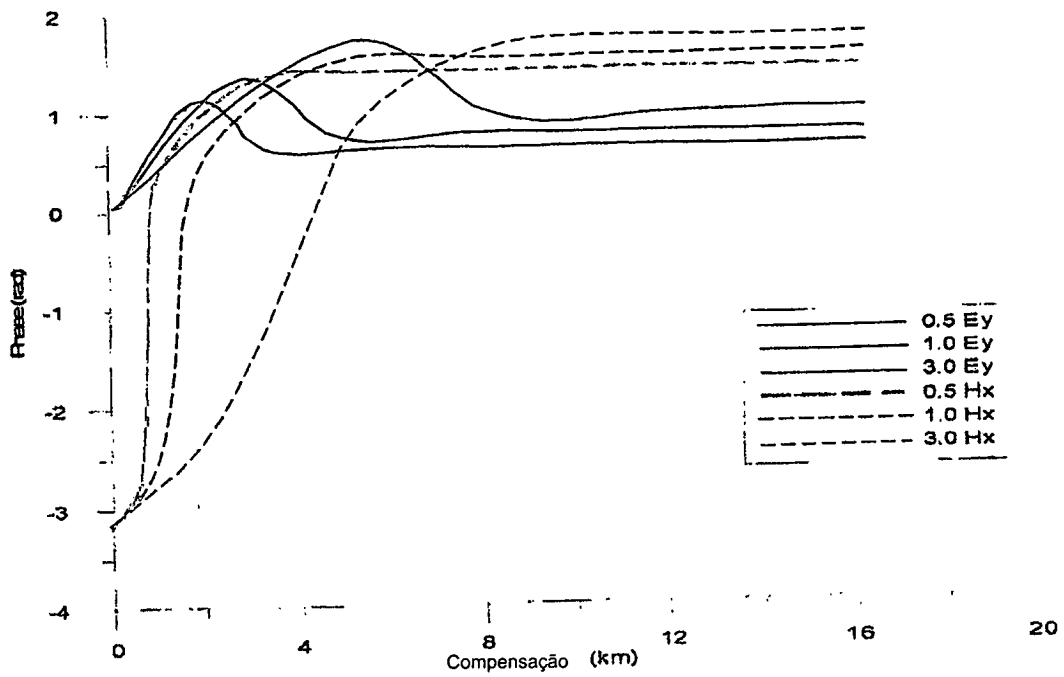


Fig. 22b: Dados medidos a partir do levantamento de Grane 2003. Gráfico de fase versus compensação da fonte-receptor, não mutuamente ajustados em grandes compensações. Gráfico inferior: campo E radial, gráfico superior: campo H azimutal



**Fig. 22c:** componentes H cruzados e E em linha, fase modelada versus compensação fonte-receptor. Profundidade de água 150m, elevação da fonte acima do leito submarino de cerca de 50 m, frequência = 0,25 Hz

**RESUMO**

Patente de Invenção: "MÉTODO ELETROMAGNÉTICO EM ÁGUAS RA-  
SAS USANDO UMA FONTE CONTROLADA".

A presente invenção refere-se a um método para analisar medi-  
5 das eletromagnéticas adquiridas (R) efetuadas em ou no oceano (4) ou aci-  
ma do leito submarino (1) com formações rochosas (3) com resistividade  
relativamente baixa ( $\rho_3$ ) para detectar uma possível formação subjacente de  
um reservatório produtor de petróleo (2) com uma resistividade relativamente  
elevada ( $\rho_2$ ), em que um transmissor eletromagnético de baixa frequência  
10 (5) disposto no oceano (4) emite um campo eletromagnético (P) que se pro-  
paga no oceano (4) nas rochas (3, 2) e no ar (0) acima do oceano; em que  
os sensores eletromagnéticos (6) são dispostos com os desvios desejadas  
(x) no oceano (4) para medir o campo eletromagnético  $P(x)$ , enquanto o  
campo se propaga, caracterizado pelo fato de que um ou mais componentes  
15 do campo eletromagnético (P) é medido em pelo menos um grande desvio  
( $x_L$ ) a partir do transmissor (5), onde o campo (P) essencialmente possui a-  
penas sua origem no campo de propagação como um campo ( $P_0$ ) através do  
ar (0); que os um ou mais componentes do campo eletromagnético (P) me-  
didos no desvio grande ( $x_L$ ) são calculados novamente para um campo re-  
calculado ( $F_0(x)$ ) até um ou mais desvios (x) que são menores do que o des-  
vio grande ( $x_L$ ); que o campo recalculado ( $P_0(x)$ ) é subtraído do campo (P(x))  
20 para possivelmente salientar um campo cuja origem se deve à possível for-  
mação de um reservatório produtor petróleo (2) com uma resistividade relati-  
vamente elevada ( $\rho_2$ ).