

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTUDO DOS EFEITOS  
TOPOGRÁFICOS NOS DADOS  
ELETROMAGNÉTICOS  
MULTIFREQUÊNCIA E  
EMPREGO NOS DADOS “EM” DO  
CAMPO DE ARAÇÁS**

ZOUKANÉRI IBRAHIM MOUMOUNI

SALVADOR – BAHIA

MAIO – 2010

Documento preparado com o sistema L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.



**Estudo dos efeitos topográficos nos dados eletromagnéticos  
multifrequência e emprego nos dados “EM” do campo de Araçás**

por

ZOUKANÉRI IBRAHIM MOUMOUNI

Eng. Florestal (Universidad de Pinar del Rio, Cuba – 2007)

Orientador: Prof. Dr. Hédison Kiuity Sato

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Submetida em satisfação parcial dos requisitos ao grau de

MESTRE EM CIÊNCIAS

EM

GEOFÍSICA

à

Câmara de Ensino de Pós-Graduação e Pesquisa

da

Universidade Federal da Bahia

Comissão Examinadora

\_\_\_\_\_ Dr. Hédison Kiuity Sato (UFBA)

\_\_\_\_\_ Dr. Olivar Antonio Lima de Lima (UFBA)

\_\_\_\_\_ Dr. André Cunha Lima (UFBA)

Aprovada em 07 de maio de 2010

A presente pesquisa foi desenvolvida no Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia da UFBA, com recursos próprios, da CAPES, da FAPESB, da FINEP/CT-PETRO e da PETROBRAS

Q999 Ibrahim Moumouni, Zoukanéri,

Estudo dos efeitos topográficos nos dados eletromagnéticos multifrequência e emprego nos dados “EM” do campo de Araçás / Zoukanéri Ibrahim Moumouni. — Salvador, 2010.

48 f.: il., mapas, fotos.

Orientador: Prof. Dr. Hédison Kiuity Sato

Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Geofísica. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, 2010.

1. Bahia - Geofísica. I. Título.

911.6(813.8)(043)

Aos meus pais, a Antonio Puentes e  
Iray Galrão.

# Resumo

Essa dissertação tem como objetivo estudar o efeito da topografia do terreno nos dados eletromagnéticos à multifrequência, com o intuito de suprir informações teóricas que melhorem a precisão da interpretação dos dados do campo. Analisa-se também esse efeito nos dados EM obtidos no campo de Araçás (Bahia-Brasil). Considera-se um dipolo magnético vertical sobre um semi-espço isotrópico e homogêneo para modelagem direta. Conseguiu-se determinar a matriz de transformação  $\tilde{T}$  e sua inversa  $\tilde{T}^{-1}$ , que contem as informações sobre uma superfície inclinada acima da qual é estendida a bobina transmissora em relação a um plano horizontal. Obteve-se, a expressão geral do campo magnético ( $H_x$ ) no plano inclinado, o que possibilitou realizar simulações tomando em conta a geometria das bobinas (azimute, mergulho), e avaliar a magnitude de erro devido a topografia, analisando a variação da impedância mútua ( $Z/Z_0$ ) com respeito ao número de indução ( $\theta$ ). Deduziu-se, através de três casos analisados, que ângulos de inclinação da ordem de 5 a 10° de inclinação do dipolo transmissor não afetam os dados adquiridos. A maior influência da topografia é causada pela diferença de altitude entre transmissor e receptor. A análise dos dados do campo de Araçás mostra que o efeito topográfico aparece em curtas distâncias transmissor-receptor com grandes diferenças de altitude. À medida em que se aumenta a separação transmissor-receptor, o efeito topográfico diminui progressivamente, ao mesmo tempo em que a razão sinal ruído diminui e torna o sinal indistinguível a partir de 2000 m de separação transmissor-receptor. Propôs-se um modelo inicial de multicamadas para a modelagem eletromagnética dessa área. O modelo foi deduzido a partir da interpretação dos dados de sondagens elétricas e de perfis geofísicos de poços da área, cedidos pela Petrobras.

Palavras chaves: Métodos elétricos e eletromagnéticos, efeito topográfico, geometria das bobinas, matriz de transformação.

# Abstract

This research aims to study the effect of terrain topography in the multi-frequency electromagnetic data in order to improve, with theoretical information, the accuracy of field data interpretation. We also discuss this effect in the data of the field of Araçás (Bahia-Brazil). It is assumed for that a vertical magnetic dipole on a isotropic and homogeneous half-space. It was determined the transformation matrix  $\tilde{T}$  and its inverse  $\tilde{T}^{-1}$ , which summarize informations about the sloping surface over which is extended the transmitting coil, as well as a general expression of the magnetic field ( $H_x$ ) on the inclined surface. That made possible to do simulations taking into account the geometry of the coil (azimuth and dip), and assess the magnitude of error due to topography, analyzing the variation of mutual impedance ( $Z/Z_0$ ) with respect to the induction number ( $\theta$ ). It is deduced, by means of three cases examined, that tilt angles of up to about 5 to 10° of the dipole axis does not affect the acquired data. The main influence of the topography is caused by the difference in altitude of the transmitter and receiver. The analysis of Araçás field data showed that, by increasing the transmitter-receiver separation, the topographic effect gradually decreases, but the signal-to-noise ratio decreases and the signal becomes indistinguishable from above 2000 m of transmitter-receiver separation. It is proposed an initial model of multilayer for the area. This model was deduced from the interpretation of electrical sounding data and the well logs data supplied by Petrobras.

Key words: electrical and electromagnetic methods, topographic effect, geometry of the coils, the transformation matrix.

# Índice

Resumo . . . . .	4
Abstract . . . . .	5
Índice . . . . .	6
Índice de Tabelas . . . . .	8
Índice de Figuras . . . . .	9
Introdução . . . . .	10
<b>1 Aplicação da geofísica eletromagnética . . . . .</b>	<b>12</b>
1.1 Princípio da sondagem eletromagnética . . . . .	12
1.1.1 Equipamentos . . . . .	14
1.1.2 Fonte . . . . .	14
1.1.3 Exploração geofísica . . . . .	14
1.2 Aplicação de métodos eletromagnéticos na industria petrolífera . . . . .	15
1.2.1 Resistividade aparente . . . . .	17
1.2.2 Profundidade de investigação . . . . .	19
1.2.3 Impedância mútua . . . . .	20
<b>2 Efeitos da topografia em dados FDEM . . . . .</b>	<b>22</b>
2.1 Geometria de aquisição e transformações de coordenadas . . . . .	23
2.2 Campo eletromagnético . . . . .	26
2.2.1 Matriz W para o caso do semi-espaco homogêneo . . . . .	28
2.3 Análise de casos particulares . . . . .	29

---

2.3.1	Modelagem direta . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Aplicação no caso do estudo no campo de Araçás . . . . .</b>	<b>41</b>
3.1	Aspectos geológicos, geofísicos e econômicos . . . . .	41
3.1.1	Localização e economia . . . . .	41
3.1.2	Aspectos Geológicos . . . . .	42
3.1.3	Sistemas Aquíferos . . . . .	44
3.1.4	Sistemas Petrolíferos . . . . .	45
3.2	Equipamentos e procedimentos de campo . . . . .	46
3.2.1	Equipamentos . . . . .	46
3.2.2	Procedimento do campo . . . . .	47
3.2.3	Análise do efeito topográfico nos dados experimentais eletromagnéticos	49
3.2.4	Processamento e interpretação de dados elétricos e da perfilagem . . .	51
<b>4</b>	<b>Conclusões . . . . .</b>	<b>59</b>
	<b>Agradecimentos . . . . .</b>	<b>61</b>
	<b>Referências Bibliográficas . . . . .</b>	<b>62</b>
	<b>Anexo I Programa de Computador Número Um . . . . .</b>	<b>66</b>

# Índice de Tabelas

3.1	Referências da bobina $T_1$ . . . . .	49
3.2	Referências da bobina $T_2$ . . . . .	49
3.3	Referências da bobina $T_3$ . . . . .	50

# Índice de Figuras

1.1	Princípio do método eletromagnético. . . . .	13
1.2	Arranjos usados no levantamento eletromagnético . . . . .	16
1.3	Localização do ponto principal de influência, Sato (1979) . . . . .	20
2.1	Plano inclinado regional e sistema de coordenadas . . . . .	24
2.2	Dipolo transmissor inclinado . . . . .	31
2.3	Efeito do dipolo transmissor inclinado . . . . .	32
2.4	Diferença de altitude . . . . .	33
2.5	Efeito da diferença de altitude (parte real) . . . . .	36
2.6	Efeito da diferença de altitude (parte imaginária) . . . . .	37
2.7	Dipolo transmissor normal ao plano inclinado . . . . .	38
2.8	Efeito do dipolo normal ao plano inclinado (parte real) . . . . .	39
2.9	Efeito do dipolo normal ao plano inclinado (parte imaginária) . . . . .	40
3.1	Limites da Bacia do Recôncavo, Aragão (2004) . . . . .	42
3.2	Seção geológica da Bacia do Recôncavo, Aragão (2004) . . . . .	43
3.3	Mapa de contornos elétricos no campo de Araçás, (Lima,2009) . . . . .	46
3.4	1-arranjo do transmissor e 2-arranjo do receptor . . . . .	48
3.5	Análise do efeito topográfico para distâncias menores. . . . .	52
3.6	Análise do efeito topográfico para distâncias maiores. . . . .	53
3.7	Perfis dos poços AR-84, AR-85, (Lima, 2009) . . . . .	54
3.8	Perfis da sondagem elétrica vertical, (a): Se-31, (b): Se-33 . . . . .	56
3.9	Perfis da sondagem elétrica vertical, (c): Se-18, (d): Se-9 . . . . .	57
3.10	Modelo inicial sugerido para modelagem direta, multicamadas. . . . .	58

# Introdução

Até a década de 70, os métodos eletromagnéticos tinham sido pouco usados na exploração geofísica. Porém, os avanços tecnológicos registrados nas últimas décadas, nas áreas da computação e eletrônica, as técnicas instrumentais, processamento e interpretação dos dados, possibilitaram uma versatilidade de uso dos métodos EM, sendo principalmente aplicados na exploração mineral (Zonge e Hughes, 1991). Esses métodos apresentam vantagens na detecção de contraste de resistividade diferenciando ambientes condutivos e resistivos (água salgada e hidrocarboneto). Assim, têm sido aplicados no mapeamento da distribuição da condutividade elétrica do meio geológico e na exploração de petróleo/gás. Algumas aplicações envolvem técnicas transientes tanto em terra (Cardador et al., 2003), como em mar (Eidesmo et al., 2002). A mais recente técnica EM de fonte controlada (CSEM), utilizada para o fundo do mar, é conhecida como Sea Bed Logging (SBL). Dias (1968), Sato (1979), Dias et al (2005, 2006, 2007) impulsionaram a técnica de uso dos métodos EM no domínio da frequência, contribuindo no desenvolvimento dos protótipos de equipamentos (EMR-40, McPhar, T3-unit call) para aquisição, além de técnicas de inversão e interpretação em termos de resistividade aparente e polarização induzida. Os resultados satisfatórios alcançados por esses autores em distintos campos de petróleo de interesse da Petrobras, tem justificado a implementação dessa técnica em campos maduros na bacias continentais brasileiros. A presente dissertação é parte do projeto intitulado: “Exploração direta de petróleo com levantamentos elétricos e eletromagnéticos à multifrequência na Bacia de Recôncavo”. Trata-se de um projeto UFBA/FINEP-CTPETRO/PETROBRAS que tem como principais objetivos: (i) aprofundar o conhecimento da fenomenologia da condução elétrica e do efeito de polarização induzida em reservatórios areno-argilosos saturados com água e/ou petróleo; (ii) testar a viabilidade técnica do uso dos métodos elétrico e eletromagnético à multifrequência na

exploração direta e na caracterização petrofísica de reservatórios de petróleo; (iii) testar a viabilidade de usar essas mesmas técnicas no monitoramento do processo de inundação de reservatórios, quando submetidos à injeção forçada de fluidos (água ou vapor) visando o aumento do fator de recuperação de óleo.

Os experimentos teóricos e práticos realizados por Dias (1968), Sato (1979) e Dias et al (2005, 2006, 2007) foram bastante satisfatórios. Contudo existe ainda a preocupação de se conhecer melhor o método. Uma das preocupações se traduz no entendimento do efeito da topografia do terreno sobre a resposta do campo magnético, no domínio da frequência. Essa dissertação objetiva, então, avaliar a magnitude do efeito topográfico em dados EM multifrequência obtidos com um dipolo magnético sobre um semi-espaço condutor homogêneo. Tais estudos tem sido pouco tratados na literatura, destacando-se os esforços realizados para amenizar efeitos topográficos em dados dos métodos VLF (Baker, 1979; Karous, 1979), magneto-telúrico (George e Jiracek, 2005) e HEM (Helicopter-borne Electromagnetic) (Sasaki e Nakazato, 2003). Esses últimos autores observaram que os dados de EM coletados nas montanhas por um helicóptero (HEM) apresentavam altas anomalias de resistividades no topo e baixas anomalias no sopé das montanhas. Para dados eletromagnéticos terrestres no domínio da frequência, cabe destacar o trabalho de Sinha (1980). Para a maioria desses autores, o efeito topográfico pode ser removido corretamente, integrando a solução direta da resposta do campo, na modelagem e inversão (Ku et al., 1973; George e Jiracek, 2005; Sasaki e Nakazato, 2003). O presente trabalho tem como objetivos específicos: (i) determinar a matriz de transformação que permite relacionar um meio uniformemente inclinado a uma interface horizontal, (ii) avaliar a magnitude do erro cometido pelo efeito da topografia, através de simulações numéricas com diferentes azimutes e mergulho do terreno, (iii) analisar a presença desses efeitos nos dados obtidos no campo de Araçás.

# 1

## Aplicação da geofísica eletromagnética

### 1.1 Princípio da sondagem eletromagnética

É chamado de sondagem eletromagnética um conjunto de procedimentos realizados para a prospecção de subsuperfície utilizando métodos eletromagnéticos, com o intuito de determinar a variação da condutividade elétrica da terra com a profundidade (Spies e Frischknecht, 1991). O método eletromagnético baseia-se nos fenômenos físicos de eletricidade e magnetismo, sintetizados pelas equações de Maxwell.

Como qualquer meio material, o meio geológico é caracterizado por sua permeabilidade magnética, sua permissividade dielétrica e sua condutividade elétrica, que contribuem para modificar os campos eletromagnéticos no interior do mesmo, que por sua vez criam campos eletromagnéticos secundários.

Uma corrente elétrica fluindo em uma bobina na superfície da terra cria um campo eletromagnético primário nas suas proximidades, que se propaga tanto acima quanto abaixo da superfície. Quando a subsuperfície é um meio homogêneo resistivo, não há diferença entre os campos se propagando acima da superfície e através do solo, que não seja uma leve redução na amplitude do último com respeito ao primeiro. Entretanto, na presença de um corpo condutor, o componente magnético do campo eletromagnético que penetra no solo induz correntes elétricas (“eddy currents”), que percorrem o corpo condutor (Fig. 1.1). Essas

correntes induzidas geram seus próprios campos eletromagnéticos denominados secundários. O receptor, então, responde à resultante da chegada dos campos primário e secundário, de forma que a resposta difere tanto em fase quanto em amplitude da resposta do campo primário somente. Essas diferenças entre os campos eletromagnéticos transmitido e recebido revelam a presença do condutor e fornecem informações sobre sua geometria e suas propriedades elétricas. A indução do fluxo de corrente resulta do componente magnético do campo eletromagnético. Conseqüentemente, não há necessidade de contato físico do transmissor ou do receptor com o solo. Os levantamentos EM de superfície podem, assim, ser realizados mais rapidamente que os levantamentos elétricos, nos quais é necessário o contato com o solo. Ainda mais importante, tanto o transmissor quanto o receptor podem ser montados numa aeronave ou rebocados por ela. Os métodos eletromagnéticos aerotransportados são largamente usados na prospecção de corpos condutivos de minério (Philip et al, 2002).

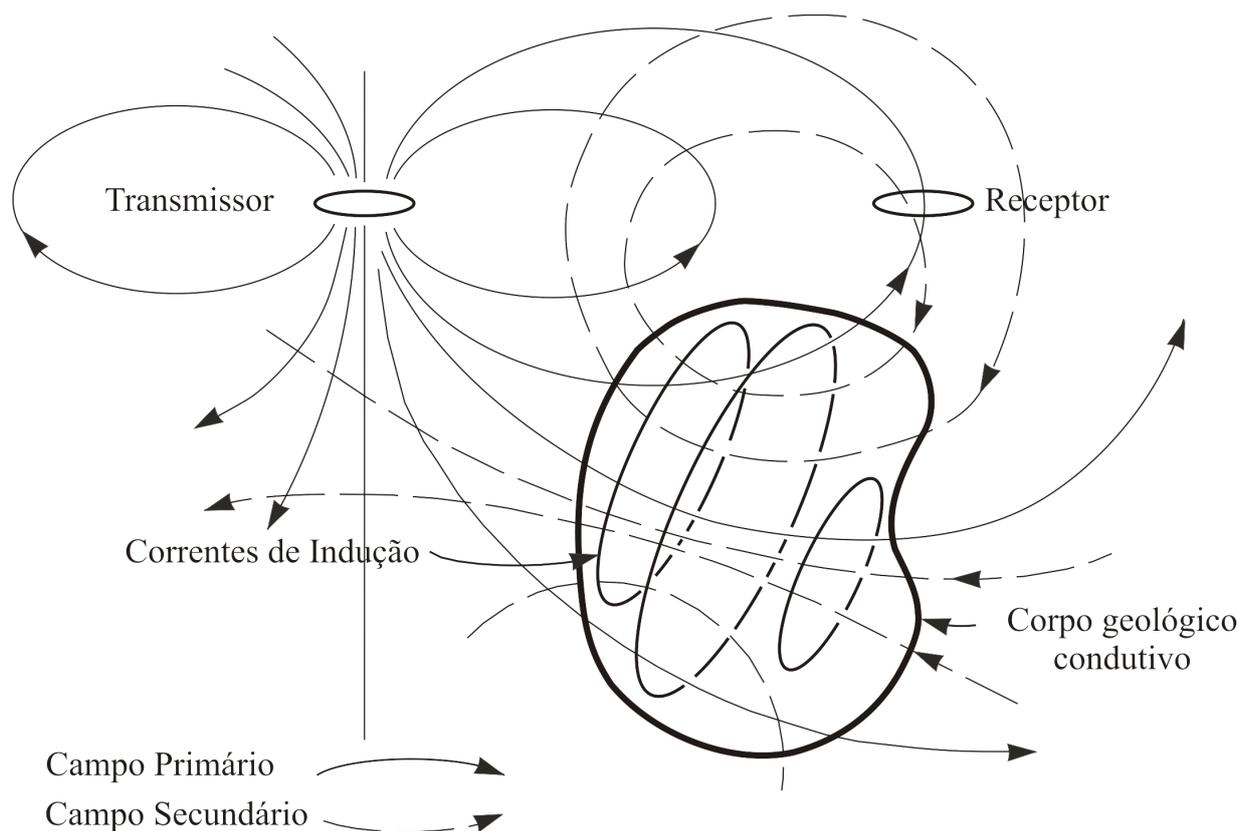


Figura 1.1: Princípio do método eletromagnético.

### 1.1.1 Equipamentos

Os equipamentos EM contam com um sistema de transmissão chamado fonte e outro de recepção. Do sistema transmissor faz parte um gerador-alternador ou um oscilador transistorizado. Ligada a fonte de alimentação existe uma espira ou um longo cabo aterrado. Do sistema de recepção faz parte uma outra bobina, composta de muitas espiras de fio fino, que pode ter núcleo de ar ou de ferrita e cujo sinal é enviado para um amplificador. Essa bobina é sincronizada à frequência da fonte. Porém, já existem equipamentos como SIROTEM, que utilizam apenas uma bobina, que desempenha as funções de transmissor e receptor. O sistema é bastante sensível ao ruído. As linhas de transmissão elétrica, a interferência de ondas de rádio e/ou de telefonia celular, referidos como ruídos culturais (“man-made”), podem ser fonte de ruído para o método EM. Ruídos naturais incluem as heterogeneidades do meio geológico, os ventos, e a topografia do terreno que é o assunto tratado nesse trabalho.

### 1.1.2 Fonte

O tipo de fonte usada depende do objetivo da investigação. O cabo linear por exemplo, é útil principalmente para trabalhos de perfilagem, ou seja, para detectar variações laterais da condutividade. Por outro lado, um dipolo magnético é adequado para executar sondagem eletromagnéticas através de uma sub-superfície multi-estratificada (Patras, 1969; Patras e Mallick, 1980). No caso de um dipolo magnético como o que foi usado na presente pesquisa, a separação entre as bobina transmissora e receptora e a frequência correspondente, devem ser escolhidas de forma judiciosa. Por exemplo, embora a frequência seja menor para maior profundidade investigada, a informação recebida pode ficar com muito ruído e será preciso então aumentar a distância transmissor-receptor.

### 1.1.3 Exploração geofísica

A exploração geofísica é realizada com uma ou várias unidades receptoras ou com a fonte e receptor em combinação, dependendo do sistema em uso. Na prática, a distância transmissor-receptor representa apenas uma fração muito pequena do comprimento da onda eletromagnética no espaço livre (ar). Isto quer dizer que em regiões nas quais as observações eletromag-

néticas são realizadas, as radiações são muito fracas e os atrasos de fase são desprezíveis. Dessa forma, o efeito de propagação pode ser desconsiderado completamente, daí a condição quase-estática considerada nos métodos de indução eletromagnética. Esses métodos, portanto, se diferenciam do método sísmico que depende da propagação de ondas sísmicas.

Quando as medidas são efetuadas fora da bobina transmissora, a separação entre o transmissor e o receptor pode-se manter fixa e as medições serem feitas num amplo intervalo de frequência, ou a posição transmissor-receptor pode ser mudada ao longo da investigação. No primeiro caso o levantamento é chamado de *paramétrico*, e de *geométrico* no segundo. A sondagem *paramétrica* tem relativa vantagem sobre a *geométrica*. A frequente mudança da posição transmissor-receptor na sondagem *geométrica* pode introduzir nas medidas, ruídos geológicos devido aos efeitos de heterogeneidades laterais (Ryu et al., 1970; Patras e Mallick, 1980). Para grandes profundidades a sondagem *paramétrica* é muito mais conveniente desde o ponto de vista operacional, além de oferecer uma melhor resolução para menores ou maiores contrastes de condutividade.

Vários arranjos de fontes e receptor são usados para realizar levantamentos EM conforme mostrado na Fig. 1.2. Na presente pesquisa, foi adotado o arranjo de mínimo acoplamento PERP (Perpendicular).

## 1.2 Aplicação de métodos eletromagnéticos na indústria petrolífera

Na indústria do petróleo, a sísmica de reflexão é usada geralmente para determinar estruturas em subsuperfície e para localizar potenciais reservatórios. Todavia, este método é geralmente inadequado para a determinação da natureza do conteúdo de fluido das rochas. Este conhecimento é de grande interesse da indústria de petróleo, para se evitar perfurar poços não produtores em função da rocha reservatório não conter hidrocarbonetos. O método EM tem o potencial para reduzir esse risco pois pode-se discriminar entre reservatórios saturados com água (menor resistividade e maior polarização) e reservatórios saturados com hidrocarbonetos (resistividade maior e menor polarização).

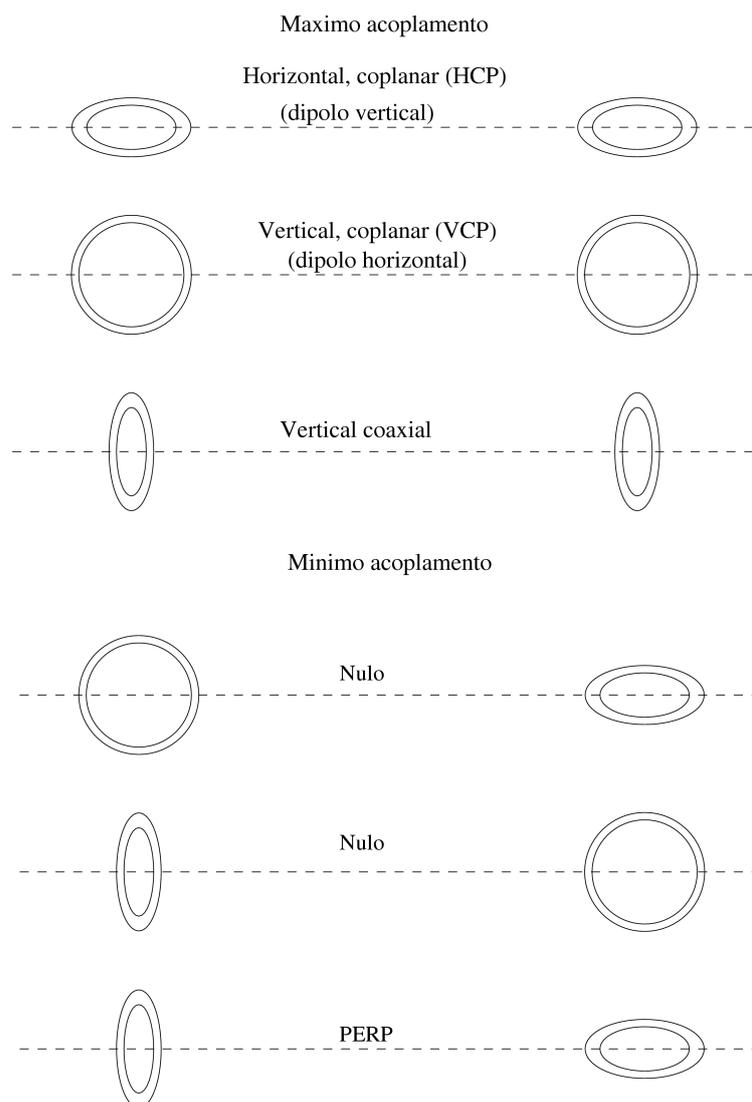


Figura 1.2: Arranjos usados no levantamento eletromagnético

O valor da resistividade de uma rocha depende da porosidade, da resistividade da água e do índice saturação da rocha. Consequentemente, as resistividades obtidas através de perfilagens de poços são rotineiramente utilizadas para calcular a porosidade e a saturação de rochas reservatórios.

Quando o fluido principal da rocha muda de água para hidrocarbonetos, muitas de suas propriedades físicas mudam também. A resistividade elétrica é a mais afetada, e, portanto, a substituição da salmoura por óleo pode causar uma variação na resistividade elétrica da rocha de muitas ordens de magnitude. Por outro lado, esta mesma mudança pouco altera a impedância acústica da rocha.

A principal razão para o método EM de superfície pouco utilizado na indústria de petróleo se deve à baixa resolução dos dados EM em comparação com a resolução sísmica. O espalhamento de onda eletromagnética obedece a equação de difusão, e sua dispersão ocorre no tempo e na distância. A propagação da onda sísmica obedece a equação da onda e o pulso sísmico viaja grandes distâncias com pequena perda de resolução. Entretanto, novos sistemas de registros a multicanais têm garantido um aumento da faixa dinâmica do dado EM.

O método eletromagnético a multifrequência, em princípio, permite trabalhar numa ampla escala de frequências do espectro eletromagnético. Desse modo, se obtém, mais informações sobre a distribuição da resistividade em subsuperfície, do que os métodos baseados na resistividade dc ou os equipamentos de medidas EM de baixas e poucas frequências.

Wright e Ziolkowski (2002) apresentam resultados provenientes de um experimento realizado com o método eletromagnético transiente para a detecção de hidrocarbonetos. Tarso e Moraes (2003) fizeram um estudo da resposta eletromagnética em reservatórios próximos a superfície trabalhando na bacia Sergipe-Alagoas. As medidas foram conduzidas em três campos de petróleo conhecidos desta bacia, para investigar a possibilidade de mapear a pluma de alteração geoquímica (halos de pirita) sobre os reservatórios de hidrocarbonetos da bacia. A identificação de anomalias eletromagnéticas associadas as plumas de alteração ilustram a importância de se efetuar sondagens EM transiente (TEM) na fase de reconhecimento das bacias costeiras brasileiras. Ellingsrud et al. (2002) demonstraram que, pelo uso do “Sea Bed Logging” (SBL), uma aplicação especial da sondagem eletromagnética que utiliza fontes controladas no domínio da frequência (CSEM), a existência ou não de hidrocarbonetos dentro da camada pode ser determinada e sua extensão e limites laterais podem ser quantificados.

### 1.2.1 Resistividade aparente

Na caracterização elétrica de um meio geológico, tem sido muito utilizado o conceito da resistividade elétrica dos materiais. As medidas de resistividade elétrica são realizadas em amostra de mão em laboratórios, determinando-se seu valor médio para um certo volume de material, ou em medidas *in situ* em torno de poços ou de zonas de exploração, quando passa

a ter a designação de resistividade aparente.

Os mecanismos de condução de corrente elétrica dependem da natureza do material. Em metais e semi-condutores eletrônicos, a corrente é formada por elétrons livres, cuja quantidade é função do elemento químico, temperatura e outras variáveis. Os metais, como ouro e cobre, se caracterizam por terem uma baixa eletronegatividade, ou seja, os elétrons ficam fracamente ligados ao átomo, podendo ser doados facilmente, o que explica sua alta condutividade (Russel, 1994). Em semi-condutores, como o diamante, relativamente poucos elétrons estão livres para se mover através do retículo cristalino, tornando-os menos condutores que os metais.

Na maioria das rochas próximas da superfície terrestre, a condução de corrente elétrica é feita inteiramente por meio de um eletrólito (água com um soluto) contido em seus poros. A condução por meio de minerais é possível em algumas rochas que contenham minerais metálicos ou de argilas, em altas concentrações. A lei de Archie é uma relação empírica entre a resistividade da rocha com certos parâmetros físicos e geométricos, dado por

$$\rho_R = a\rho_E\phi^{-m}S_w^{-n} \quad (1.1)$$

onde  $\rho_R$  é a resistividade da rocha,  $\rho_E$ , a resistividade do eletrólito,  $\phi$ , a porosidade,  $S_w$  é a saturação em água (eletrólito) e  $a$ ,  $m$ ,  $n$  são constantes, sendo  $n$  aproximadamente igual a 2.

Pela equação (1.1), compreende-se que quanto menor a saturação em água, maior a resistividade da rocha. No caso de presença de óleo ou gás, a saturação em água é reduzida e maiores valores de resistividades são encontrados. Microscopicamente, a diminuição da quantidade de fluido eletrolítico acarreta redução da quantidade de sais, aumentando a dificuldade para o fluxo de corrente elétrica.

A resistividade de um material pode variar ainda com a temperatura a qual está submetido. Em metais, por exemplo, a resistividade cresce com o aumento da temperatura. Semicondutores, em geral, têm uma relação inversa entre temperatura e resistividade, podendo, em alguns casos, apresentar um coeficiente positivo entre estes. Em rochas contendo água e em condições de temperaturas moderadas, o aumento da temperatura ocasiona aumento da condutividade da rocha (Keller e Frischknecht, 1966).

A resistividade aparente, amplamente utilizada em métodos geológicos elétricos e eletromagnéticos, corresponde *grosso modo* ao valor da resistividade de um semi-espço ideal homogêneo e isotrópico, que responderia com as mesmas impedâncias observadas, para idênticas configurações transmissor-receptor e características instrumentais. Nos métodos elétricos de corrente contínua, a resistividade aparente é uma quantidade real, enquanto que para campos alternados, essa função passa a ser uma quantidade complexa.

## 1.2.2 Profundidade de investigação

Para sistemas indutivos de bobinas horizontais Ward et al. (1974) se referem ser na prática em exploração geofísica se estimar a profundidade de exploração como cerca de metade da separação transmissor-receptor. Dias (1968) define a profundidade de exploração como sendo a profundidade na qual uma heterogeneidade altera em 10% ou 15%, os valores dos campos obtidos para um semi-espço homogêneo, para uma dada posição do transmissor e ponto de observação.

Dias e Sato (1981), usando como fonte um dipolo magnético vertical situada na superfície de um semi-espço homogêneo e isotrópico de condutividade real, definiram como profundidade de exploração aquela associada a um ponto do interior do semi-espço, em que a intensidade do campo elétrico cai para  $1/e$  de seu valor na superfície, diretamente acima do ponto considerado. Com base nesta definição os autores demonstram que a máxima profundidade de exploração que se pode alcançar é a da distancia  $r$  entre transmissor e receptor, por menor que seja a frequência  $\omega$ . Concluem ainda que a região que mais contribui para o sinal recebido está acima da superfície de um cone com vértice no transmissor, e abaixo da qual o campo elétrico tem módulo inferior a  $1/e$  do seu valor na superfície do semi-espço. No interior desta região, à meia distância entre a superfície do terreno e a superfície do cone, está o lugar geométrico dos pontos que são associados às medidas observadas (Fig. 1.3), por terem eles maior contribuição do que os demais. Desta forma, o ponto principal fica localizado a uma distancia lateral do receptor que varia de  $0, 2r$ , no sentido do transmissor, enquanto que verticalmente está entre  $0, 4r$  e  $0, 5r$  (Sato, 1979).

Parasnis (1970) afirma que, quando se diminui a frequência, a resposta dos condutores

profundos se intensifica e a dos superficiais se debilita. A profundidade máxima de penetração é denominada de *skin-depth* e tem como expressão:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}}, \quad (1.2)$$

onde  $\sigma$  é a condutividade do meio,  $\mu$ , a permeabilidade magnética, e  $\omega$  a frequência. Todavia a profundidade de investigação (Zonge e Hughes, 1991) é dada por:

$$D = \frac{\delta}{\sqrt{2}} \quad (1.3)$$

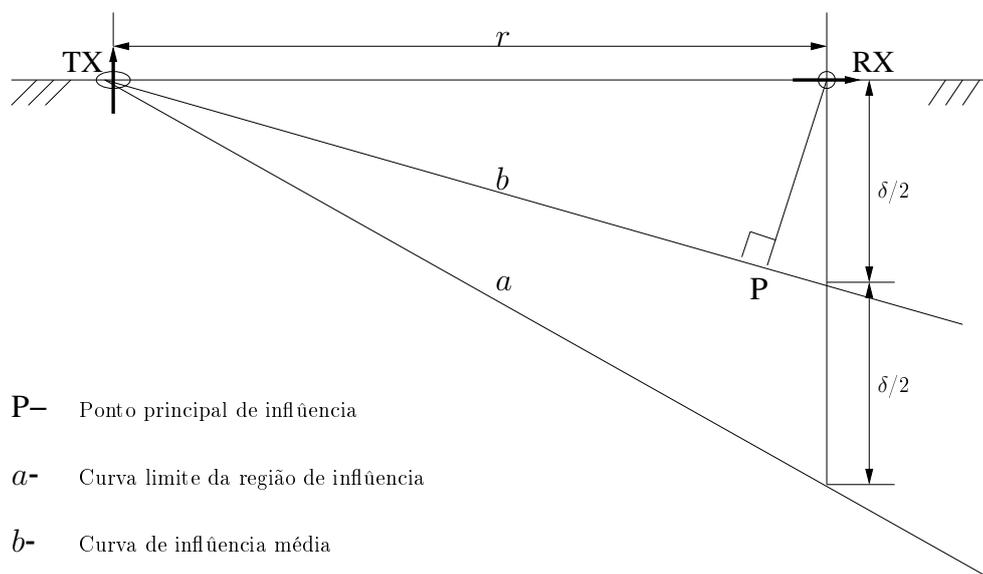


Figura 1.3: Localização do ponto principal de influência, Sato (1979)

### 1.2.3 Impedância mútua

A impedância mútua, de acordo com Grant e West (1965), é um conceito muito usado para descrever a interação, à distância, entre circuitos elétricos devidos à indução eletromagnética. Ela aparece na exploração eletromagnética induzida, pois na maioria dos casos, o transmissor e o receptor são ambas bobinas simples e existe uma interação entre elas. Grant e West (1965) consideram que o transmissor e o receptor são bobinas simples de pequena seção transversal, mantidas fixas em suas posições e orientações relativas. A força eletromotriz (*fem*) induzida no receptor é proporcional à taxa temporal de variação da corrente no transmissor, e a constante de proporcionalidade é chamada de coeficiente de impedância mútua.

Nos métodos eletromagnéticos, são geralmente determinados os componentes verticais  $H_z$  e horizontais  $H_x$  do campo, ou ainda os campos primário  $H_0$  e secundário  $H_s$ . Wait (1955) e Frischknecht (1967) expressaram as variações relativas dos campos em termos da razão das impedâncias mútuas, definida por  $(Z/Z_0)$ , onde  $Z$  é a impedância mútua de uma bobina pequena na superfície da terra e  $Z_0$ , a impedância mútua da mesma bobina no espaço livre. É também a razão entre o campo medido no receptor e o valor do campo primário, ou seja,  $H/H_0$ , onde  $H = H_s + H_0$ , é o campo total. Para um arranjo perpendicular,  $Z/Z_0 = H_s/H_0$  e  $H_0 = -m/4\pi r^3$ .

Ward e Hohmann (1988) apresentam a expressão da razão das impedâncias mútuas para o arranjo perpendicular como sendo dado por:

$$Z/Z_0 = k^2 r^2 \left[ I_1 \left( \frac{ikr}{2} \right) K_1 \left( \frac{ikr}{2} \right) - I_2 \left( \frac{ikr}{2} \right) K_2 \left( \frac{ikr}{2} \right) \right] \quad (1.4)$$

onde  $I_n(\cdot)$ ,  $K_n(\cdot)$  são respectivamente funções modificadas de Bessel de primeira e segunda espécie, de ordem  $n$ ;  $r$ , é a distância transmissor-receptor e  $k$  é o número de onda.

# 2

## Efeitos da topografia em dados FDEM

Os modelos teóricos usados na exploração geofísica consideram a superfície da terra como plana e horizontal. Na prática, essas condições nem sempre acontecem. Conseqüentemente, além dos efeitos não calculados de presença ou falta de sedimentos e rochas, efeitos meramente geométricos irão alterar os valores medidos. Conhecer a magnitude desses efeitos sobre os dados geofísicos eletromagnéticos de multifrequência é o objetivo desse trabalho.

Os efeitos não previstos pelos modelos teóricos, portanto indejáveis, são conhecidos como ruídos. Vários são os ruídos a serem considerados numa exploração geofísica. Tratam-se dos ruídos culturais (man-made), dos ruídos instrumentais e dos ruídos geológicos (heterogeneidade, anisotropia, topografia). Trabalhos têm sido feitos no esforço de corrigir ou amenizar o efeito topográfico na exploração eletromagnética com o método VLF (Baker, 1979; Karous, 1979), e o magneto-telúrico (George e Jiracek, 2005; Baba e Chave, 2005). Porém, pouco se sabe na literatura sobre os efeitos da topografia em dados eletromagnéticos multifrequência, tendo-se como referência os trabalhos de Dias (1968) e de Sinha (1980).

## 2.1 Geometria de aquisição e transformações de coordenadas

Situações gerais de natureza topográfica implicam em que (i) os centros das bobinas transmissora e receptora estejam em níveis topográficos distintos, e (ii) a espira usada para simular o dipolo transmissor não tem uma geometria simples, tipo quadrado ou círculo, devido à sua própria disposição num terreno irregular. As consequências de uma realidade topográfica geral serão analisadas com as seguintes simplificações:

1. Existe um terreno plano e inclinado que representa média topográfica do relevo, que passa pelos centros das bobinas transmissora e receptora.
2. A espira transmissora tem geometria tipo quadrado ou círculo, conseqüentemente plana. Devido às condições topográficas do local de sua montagem, seu plano não coincide com o plano do terreno. Apesar de sua geometria simples, a bobina transmissora será substituída por um dipolo magnético, e
3. Será considerado que o eixo da bobina receptora é horizontal e intercepta a linha vertical que passa pelo centro da bobina transmissora.

A Fig. 2.1 ilustra a situação descrita e os dois sistemas de coordenadas cartesianas que serão utilizadas:

- O eixo  $z$  do sistema  $(x, y, z)$  é vertical e aponta para o centro da terra.
- A origem do sistema  $(x', y', z')$ , (ponto **c** da Fig. 2.1) coincide com o centro da bobina transmissora e é um ponto do eixo  $z$ .
- Os eixos  $x$  e  $x'$  interceptam-se no local da bobina receptora (ponto **a** da Fig. 2.1), cujo eixo, por sua vez, coincide com o eixo  $x$ .
- $\mathbf{P}$  é o vetor normal ao plano definido pelos pontos  $(a, b, c)$ .
- $\alpha$  é o ângulo azimutal da reta de mergulho do plano do terreno, medido com relação ao eixo  $x$ .

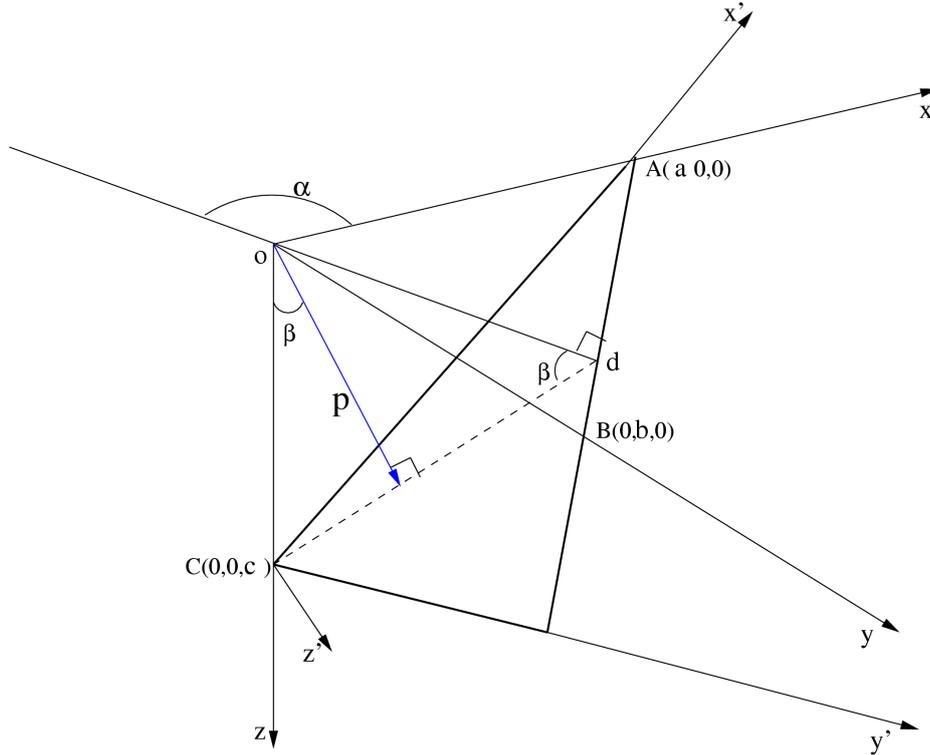


Figura 2.1: Plano inclinado regional e sistema de coordenadas

- $\beta$  é o ângulo de mergulho do plano do terreno.

Na medida em que o dipolo magnético não é vertical e nem normal ao plano do terreno, considera-se a sua representação geral como

$$\tilde{M} = |M| \begin{bmatrix} \sin \beta_M \cos \alpha_M \\ \sin \beta_M \sin \alpha_M \\ \cos \beta_M \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

onde  $|M|$  é a magnitude do dipolo magnético transmissor,  $\alpha_M$ , o ângulo azimutal em relação ao eixo  $+x$ , da projeção do dipolo no plano  $xy$ , e  $\beta_M$ , o ângulo entre o eixo  $+z$  e o eixo do dipolo.

Considerando as direções dos eixos  $x, y$ , e  $z$ , e dos eixos  $x', y'$  e  $z'$  mostrados na Fig. 2.1, pode-se definir seus respectivos versores  $\mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y, \mathbf{u}_z$  e  $\mathbf{u}_{x'}, \mathbf{u}_{y'}, \mathbf{u}_{z'}$ . Desde que

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{x'} &\propto a\mathbf{u}_x - c\mathbf{u}_z, \\ &\propto \mathbf{u}_x - \frac{c}{a}\mathbf{u}_z \end{aligned}$$

ou então,

$$\mathbf{u}_{x'} = \frac{1}{\sqrt{1 + (c/a)^2}} \mathbf{u}_x - \frac{c/a}{\sqrt{1 + (c/a)^2}} \mathbf{u}_z. \quad (2.2)$$

O vetor  $\mathbf{P}$  é paralelo ao versor  $\mathbf{u}_{z'}$  do eixo  $z'$ , ou seja,

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{z'} &\propto \frac{1}{a} \mathbf{u}_x + \frac{1}{b} \mathbf{u}_y + \frac{1}{c} \mathbf{u}_z, \\ &\propto \frac{c}{a} \mathbf{u}_x + \frac{c}{b} \mathbf{u}_y + \mathbf{u}_z \end{aligned}$$

Sendo assim,

$$\mathbf{u}_{z'} = \frac{c/a}{\sqrt{(c/a)^2 + (c/b)^2 + 1}} \mathbf{u}_x + \frac{c/b}{\sqrt{(c/a)^2 + (c/b)^2 + 1}} \mathbf{u}_y + \frac{1}{\sqrt{(c/a)^2 + (c/b)^2 + 1}} \mathbf{u}_z. \quad (2.3)$$

Ainda da Fig. 2.1, pode-se escrever:

$$\mathbf{u}_{z'} = l_{z'} \mathbf{u}_x + m_{z'} \mathbf{u}_y + n_{z'} \mathbf{u}_z, \quad (2.4)$$

onde  $l_{z'} = -\sin \beta \cos \alpha$ ,  $m_{z'} = \sin \beta \sin \alpha$ , e  $n_{z'} = \cos \beta$ , são os cossenos diretores da direção de  $z'$ .

Considerando as expressões das equações (2.3) e (2.4), tem-se as seguintes relações:

$$-\sin \beta \cos \alpha = \frac{c/a}{\sqrt{(c/a)^2 + (c/b)^2 + 1}}, \quad (2.5)$$

$$\sin \beta \sin \alpha = \frac{c/b}{\sqrt{(c/a)^2 + (c/b)^2 + 1}}, \quad (2.6)$$

$$\cos \beta = \frac{1}{\sqrt{(c/a)^2 + (c/b)^2 + 1}}. \quad (2.7)$$

Da equação (2.7), tem-se:

$$\sqrt{(c/a)^2 + (c/b)^2 + 1} = \frac{1}{\cos \beta}.$$

Usando este resultado na equação (2.5) pode-se escrever:

$$\frac{c}{a} = -\tan \beta \cos \alpha,$$

que permite reescrever a equação (2.2) como

$$\mathbf{u}_{x'} = l_{x'} \mathbf{u}_x + m_{x'} \mathbf{u}_y + n_{x'} \mathbf{u}_z, \quad (2.8)$$

onde  $l_{x'} = 1/\Delta$ ,  $m_{x'} = 0$ ,  $n_{x'} = \tan \beta \cos \alpha / \Delta$ , e  $\Delta = \sqrt{1 + (\tan \beta \cos \alpha)^2}$ , e  $l_{x'}$ ,  $m_{x'}$ ,  $n_{x'}$  são cossenos diretores da direção  $x'$ .

Como o versor  $\mathbf{u}_{y'}$  é o produto vetorial de  $\mathbf{u}_{z'}$  por  $\mathbf{u}_{x'}$  se obtém

$$\mathbf{u}_{y'} = \mathbf{u}_{z'} \times \mathbf{u}_{x'}$$

ou,

$$\mathbf{u}_{y'} = l_{y'}\mathbf{u}_x + m_{y'}\mathbf{u}_y + n_{y'}\mathbf{u}_z, \quad (2.9)$$

onde  $l_{y'} = (\tan \beta \cos \alpha / \Delta) \sin \beta \sin \alpha$ ,  $m_{y'} = \cos \beta / \Delta - \sin \beta \sin \alpha$ , e  $n_{y'} = \sin \beta \sin \alpha / \Delta$ , e são os cossenos diretores da direção  $y'$ .

A matriz formada pelos cossenos diretores é chamada de *matriz de transformação* (Butkov, 1968), dada por:

$$\underset{\sim}{T} = \begin{pmatrix} l_{x'} & m_{x'} & n_{x'} \\ l_{y'} & m_{y'} & n_{y'} \\ l_{z'} & n_{z'} & n_{z'} \end{pmatrix}. \quad (2.10)$$

e a sua inversa, que faz a transformação oposta, é dada por:

$$\underset{\sim}{T}^{-1} = \begin{pmatrix} l_{x'} & l_{y'} & l_{z'} \\ m_{x'} & m_{y'} & m_{z'} \\ n_{x'} & n_{y'} & n_{z'} \end{pmatrix}. \quad (2.11)$$

As colunas e linhas da *matriz de transformação* e da sua inversa são mutuamente ortogonais e têm módulo unitário (Butkov, 1968).

## 2.2 Campo eletromagnético

Nesta seção, considerando-se os dois sistemas de coordenadas cartesianas, será feita a formulação a respeito dos componentes do dipolo magnético fonte na superfície de um terreno inclinado, bem como, também, será desenvolvida a formulação a respeito do campo magnético no receptor.

Definindo matrizes coluna para representar o campo magnético e o dipolo magnético

transmissor, ou seja,

$$\begin{aligned}\tilde{H}' &= (H_{x'} H_{y'} H_{z'})^T, \\ \tilde{H} &= (H_x H_y H_z)^T, \\ \tilde{M}' &= (M_{x'} M_{y'} M_{z'})^T \text{ e} \\ \tilde{M} &= (M_x M_y M_z)^T,\end{aligned}$$

eles relacionam-se por:

$$\tilde{M}' = \tilde{T} \tilde{M}, \quad (2.12)$$

$$\tilde{M} = \tilde{T}^{-1} \tilde{M}', \quad (2.13)$$

$$\tilde{H}' = \tilde{T} \tilde{H}, \text{ e} \quad (2.14)$$

$$\tilde{H} = \tilde{T}^{-1} \tilde{H}' \quad (2.15)$$

Considerando que, para cada componente do momento magnético  $\tilde{M}'$ , existem três componentes do campo magnético no receptor, a formulação matricial fica

$$\tilde{H}' = \tilde{W} \tilde{M}', \quad (2.16)$$

onde  $\tilde{W}$  é uma matriz  $3 \times 3$ , em que cada elemento  $W_{ij}$  é uma função que relaciona um componente de  $\tilde{H}'$  do campo magnético a um componente  $\tilde{M}'$  do momento magnético. De forma explícita, a expressão (2.16) é escrita como:

$$\begin{pmatrix} H_{x'} \\ H_{y'} \\ H_{z'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} W_{x'x'} & W_{y'x'} & W_{z'x'} \\ W_{x'y'} & W_{y'y'} & W_{z'y'} \\ W_{x'z'} & W_{y'z'} & W_{z'z'} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_{x'} \\ M_{y'} \\ M_{z'} \end{pmatrix}. \quad (2.17)$$

Substituindo a expressão (2.12) na equação (2.16), e usando a equação (2.15), tem-se:

$$\tilde{H} = \tilde{T}^{-1} \tilde{W} \tilde{T} \tilde{M}. \quad (2.18)$$

A equação (2.18) representa a forma geral do campo magnético na superfície de um plano inclinado nas condições ilustradas na Fig. 2.1.

A matriz de transformação  $\tilde{T}$  e sua inversa contêm as informações sobre a disposição do plano inclinado em relação ao plano horizontal. A matriz  $\tilde{W}$  é formada por nove funções que descrevem, no sistema de coordenados  $(x', y', z')$ , os campos magnéticos devidos à fonte dipolar magnética com qualquer inclinação.

### 2.2.1 Matriz $W$ para o caso do semi-espço homogêneo

Com base em Ward e Hohmann (1988), pode-se escrever as seguintes expressões para os elementos da matriz  $W$ :

$$W_{x'x'} = \frac{-1}{4\pi r^3} \left[ y'^2 \phi + x'^2 r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right] \quad (2.19)$$

$$W_{y'y'} = \frac{1}{4\pi r^3} \left[ x'y' \phi - x'y' r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right] \quad (2.20)$$

$$W_{z'x'} = \frac{k^2 x'}{4\pi r^2} \left[ I_1 \left( \frac{ikr}{2} \right) K_1 \left( \frac{ikr}{2} \right) - I_2 \left( \frac{ikr}{2} \right) K_2 \left( \frac{ikr}{2} \right) \right] \quad (2.21)$$

$$W_{x'y'} = \frac{-1}{4\pi r^3} \left[ x'y' \phi - x'y' r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right] \quad (2.22)$$

$$W_{y'y'} = \frac{-1}{4\pi r^3} \left[ x'^2 \phi + y'^2 r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right] \quad (2.23)$$

$$W_{z'y'} = \frac{k^2 y'}{4\pi r^2} \left[ I_1 \left( \frac{ikr}{2} \right) K_1 \left( \frac{ikr}{2} \right) - I_2 \left( \frac{ikr}{2} \right) K_2 \left( \frac{ikr}{2} \right) \right] \quad (2.24)$$

$$W_{x'z'} = \frac{x'k^2}{4\pi r^2} \left[ I_1 \left( \frac{ikr}{2} \right) K_1 \left( \frac{ikr}{2} \right) - I_2 \left( \frac{ikr}{2} \right) K_2 \left( \frac{ikr}{2} \right) \right] \quad (2.25)$$

$$W_{y'z'} = \frac{y'k^2}{4\pi r^2} \left[ I_1 \left( \frac{ikr}{2} \right) K_1 \left( \frac{ikr}{2} \right) - I_2 \left( \frac{ikr}{2} \right) K_2 \left( \frac{ikr}{2} \right) \right] \quad (2.26)$$

$$W_{z'z'} = \frac{1}{2\pi k^2 r^5} \left[ 9 - (9 + 9ikr - 4k^2 r^2 - ik^3 r^3) \exp(-ikr) \right] \quad (2.27)$$

onde  $(x', y')$  são as coordenadas do receptor,  $r = (x'^2 + y'^2)^{1/2}$ ,  $k = (-i\omega\mu\sigma)^{1/2}$ , o número de onda,  $I_n(\cdot)$ , função modificada de Bessel de primeira espécie,  $K_n(\cdot)$  função modificada de Bessel de segunda espécie, e

$$\phi = \frac{2}{k^2 r^4} \left[ 3 + k^2 r^2 - (3 + 3ikr - k^2 r^2) \exp(-ikr) \right] \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial r} = \frac{2}{k^2 r^5} \left[ -2k^2 r^2 - 12 + (ik^3 r^3 - 5k^2 r^2 + 12ikr + 12) \exp(-ikr) \right] \quad (2.29)$$

### 2.3 Análise de casos particulares

Relembrando que, por hipótese, o dipolo transmissor e o receptor localizam-se na superfície de um semi-espaco homogêneo e isotrópico, serão estudados diversos casos em que os ângulos  $\alpha$  e  $\beta$  definidos na Fig.2.1 como azimute e mergulho, variam, criando novas situações de medidas e respostas no receptor. Sinha (1980) analisou os casos para os valores de  $\alpha_M = 0^\circ$  e  $\alpha_M = 180^\circ$ , supondo que o plano do transmissor coincide com o plano do terreno. Casos particulares tridimensionais serão analisados, considerando outros valores do azimute, além de  $0^\circ$  e  $180^\circ$ , e para mergulhos ( $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ ).

Para tanto, serão consideradas variações em torno de um sistema de transmissor-receptor perpendicular (PERP), e será analisada a resposta do campo horizontal ( $H_x$ ), para número de indução variando de 0 a 10 e definido como:

$$\theta = r(\sigma\mu\omega)^{1/2}$$

onde,  $\theta$  é o número de indução,  $r$  é o afastamento entre a bobina transmissora e receptora,  $\sigma$  é a condutividade do meio,  $\mu$  é a permeabilidade e  $\omega$  é a frequência angular.

A partir da forma geral do campo dado pela expressão (2.18) o componente horizontal  $H_x$  do campo magnético, pode ser obtido por:

$$H_x = [1 \ 0 \ 0] \underset{\sim}{T}^{-1} \underset{\sim}{W} \underset{\sim}{T} \underset{\sim}{M}. \quad (2.30)$$

definindo

$$\underset{\sim}{S}_x = [1 \ 0 \ 0] \underset{\sim}{T}^{-1}$$

e retomando a equação (2.11), tem-se que

$$\underset{\sim}{S}_x = [l_{x'} \ l_{y'} \ l_{z'}]$$

e, dessa forma,

$$H_x = S_{\tilde{x}} W T M_{\tilde{x}}. \quad (2.31)$$

Consequentemente,

$$H_y = S_{\tilde{y}} W T M_{\tilde{y}}, \quad (2.32)$$

$$H_z = S_{\tilde{z}} W T M_{\tilde{z}}, \quad (2.33)$$

onde,

$$S_{\tilde{y}} = [0 \ 1 \ 0] T_{\tilde{y}}^{-1}$$

$$S_{\tilde{z}} = [0 \ 0 \ 1] T_{\tilde{z}}^{-1}$$

### 2.3.1 Modelagem direta

As simulações mostradas a seguir abordam diferentes situações encontradas em terrenos acidentados. Devido a irregularidade do relevo, apenas três casos serão tratados: (1) as variações que ocorrem no eixo do dipolo transmissor, com o receptor ainda no plano horizontal ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ$ ), (2) o plano da bobina transmissora é horizontal, mas ocorrem variações na altitude do receptor ( $\alpha_M = 0^\circ$ ,  $\beta_M = 0^\circ$ ), (3) as bobinas transmissora e receptora estão em um mesmo plano inclinado ( $\alpha_M = \pi - \alpha$ ,  $\beta_M = \beta$ ). Será analisado em cada caso, o efeito causado sobre os componentes em fase e em quadratura da impedância mútua.

#### Caso 1

Erros podem ocorrer devido a um relevo localmente irregular onde a bobina transmissora se encontra construída, de tal modo que o plano dessa bobina, que segue o plano do terreno, não seja horizontal. Essa situação causará uma inclinação do dipolo transmissor no sentido do receptor, ou não, como ilustrado nos esquemas (a), (b), (c) da Fig. 2.2. O receptor nesse caso está no plano horizontal. O esquema (a) considera o dipolo inclinado no sentido do receptor, correspondendo ao valor de azimute  $\alpha_M = 0^\circ$ . No esquema (b), a inclinação do dipolo é no sentido contrário ao sentido do receptor, correspondendo a  $\alpha_M = 180^\circ$ . No esquema (c) o eixo do dipolo forma um ângulo de azimute  $\alpha_M = 90^\circ$ .

A Fig. 2.3 mostra o comportamento da parte real e imaginária da impedância mútua com o número de indução, para diferentes valores de  $\beta_M$ , ângulo formado pelo eixo do dipolo e a vertical

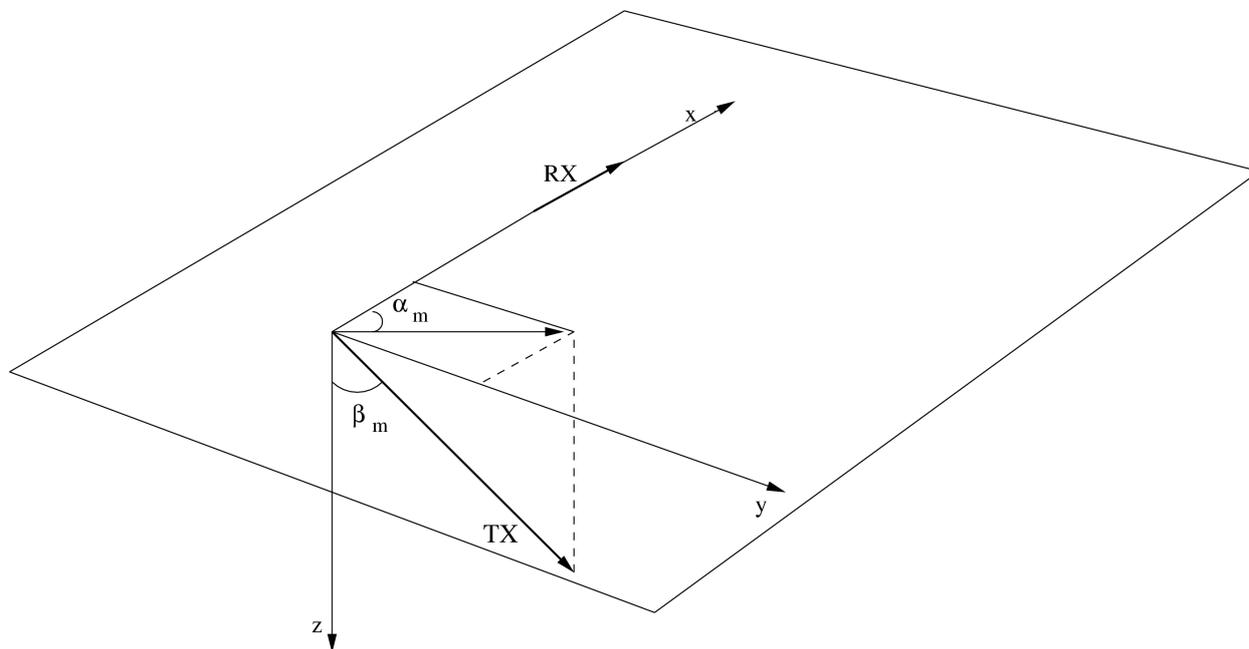


Figura 2.2: Dipolo transmissor inclinado

Para a parte real de  $(Z/Z_0)$ , observa-se que, para o caso de azimute  $\alpha_M = 0^\circ$ , seu valor aumenta com a variação da inclinação  $\beta_M$ , e pequenas variações de inclinação da ordem de  $5^\circ$  afetam muito pouco os resultados. Para o caso de azimute  $\alpha_M = 180^\circ$ , a parte real de  $(Z/Z_0)$  diminui com a variação de  $\beta_M$ . No caso de azimute  $\alpha_M = 90^\circ$ , pequenas variações da ordem de  $5^\circ$  não afetam os resultados e variações da ordem de  $90^\circ$  dão um resultado nulo, pois, nesse caso, o componente magnético do campo primário será perpendicular ao receptor, e então não será medido. Para qualquer azimute  $\alpha_M$ , observa-se a troca de sinal quando  $\beta_M = 180^\circ$ .

Para a parte imaginária de  $(Z/Z_0)$ , ocorre a mesma tendência como na parte real mas com menos magnitude. As pequenas variações da ordem de  $5^\circ$  de  $\beta_M$  produzem erros ainda menores. Para  $\alpha_M = 90^\circ$  repete-se a situação observada na parte real de  $(Z/Z_0)$ , pois, como o campo primário não é medido, ambas as partes real e imaginária são nulas.

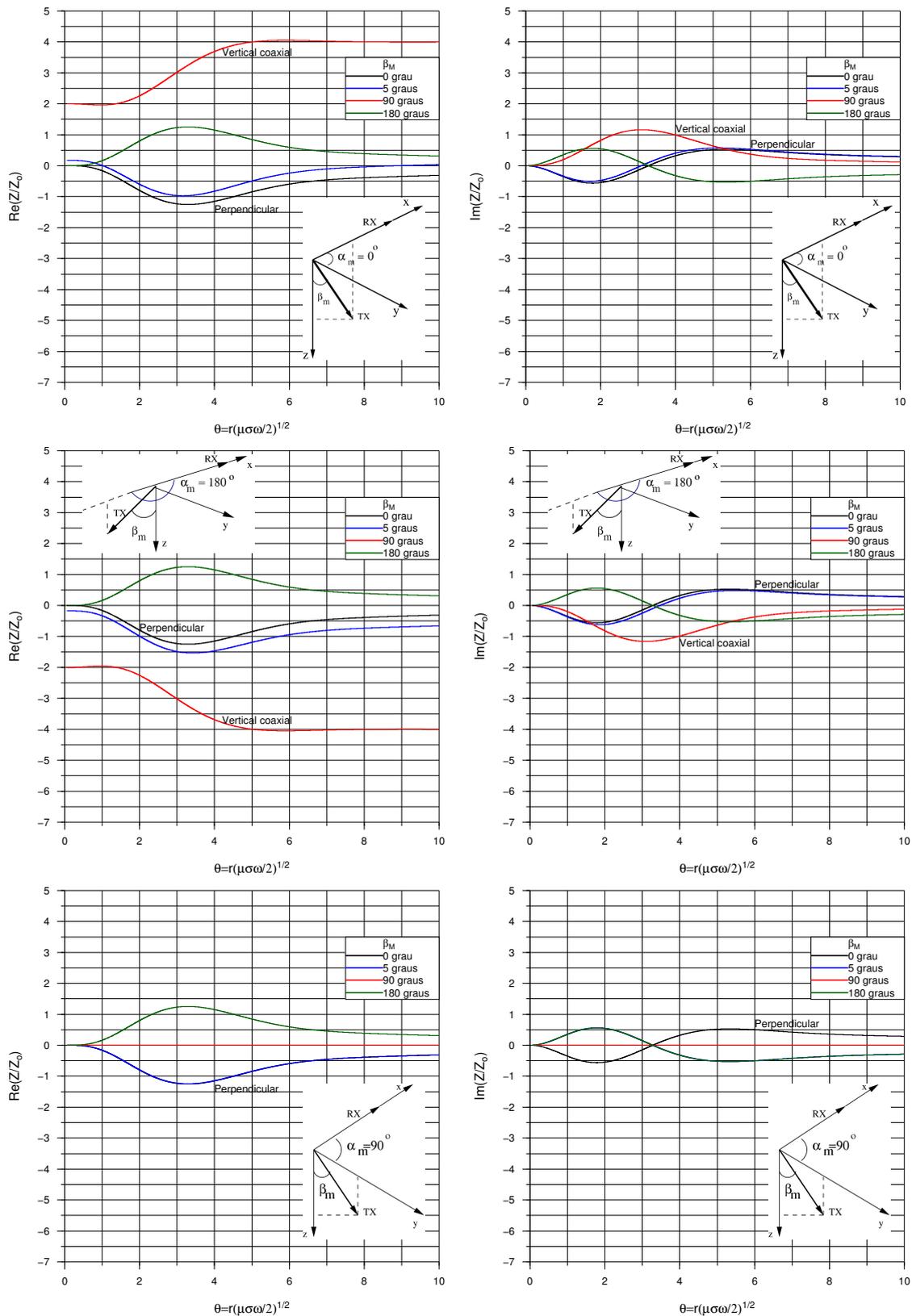


Figura 2.3: Efeito na impedância mútua da inclinação do dipolo transmissor

## Caso 2

Esse caso contempla a situação descrita na Fig. 2.4, na qual o transmissor se encontra em um plano horizontal e o receptor em uma altitude diferente. Pelo princípio da reciprocidade, os esquemas (a) e (b) produzem a mesma resposta. As figuras Fig. 2.5 e Fig. 2.6 mostram as partes real e imaginária de  $(Z/Z_0)$ .

Observa-se na Fig. 2.5, que, para os azimutes  $\alpha < 90^\circ$ , a parte real da razão  $(Z/Z_0)$  aumenta com o aumento do ângulo de mergulho da topografia. Porém, essa variação entre ângulos de mergulho se faz menor à medida em que os valores do azimute aproximam-se de  $90^\circ$ . Acima do azimute  $90^\circ$ , a razão diminui com o aumento do ângulo de mergulho, e variação com o ângulo de mergulho se faz maior à medida em que os valores do azimute se afastam de  $90^\circ$ . As maiores variações são observadas nos números de induções elevados ( $\theta > 3$ ). Observa-se também que todas as curvas convergem para o azimute  $90^\circ$ . Isso se explica pelo fato de que o eixo do dipolo transmissor se encontra ortogonal ao eixo da bobina receptora, e assim o campo primário gerado no transmissor não é captado pelo receptor.

A Fig. 2.6 mostra que, para azimutes  $\alpha < 90^\circ$ , as partes imaginárias de  $(Z/Z_0)$ , há convergência para todas as curvas de mergulho tanto em baixos números de indução ( $\theta \leq 2$ ) quanto em altos números de induções ( $\theta \geq 6$ ). Acima de  $90^\circ$  do valor do azimute, a convergência só ocorre em baixos números de indução ( $\theta \leq 2$ ). Para azimute igual a  $90^\circ$  observa-se o mesmo fenômeno explicado nos casos anteriores. Na faixa de número de indução  $1 \leq \theta \leq 6$  as variações se comportam como no caso da parte real, mas com menor magnitude de erro.

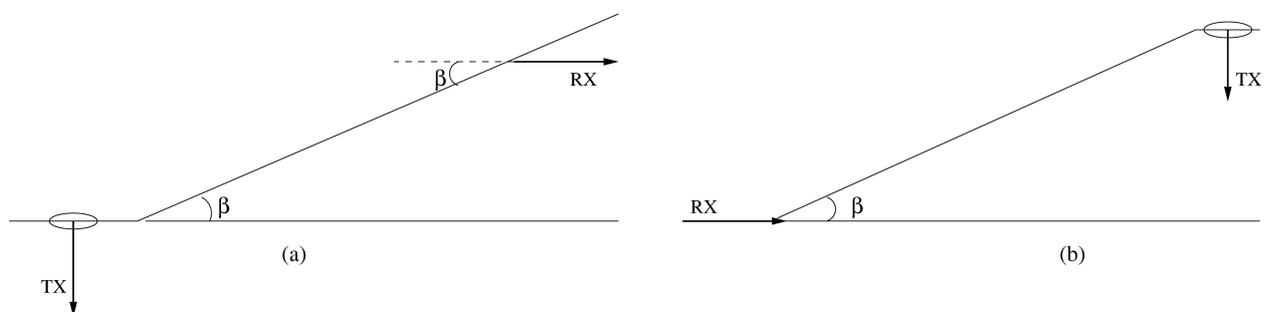


Figura 2.4: Dipolo transmissor e receptor a diferentes altitudes

### Caso 3

Mostrado na Fig. 2.7, a bobina transmissora é disposta sobre um plano uniformemente inclinado, tal que o eixo do dipolo seja normal ao plano topográfico. Assim, forma um ângulo  $\beta$  igual ao ângulo de inclinação ou mergulho do terreno. Embora essa situação não seja a mais frequente no campo, será analisada a magnitude de erro ocorrido nas partes real e imaginária da impedância mútua.

Na parte real de  $(Z/Z_0)$ , mostrada na Fig. 2.8, observa-se que as variações das curvas de mergulho, com respeito à curva do caso homogêneo, são bem menores, comparando aos casos analisados anteriormente. Porém, para azimute  $\alpha < 90^\circ$ , ocorrem variações decrescentes com o mergulho na faixa de números de induções  $\theta < 4$ , e uma convergência na faixa de altos números de indução. Para azimute  $\alpha > 90^\circ$ , as variações são crescentes com o mergulho, e para azimute igual  $90^\circ$  essas variações são nulas.

Na parte imaginária de  $(Z/Z_0)$ , mostrada na Fig. 2.9, observa-se poucas variações das curvas em relação ao caso homogêneo, para todos os valores de azimute, e uma convergência perfeita para azimute  $90^\circ$ .

Conclui-se, então, a partir desses 3 casos analisados que:

1. Pequenas variações de inclinação do dipolo transmissor, da ordem de  $5$  a  $10^\circ$  produzem erros de pequena magnitude e, portanto, não afetam os resultados obtidos. Entretanto, as posições da bobina devem ser escolhidas de modo a se evitar grandes perturbações no eixo do dipolo.
2. A diferença de altitude, entre um dipolo transmissor vertical e o receptor horizontal, causa maiores erros na parte real da impedância mútua, e a interpretação dos dados nessa condição deve ser, então, muito cuidadosa. Nas aquisições de campo realizadas em Araçás, cuidados foram tomados no planejamento e na construção da bobina transmissora para se evitar topografias que podem deslocar o dipolo da vertical. A situação aqui representada é a mais comum de ocorrer e, deve-se pesquisar uma solução para amenizar os desvios devidos ao efeito topográfico,
3. Quando a bobina é instalada sobre um plano uniformemente inclinado, se produz

poucos desvios nos valores dos campos medidos.

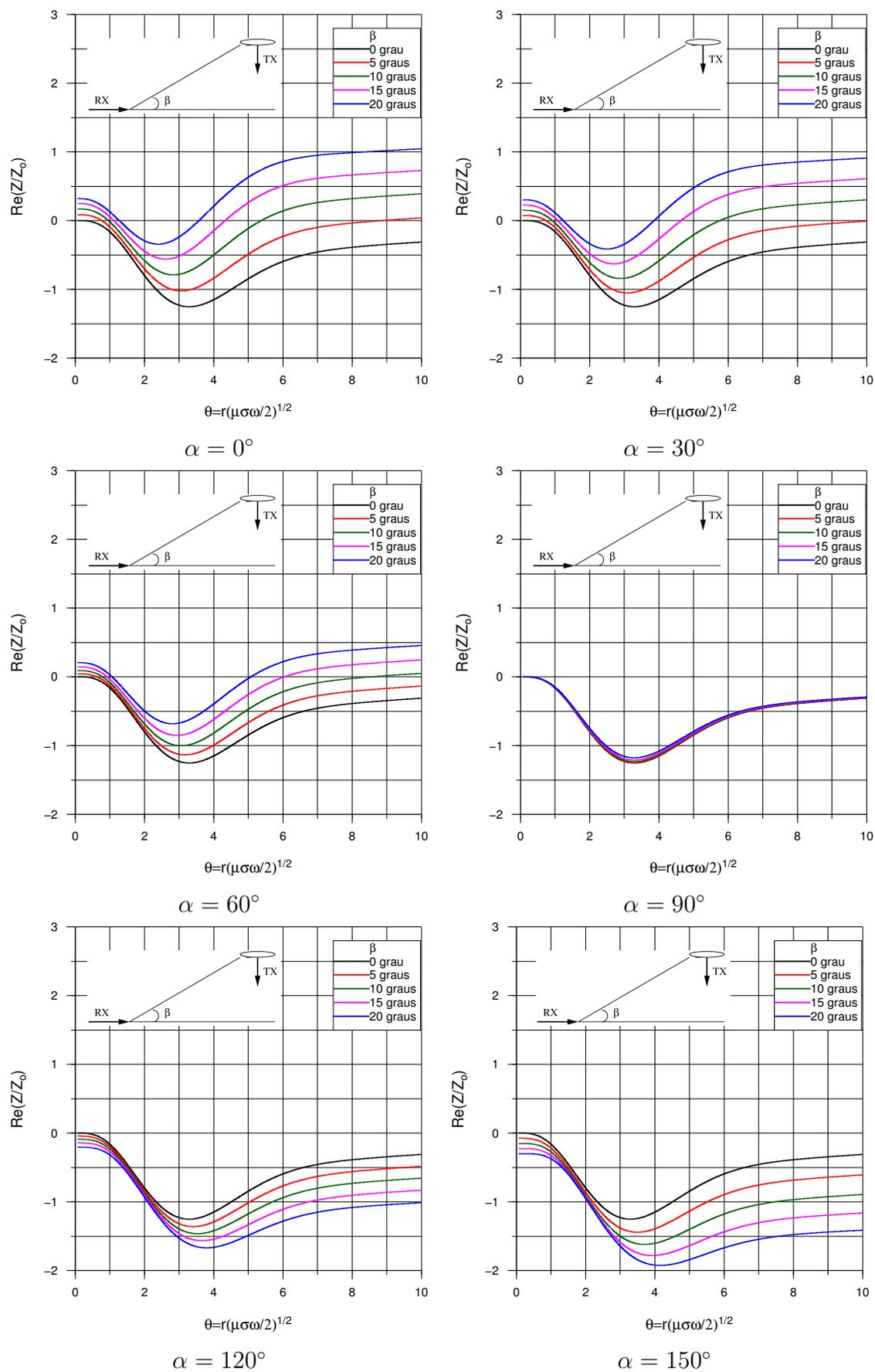


Figura 2.5: Efeito na impedancia mútua da diferença de altitude entre o transmissor e receptor (parte real)

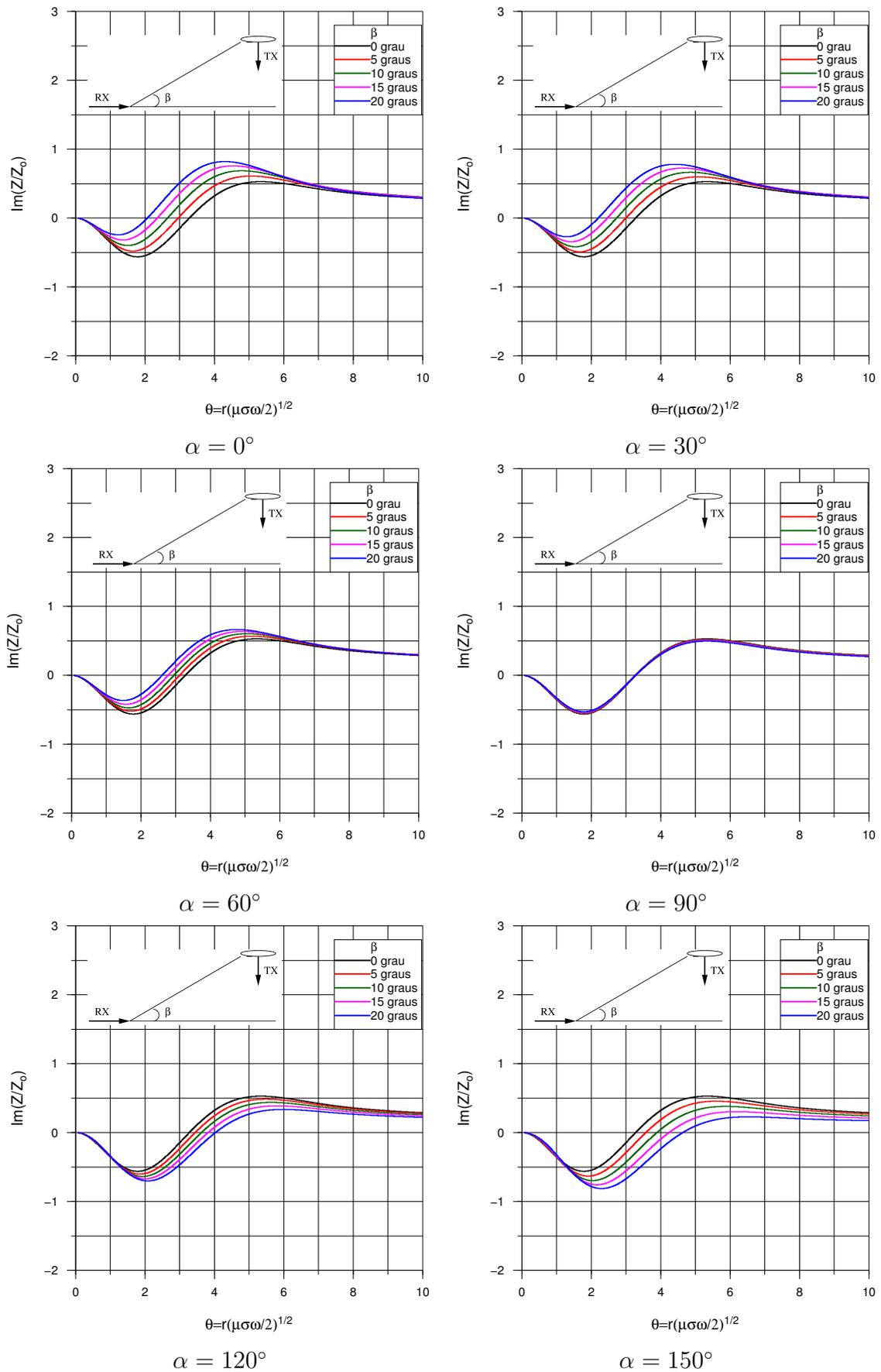


Figura 2.6: Efeito na impedancia mútua da diferença de altitude entre o transmissor e receptor (parte imaginária)

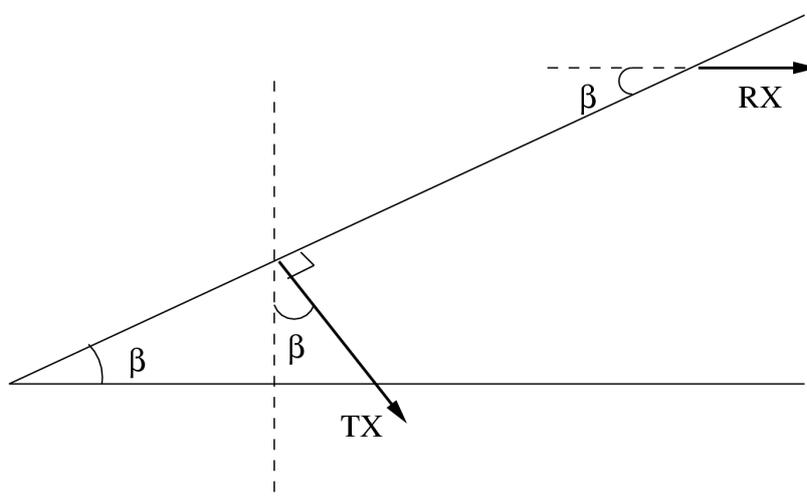


Figura 2.7: Dipolo transmissor normal ao plano inclinado

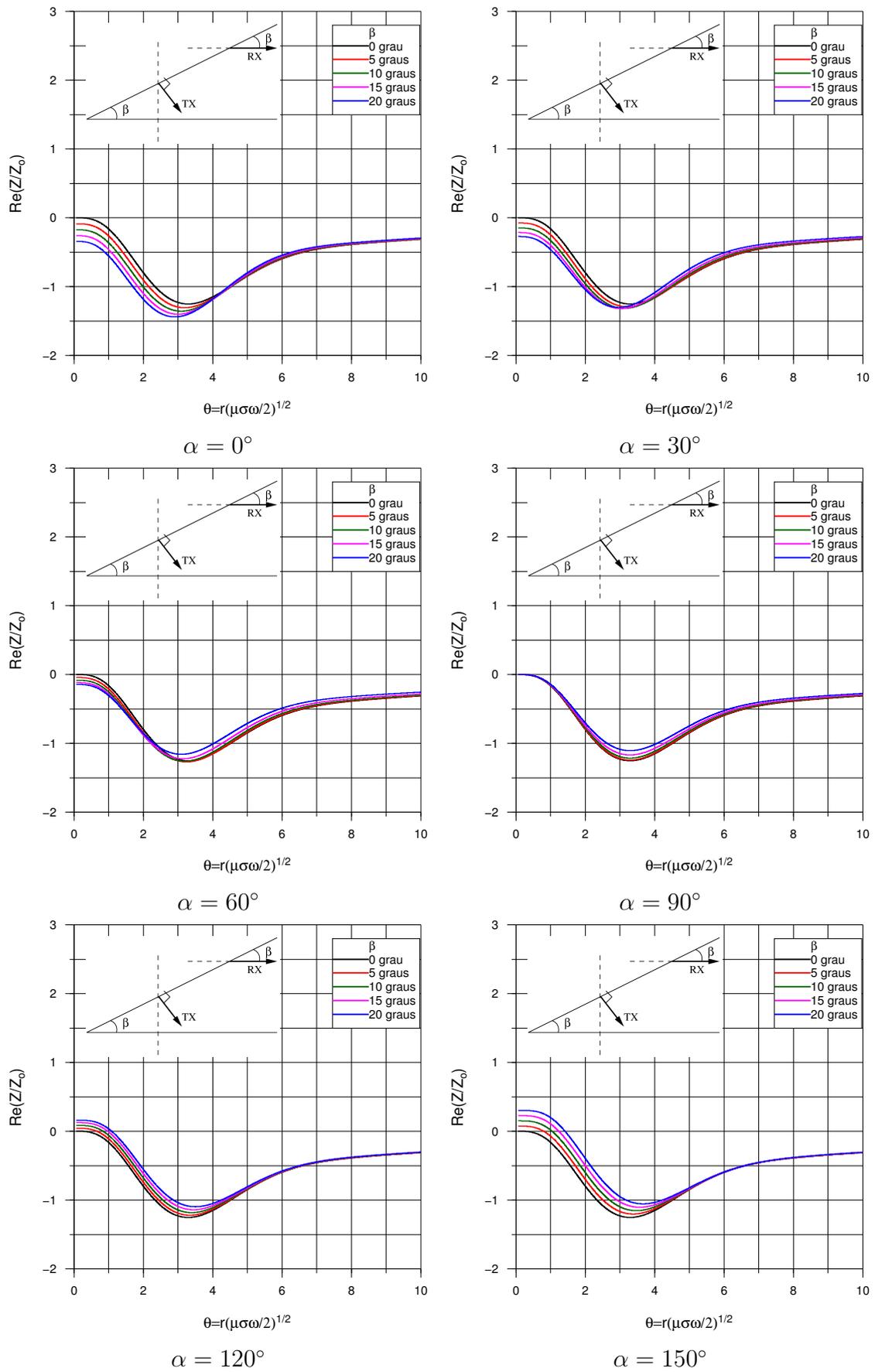


Figura 2.8: Efeito na impedancia mútua do dipolo normal ao plano inclinado (parte real)

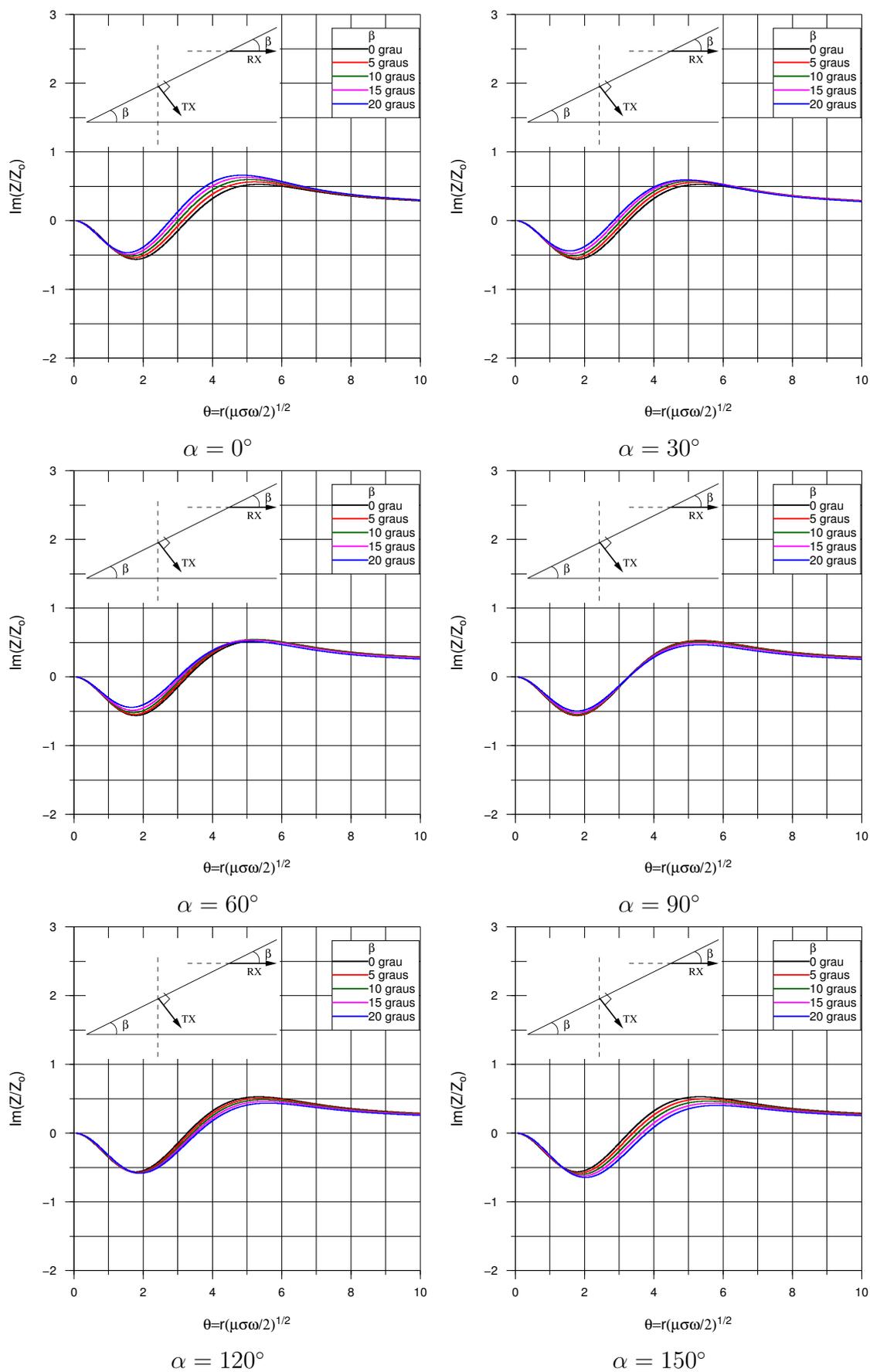


Figura 2.9: Efeito na impedancia mútua do dipolo normal ao plano inclinado (parte imaginária)

# 3

## Aplicação no caso do estudo no campo de Araçás

### 3.1 Aspectos geológicos, geofísicos e econômicos

Este capítulo objetiva contextualizar a área de estudo no campo de Araçás-Bahia, com base em resultados e conclusões encontradas na literatura. objetiva também avaliar a qualidade de informação eletromagnética obtida com o sistema EM de quinta geração cedido por empréstimo do LENEP/UENF ao CPGG/UFBA.

#### 3.1.1 Localização e economia

O município de Araçás localiza-se na porção leste do estado da Bahia, entre os municípios de Pojuca, Catu, Alagoinhas, Itanagra e Entre Rios, a cerca de 102 km de Salvador. Seu principal acesso, partindo da capital, é através da BR-324, seguindo depois pela BA-093.

Com uma área de aproximadamente 491,9 km<sup>2</sup> e uma população de 12.108 habitantes, possui uma densidade demográfica de 29,8 hab/km (IBGE, 2008). Cerca de 51% da população habita a zona rural, e a agricultura predomina a atividade econômica, com destaque para o plantio de abacate. A indústria petrolífera tem participação significativa na economia local, gerando empregos diretos e indiretos e contribuindo com 6,52% da receita municipal

através do pagamento de “royalties” (Reis et al., 2005).

Localizada numa região de clima sub-úmido a megatérmico, Araçás apresenta temperaturas variando entre 21 e 26°C e vegetação predominante de floresta estacional semidecidual, típica do bioma mata atlântica, e floresta ombrófila densa (Brandão, 2008). A zona urbana é atravessada pelo rio Quiricó.

### 3.1.2 Aspectos Geológicos

A Bacia do Recôncavo encontra-se no estado da Bahia, nordeste do Brasil. Com uma área aproximada de 11.500 km<sup>2</sup>, é limitada a norte e noroeste pelo Alto de Aporá, a sul pelo sistema de falhas da Barra, a oeste pela falha de Maragogipe e a leste pelo sistema de falhas de Salvador, conforme a Fig. 3.1



Figura 3.1: Limites da Bacia do Recôncavo, (Aragão, 2004)

O campo de Araçás é um antiformal de cotas altimétricas abaixo de 200 m e situa-se nessa bacia, compreendida como parte de um segmento tipo aulacógeno, cuja origem está associada ao processo de estiramento crustal que resultou na fragmentação do supercontinente

Gondwana e na abertura do oceano Atlântico.

A seção geológica da Fig. 3.2 ilustra a arquitetura básica da bacia: um meio-gráben com orientação NE-SW, falha de borda a leste e eventual rejeito superior a 6000 m (Aragão, 2004). Seu arcabouço estrutural é formado principalmente por falhamentos normais planares, com direção preferencial N30E e mergulho regional das camadas para SE, em direção as áreas mais subsidentes. Zonas de transferência com orientação N40W foram formadas em resposta as taxas de extensão diferenciadas ao longo da bacia, a exemplo das falhas de Mata-Catu e Itauagra-Araçás (Milhomen et al., 2003). A bacia possui uma espessura de seção sedimentar

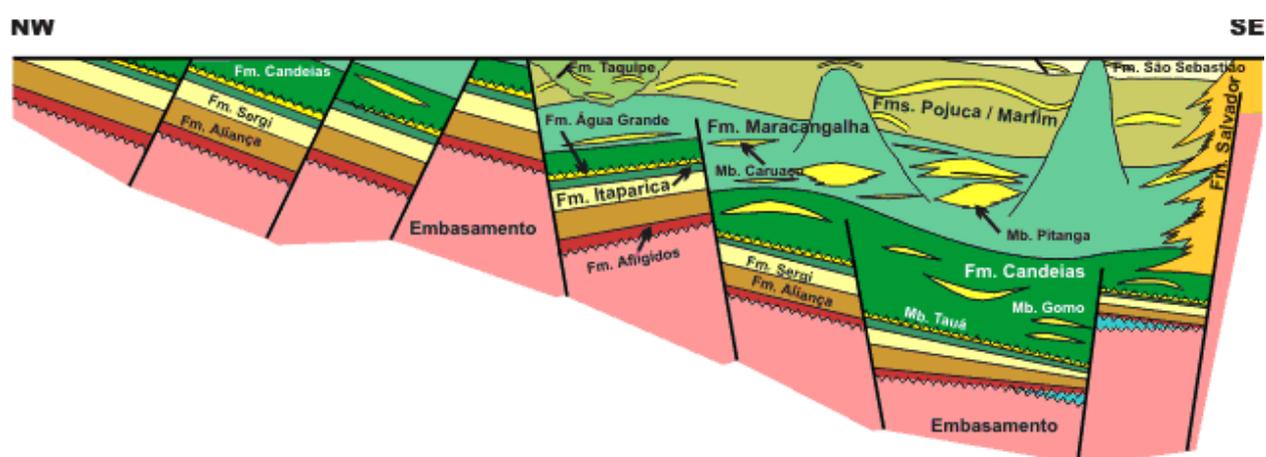


Figura 3.2: Seção geológica da Bacia do Recôncavo, (Aragão, 2004)

de cerca de 6.900 m, principalmente relacionada a depósitos acumulados durante as fases rifte, sin-rifte e pós-rifte de sua abertura.

A fase pré-rifte é caracterizada por intercalações de ciclos flúvio-eólicos, representados pelo Membro Boipeba da Formação Aliança e Formações Sergi e Água Grande, com sistemas lacustres transgressivos, representados pelo Membro Capianga da Formação Aliança e Formação Itaparica (Milhomen et al., 2003).

Na fase rifte, sob clima mais úmido, ocorreu a deposição de folhelhos, calcilutitos e arenitos turbidíticos do Membro Gomo da Formação Candeias. A ressedimentação de fácies deltáicas da Formação Marfim relaciona-se aos depósitos vinculados a fluxos gravitacionais que caracterizam os membros Caruaçu e Pitanga da Formação Maracangalha. O Membro Pitanga é representado por espessos pacotes de arenitos maciços, com feições de clastos de

folhelhos e expressiva variação lateral (Raja, 1991).

Na fase pós-rifte, depositaram-se os arenitos, folhelhos e calcáreos da Formação Marizal (Aragão, 2004). Sedimentos terciários ocorrem de forma subordinada na bacia, sendo representados pelas fácies de leques aluviais que caracterizam o Grupo Barreiras e por folhelhos e calcáreos da Formação Sabiá (Milhomen et al., 2003).

### 3.1.3 Sistemas Aquíferos

Graças a composição predominantemente arenosa e espessura de até 3000 m, a Formação São Sebastião constitui um excelente sistema aquífero na Bacia do Recôncavo. A espessura de água doce presente nas areias dessa formação chega até 1000 m (Cetrel, 2000; Lima, 1999). Poços profundos, perfurados pela PETROBRAS, indicam que a salinidade desse aquífero, em geral, varia segundo a profundidade e localização do poço, sendo encontrados indícios de águas salobras a partir de 400 m (Nascimento et al., 2008).

Seu sistema hidrológico é complexo, contendo várias camadas permeáveis separadas por camadas ou lentes de material mais fino como folhelhos, gerando efeitos de confinamento localizados. As principais fontes de recarga são as precipitações pluviais diretas sobre as zonas de afloramento desta formação e as exudações das unidades aquíferas sobrepostas, principalmente da unidade aquífera Marizal (Nascimento et al., 2008).

A Formação Marizal também apresenta possibilidades aquíferas significativas, principalmente devido a sua sequência conglomerática basal. Sua espessura inferior a 50 m, indica potencialidade como reservatório inferior a Formação São Sebastião (Lima, 1999). A alimentação desta unidade se faz diretamente por precipitação pluvial e por exudações provenientes da Formação Barreiras. Juntas essas formações formam o sistema aquífero Barreiras-Marizal-São Sebastião, sendo este dividido em dois componentes: um componente livre ou freático - formado pela cobertura da Formação Marizal, eventualmente com sedimentos Barreiras sobrepostos e pela parte superior da Formação São Sebastião - e um componente semi-confinado ou artesianos, representado pelos pacotes de arenitos contidos totalmente na Formação São Sebastião (Lima, 1999).

### 3.1.4 Sistemas Petrolíferos

A Bacia do Recôncavo reúne formações geológicas com características de rocha geradora, rocha reservatório e rocha selante, e um conjunto de trapas estruturais e estratigráficas, formando sistemas petrolíferos que vêm sendo explorados desde 1937. Seus principais reservatórios são de natureza siliciclástica e envolvem fácies fluvio-eólicas, deltáicas ou vinculadas a fluxos gravitacionais. As maiores acumulações desta bacia encontram-se nas formações Sergi e Água Grande. As rochas geradoras, em geral, concentram-se nos membros Gomo e Tauá da Formação Candeias. O óleo migra através de planos de falha ou por contato direto gerador-reservatório, em sua maioria, estabelecido por falhas de natureza normal ou listrica. Folhelhos sobrepostos/intercalados funcionam como rocha selante (Milhomen et al., 2003)

Além dos principais reservatórios, na bacia do Recôncavo são encontradas rochas reservatórios também nas formações Aliança (Membro Boipeba), Afligidos (Membro Pedrão) e Itaparica. Numa visão geral, são encontrados nessa bacia 86 campos de óleo e gás.

A partir de um estudo estratigráfico-estrutural elaborado por geólogos e geofísicos da PETROBRAS, usando dados de perfis geofísicos de todos os poços do campo, foi construído o mapa de contornos estruturais dos marcos elétricos apresentado na Fig. 3.3. Esse mapa define claramente uma estrutura antiformal ou em domo, seccionada e controladas por falhamentos gravitacionais não mostrados no mapa. As zonas apicais dessa dobra situa-se aproximadamente entre 250 m e 500 m de profundidade. A principal estrutura, e denominada de antiforme de Araçás. Nos intervalos arenosos acima, abaixo e entre dois marcos elétricos F e B, é possível o acúmulo de hidrocarbonetos migrados através de falhas, dos reservatórios e eventuais geradoras da seqüência inferior do preenchimento da bacia. Essa é a principal motivação para a escolha do campo de Araçás como área experimental do projeto. Diante dessa possibilidade, então, buscou-se estudar a sensibilidade dos métodos eletromagnéticos e elétricos a presença de arenitos contendo óleo em meio arenitos saturados em água doce. Esses estudos basearam-se em dados eletromagnéticos e geoeletricos obtidos, de perfilagem de poços de exploração de água e de petróleo na região.

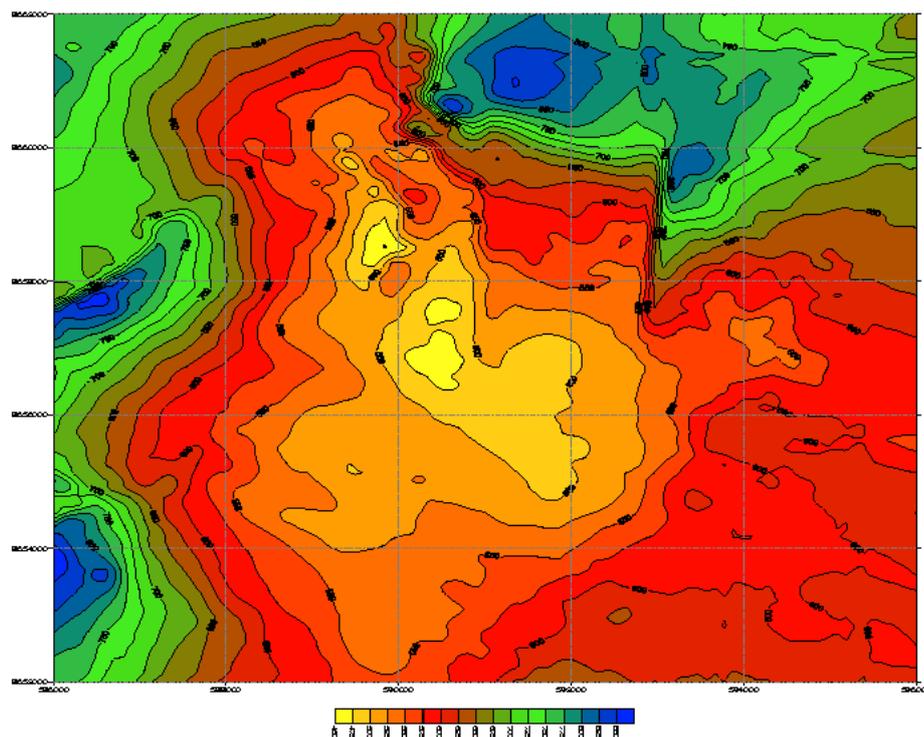


Figura 3.3: Mapa de resistividade aparente no campo de Araçás, (Lima,2009)

## 3.2 Equipamentos e procedimentos de campo

### 3.2.1 Equipamentos

A investigação de campo foi realizada utilizando dois métodos geofísicos: (i) Método de eletroresistividade com sondagem elétrica vertical (SEV). (ii) Método eletromagnético no domínio da frequência.

Os equipamentos utilizados nas aquisições dos dados geoeletricos no campo de Araçás foram os sistemas SYSCAL R-2 e SYSCAL-PRO, fabricados pela Iris Instruments, de propriedade do CPGG/UFBA. Esses sistemas são alimentados por baterias comuns de 12 V, acopladas a conversores de voltagem DC-DC. Operam com correntes de baixa frequência, medindo simultaneamente a resistividade e a polarizabilidade aparentes do subsolo. As tensões máximas de saída desses sistemas podem atingir respectivamente 800 V e 1.000 V, sob potência de 250 W. Como eletrodos de corrente, até o espaçamento de 150 m, foram usadas hastes metálicas de aço inoxidável e ligadas ao equipamento por cabos condutores isolados

de baixa resistência. A partir do espaçamento de 200 m, foram usados eletrodos formados por placas retangulares de alumínio de 0,5 m x 1 m, em arranjos de 1, 2 e 4 placas por fonte, para reduzir efetivamente a resistência de contato com o terreno. Além disso, para reduzir ainda mais essas resistências de contatos, os buracos de cravamento das hastes ou das placas foram sempre molhados com uma lama de argila e água bastante salgada. Para se obter estabilidade das medidas do parâmetro de polarização induzida foram utilizados, como eletrodos de potencial, potes porosos enterrados contendo soluções saturadas de sulfato de cobre em contato com eletrodos de cobre

Na campanha eletromagnética, foi utilizado um sistema composto por um transmissor T-3, e um receptor V-6, fabricados pela Phoenix. O T-3 é auxiliado por duas caixas de resistores e um receptor de antena de GPS (Global Positioning System). Um gerador de 5 kVA foi utilizado para alimentar o T-3, e uma bateria de 12 V para o receptor de GPS. O T-3 funciona no domínio da frequência (FD) emitindo sinais monocromático cuja frequência varia em passos pre-definidos ao longo de 54 frequências. O sinal na forma de uma corrente elétrica energiza uma bobina quadrada de 400 m de lado.

A unidade V-6, é conectada a um computador e às bobinas receptoras. Ela é também auxiliada por um receptor de sinal de GPS e alimentado com uma bateria de 12 V. As antenas de GPS cadenciam o funcionamento do transmissor e do receptor, tendo por base o tempo universal (UTC). Em ciclos sucessivos de 4 minutos, ocorre a transmissão sequenciada dos sinais nas 54 frequências, começando pela mais alta até a mais baixa frequência. O operador determina o número de repetições desse ciclos de 4 minutos afim do empilhamento. É fácil verificar *in loco*, acompanhando-se o piscar dos sinalizadores do transmissor, que as frequências mais baixas, obviamente demandam um tempo maior para serem transmitidas. A Fig. 3.4 mostra os arranjos do transmissor e receptor.

### 3.2.2 Procedimento do campo

Para o levantamento elétrico, foi utilizado o arranjo Schlumberger com  $AB/2$  variando de 10 a 2000 m.

Para aquisição dos dados eletromagnéticos, identificou-se três posições de espira trans-

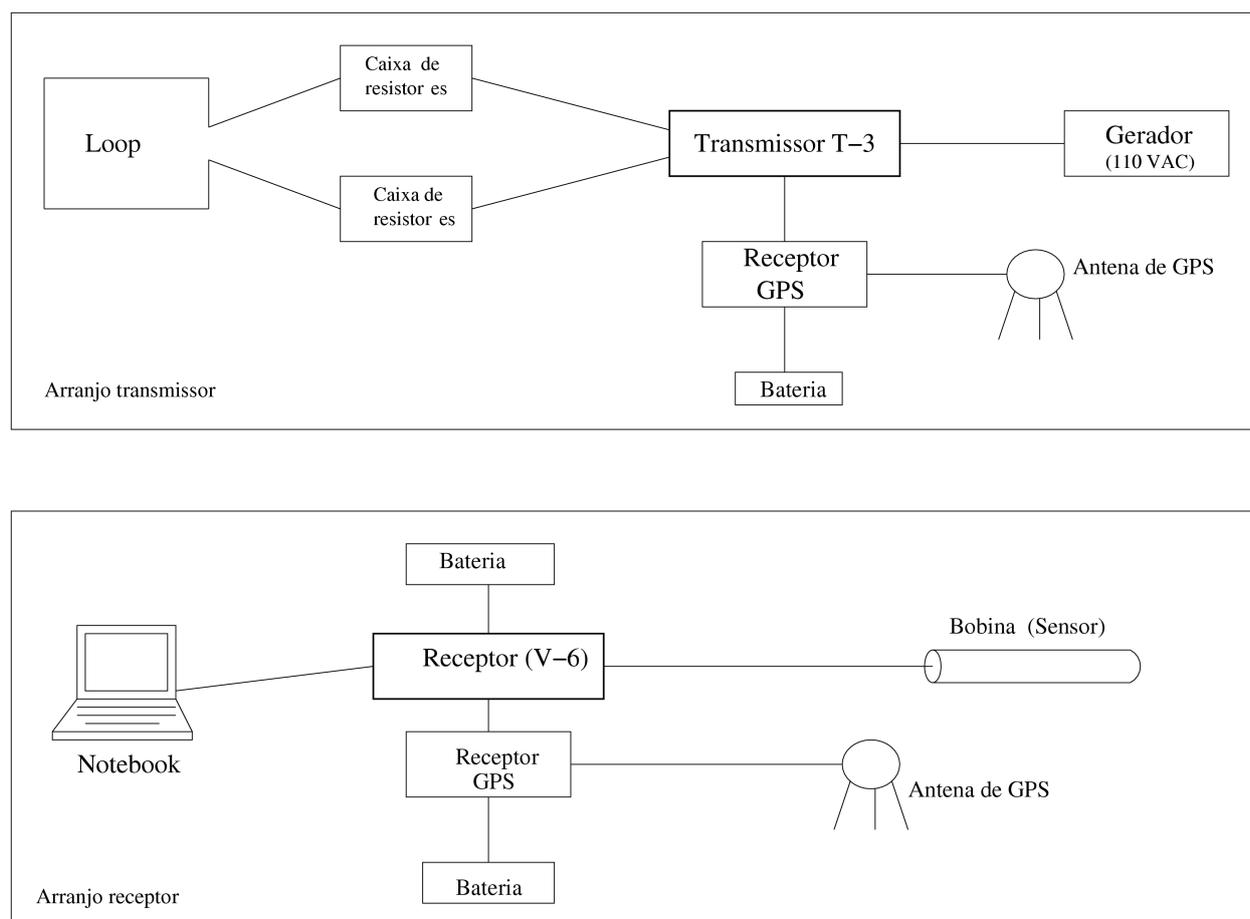


Figura 3.4: Equipamento EM de Phoenix: Transmissor T3 e receptor V6

missora denominadas  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , com o intuito de se cobrir toda a área de interesse. Com a posição do transmissor referida como  $T_1$ , localizada no extremo SE da área, foram executadas cinco linhas radiais centradas na espira e separadas entre si por ângulos de  $15^\circ$ . As primeiras e últimas estações receptoras de cada linha distam, respectivamente, 500 m e 3.000 m do centro da espira, cobrindo uma extensão útil de perfil de 2,5 km. O intervalo de profundidade de exploração nessas seções se estende de cerca de 200 m, na zona mais próxima do transmissor, até 1200 m no final das linhas.

Para a posição  $T_2$ , localizada na parte centro-leste da estrutura, se fez medições EM em seis linhas de mesma extensão e separações angulares de  $15^\circ$ , definidas para estudar o comportamento elétrico ao longo dos flancos nordeste e norte da estrutura antiformal.

Com a posição  $T_3$ , localizada no topo de um tabuleiro da Formação Marizal, foram realizadas quatro seções ortogonais com o objetivo de recobrir e realçar a estrutura geológica

e adensar a aquisição de dados para uma representação em mapa das funções resistividade e polarizabilidade aparentes. No campo, cuidados foram tomados para evitar os ruídos culturais: linha de transmissão de alta tensão, indústrias, pistas de automóvel, áreas de concentração humana. Durante as tempestades o trabalho foi interrompido para se evitar a dispersão dos resultados (Wambo, 2007).

Três bobinas receptoras foram conectadas simultaneamente ao V-6, todas instaladas horizontalmente na superfície do terreno e apontadas para o centro do transmissor mediante uma bússola.

### 3.2.3 Análise do efeito topográfico nos dados experimentais eletromagnéticos

As tabelas 3.1, 3.2, e 3.3 mostram as coordenadas e as cotas dos vértices das bobinas transmissoras quadradas de 400 m de lado, e os ângulos de seus azimutes e mergulhos.

Vertice	Latitude (m)	Longitude(m)	Cota (m)	Ângulo do mergulho médio	Azimute
A	590770	8656450	160	2,57°	N77°E
B	590770	8656050	159		
C	591170	8656 450	158		
D	591170	8656050	158		
Datum: WGS84					

Tabela 3.1: Parâmetros geográficos e geometria da bobina  $T_1$

Vertice	Latitude (m)	Longitude (m)	Cota (m)	Ângulo do mergulho médio	Azimute
A	592449	8657271	97,5	4°	N82°E
B	592625	8657629	100		
C	592270	8657718	91,6		
D	592091	8657450	118,8		
Datum: WGS84					

Tabela 3.2: Parâmetros geográficos e geometria da bobina  $T_2$

Observa-se que os ângulos de mergulho das bobinas transmissoras, nessa investigação, são baixos e os azimutes respectivos menores do que 90°. Assim, considerando os resultados obtidos no capítulo anterior (Fig. 2.3), os erros são desprezíveis. Esses baixos erros explicam-se pelo fato do campo de Araçás ter um relevo moderado com menos de 200m de diferença

Vertice	Latitude	Longitude	Cota	Ângulo do mergulho médio	Azimute
A	593523	8654693	99	mergulho nulo	não se aplica
B	593423	8654306	99		
C	593136	8654793	99		
D	593036	865440	97,8		
Datum: WGS84					

Tabela 3.3: Parâmetros geográficos e geometria da bobina  $T_3$ 

entre cotas altimétricas. Pode-se considerar então, que o planejamento do posicionamento das bobinas transmissoras nessa investigação foi bastante satisfatório.

As Fig. 3.5 e Fig. 3.6 mostram a representação dos componentes em fase e em quadratura da razão das impedâncias mútuas, referente a estações receptoras selecionadas dos dados adquiridos com os transmissores  $T1$  e  $T3$  no campo de Araçás. As diferenças de altitudes entre o transmissor  $T1$  e as estações de recepção varia em média, de apenas 10 m, correspondendo a uma inclinação de 2% para as distâncias menores ( $r=600$  m), e 0,4% para distâncias maiores ( $r=3000$  m). A diferença de altitude entre o transmissor  $T3$  e o receptor para uma distância  $r=900$  m é 83 m ou seja 9% de inclinação. Pode-se verificar nos gráficos da Fig. 3.5, valores incoerentes da impedância mútua, nas frequências de 60, 120, 240 e 480 Hz. Trata-se da frequência de rede de distribuição de energia e seus harmônicos, devido a rede elétrica de alta tensão. Os gráficos (e) e (f) mostram outros ruídos, além do causado pela rede de energia elétrica, apesar de se estar a uma distância em relação a bobina transmissora  $T_3$ , em que a razão sinal/ruído é boa. Esses ruídos adicionais se devem a uma diferença de altitude muito grande (83 m), ou seja, manifesta-se nesse caso, o efeito da topografia. Nas distâncias entre 1700 e 2000 m do transmissor, é possível ainda se observar uma coerência nas curvas de dados (Fig. 3.6). Acima dessa distância o sinal é menos distinguível (Fig. 3.6); e o efeito topográfico tende a desaparecer quando se aumenta a separação transmissor-receptor, mas a razão sinal/ruído diminui, afetando os dados, sobretudo, nas baixas frequências. Então, conclui-se que:

1. Os dados adquiridos no campo de Araçás são sujeitos a vários ruídos, entre outros, ruídos culturais (60 Hz), pois os levantamentos foram realizados em um área com apreciável densidade de atividade humana, moradias, fazendas, instalações da Petrobras, e

rede elétrica de alta tensão.

2. O efeito topográfico se manifesta nos dados eletromagnéticos para distâncias menores, com grandes diferenças de altitude. Porém, quando essa distância aumenta (maior que 2000 m), o efeito topográfico desaparece mas o sinal/ruído diminui bastante, afetando a qualidade dos dados adquiridos.
3. Acima de 2000 m de separação transmissor-receptor não é possível distinguir o sinal, então a distância máxima com o equipamento T3 nas condições do relevo de Araçás, não deveria passar de 2 km.

Os ruídos causados pela rede de energia elétrica (60 Hz e harmônicos) são eliminados, interpolando-se os valores da impedância relativos a essas frequências. Para corrigir os desvios devido ao efeito topográfico no campo de Araçás, é preciso se basear em um modelo geológico inicial de multicamadas, como referência para a modelagem. Para se encontrar tal modelo, os dados geofísicos de poço e de sondagem elétricas são analisados e interpretados.

### **3.2.4 Processamento e interpretação de dados elétricos e da perfuração**

#### **Interpretação do perfil do poço**

Os perfis AR-84 e AR-85 na Fig. 3.7 são perfis de poços de exploração da água cedidos pela PETROBRAS. Mostra-se o perfil SP à esquerda e o perfil elétrico à direita, para uma profundidade variando de 25 a 400 m dentro da Formação São Sebastião. O perfil SP mede a diferença de potencial entre a lama e a formação geológica, e tem como parâmetros a presença de sais e a permeabilidade. Assim, os folhelhos apresentam baixo potencial SP e os arenitos, alto potencial SP. O perfil elétrico mapeia a resistividade das camadas. Assim, observa-se através do perfil SP, uma sucessão de pacotes de arenitos e folhelhos o que se traduz no perfil elétrico por resistividades variando de 2 a 200 ohm.m. Lima (2009), na interpretação litológico-estrutural desses pacotes do campo de Araçás, identificou cinco principais eletrofácies delimitadas por marcos elétricos: (i) a superior, de constituição predominantemente arenosa, possui resistividades ILD variando de 30 ohm.m a mais de 100 ohm.m;

(ii) a segunda, é definida por uma sequência predominantemente mais condutora e contém, em sua base o marco elétrico N e no topo o marco P. Compõe-se de duas espessas camadas de folhelhos intercaladas com siltitos e arenitos de granulação mais fina, característicos de deposições lacustres contendo transições para areias de frentes deltáicas; (iii) a terceira tem constituição predominantemente arenosa e resistiva, com arenitos mostrando granodecrescência e aumento de argilosidade ascendentes, típicas de barras longitudinais e de pontais; (iv) a quarta é uma repetição menos expressiva da segunda eletrofacies, também de característica elétrica mais condutora. Ela contém o marco elétrico M; (v) finalmente, a quinta eletrofacies é representada por uma sucessão de espessas camadas arenosas resultantes da superposição vertical de sucessivos canais e barras longitudinais ou de pontais separadas por depósitos de planície deltáica ou de inundação, na qual se inclui o marco F.

### **Interpretação de dados de sondagem elétrica vertical**

Uma primeira inversão automática unidimensional foi feita, usando o software RES1D da Geotomo Softwares, visando compor modelos estruturais iniciais a serem submetidos à inversão definitiva. Os perfis das sondagens elétricas verticais são apresentados nas Fig. 3.8 e Fig. 3.9. Eles representam as sondagens Se-33, Se-31, Se-18, e Se-9, obtidos ao longo de uma mesma linha de levantamento, com centros equidistantes em média de 300 m. Observa-se um mesmo comportamento em todos os perfis, de forma que é possível identificar um modelo de 5 principais camadas. Uma primeira camada resistiva, de espessura variando de 2 m na sua parte fina, a 15 m na parte mais espessa com resistividades variando de 10 ohm.m. a 60 ohm.m. Essa camada corresponde aos arenitos da formação Marizal, parcialmente saturada com água de baixa salinidade (Lima, 2009). Logo a seguir, uma camada de baixa resistividade (2 a 5 ohm.m) e 25 m de espessura, correspondendo a um pacote argiloso contendo o marco P identificado no perfil de poço. A camada seguinte, de resistividade média de 15 a 20 ohm.m, indica a existência de um pacote de arenito cuja espessura varia de 25 m (Se-33) a 70 m (Se-31). A quarta camada é constituída da repetição da camada argilosa com uma variação de 4 a 15 ohm.m de resistividade e espessuras variando de 35 m (Se-33) a 130 m (Se-31). A última camada apresenta um pacote de arenito de resistividade média de 30 a 700 ohm.m (Se-18).

Concluindo, sugere-se o modelo geológico da Fig. 3.10 como modelo inicial para a modelagem teórica eletromagnética de multicamadas.

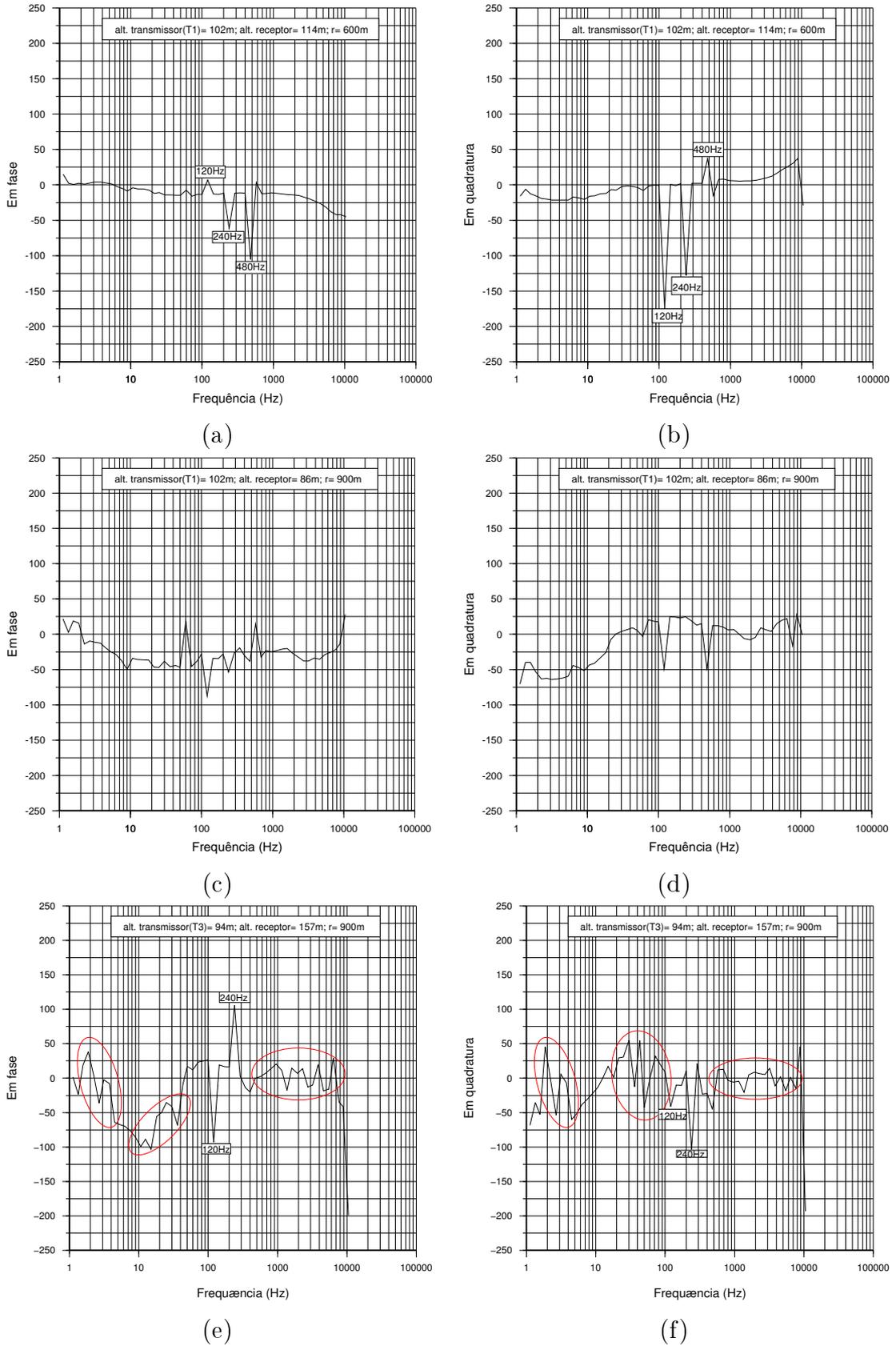


Figura 3.5: Resposta EM, arranjo PERP, campo de Araçás, para distancia TX-RX de 600m e 900m

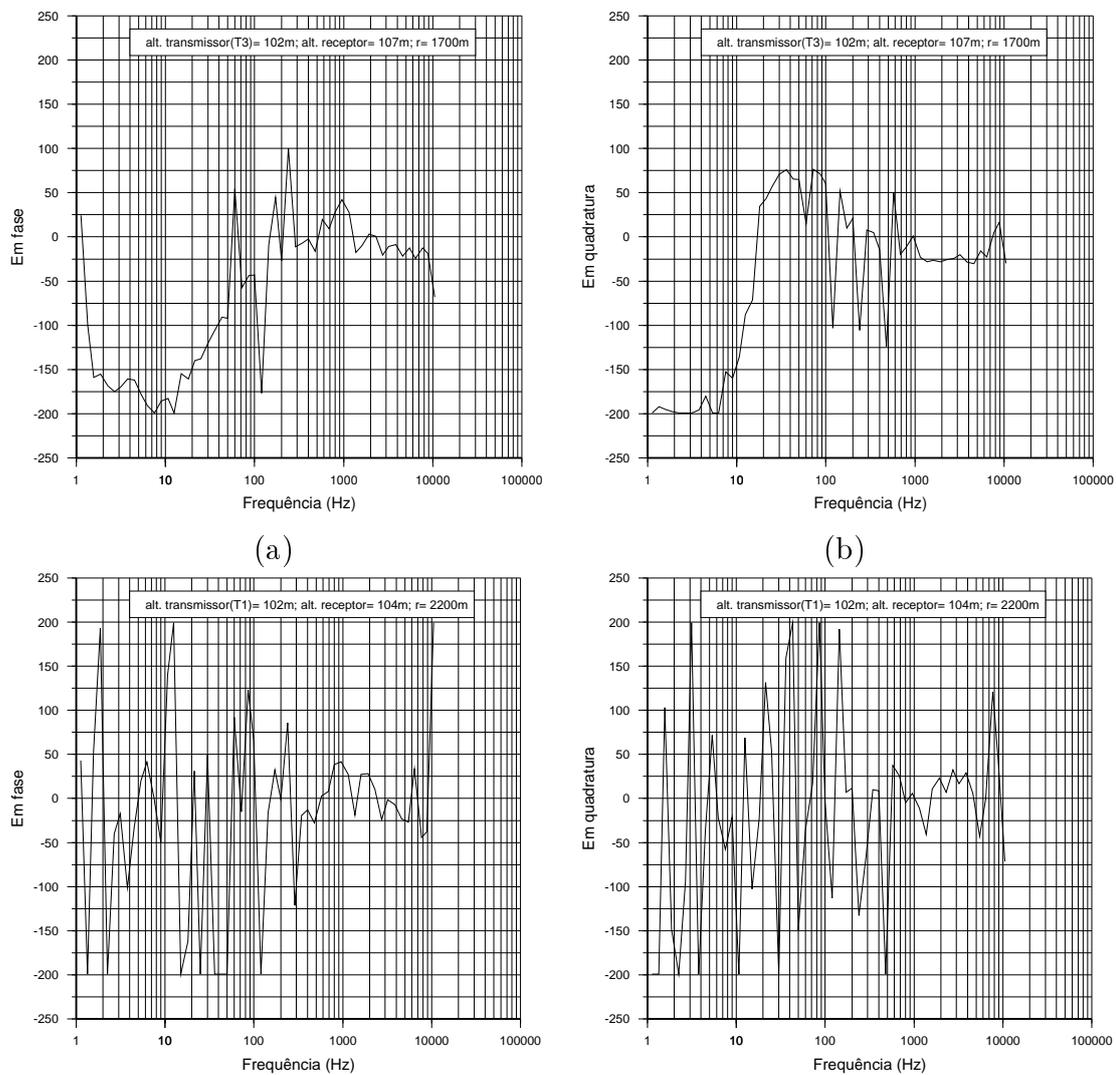


Figura 3.6: Resposta EM, arranjo PERP, campo de Araçás, para distancia TX-RX de 1700m e 2200m

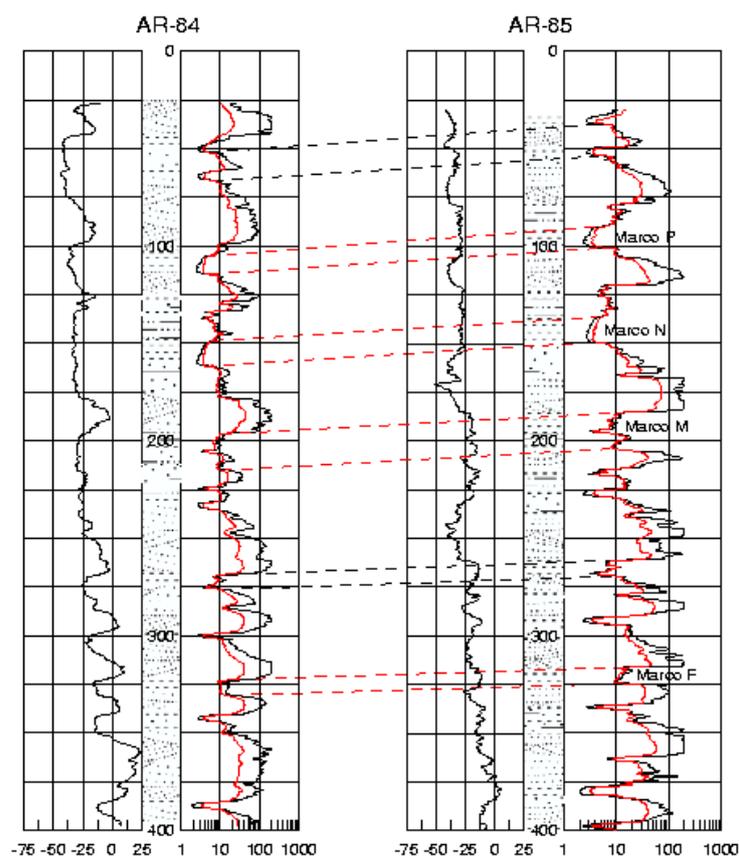
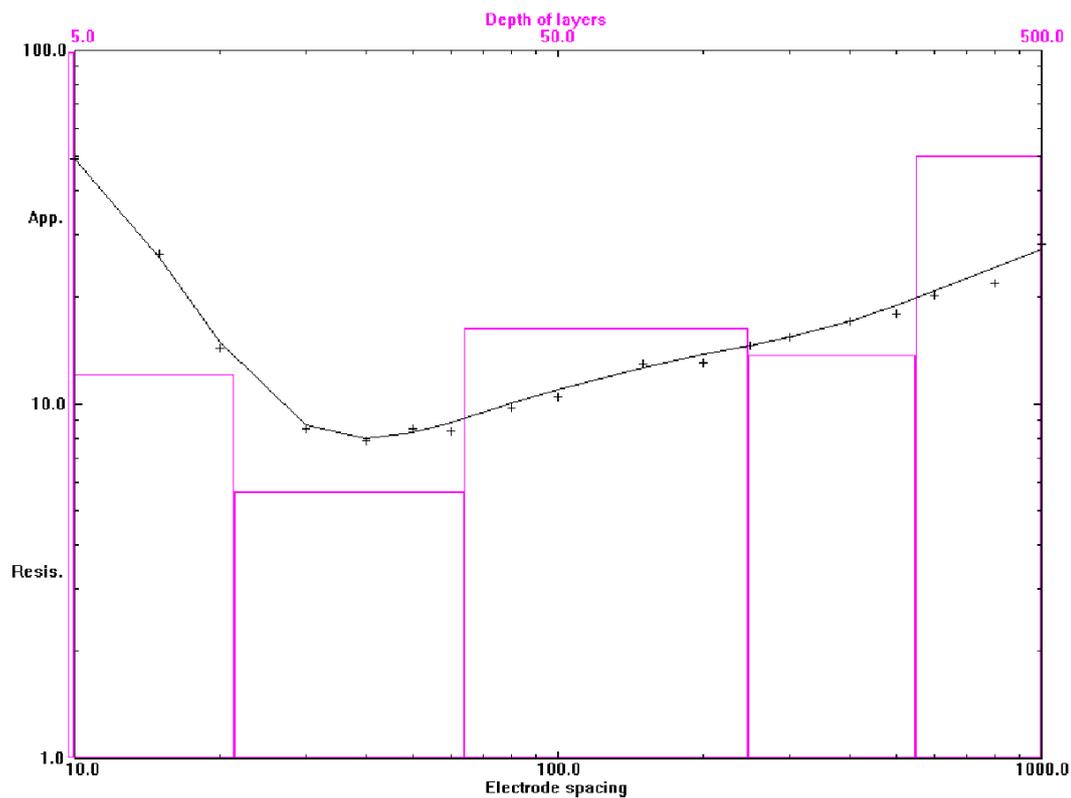
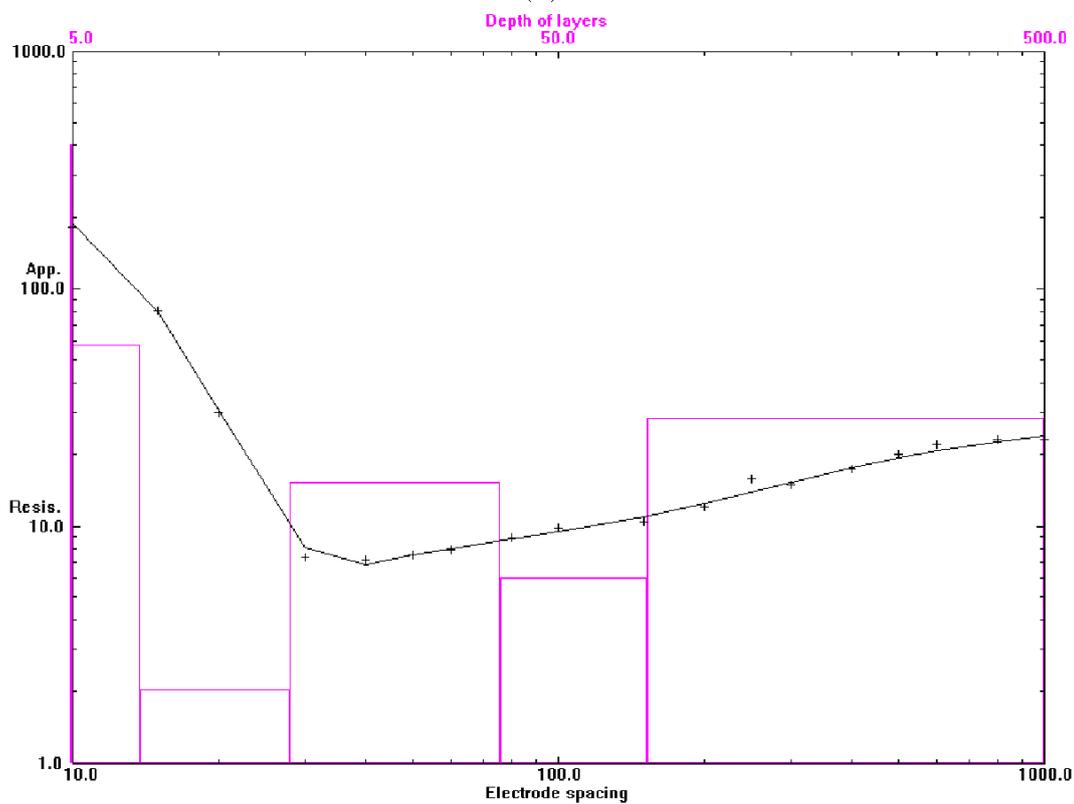


Figura 3.7: Perfis dos poços AR-84, AR-85, (Lima, 2009)

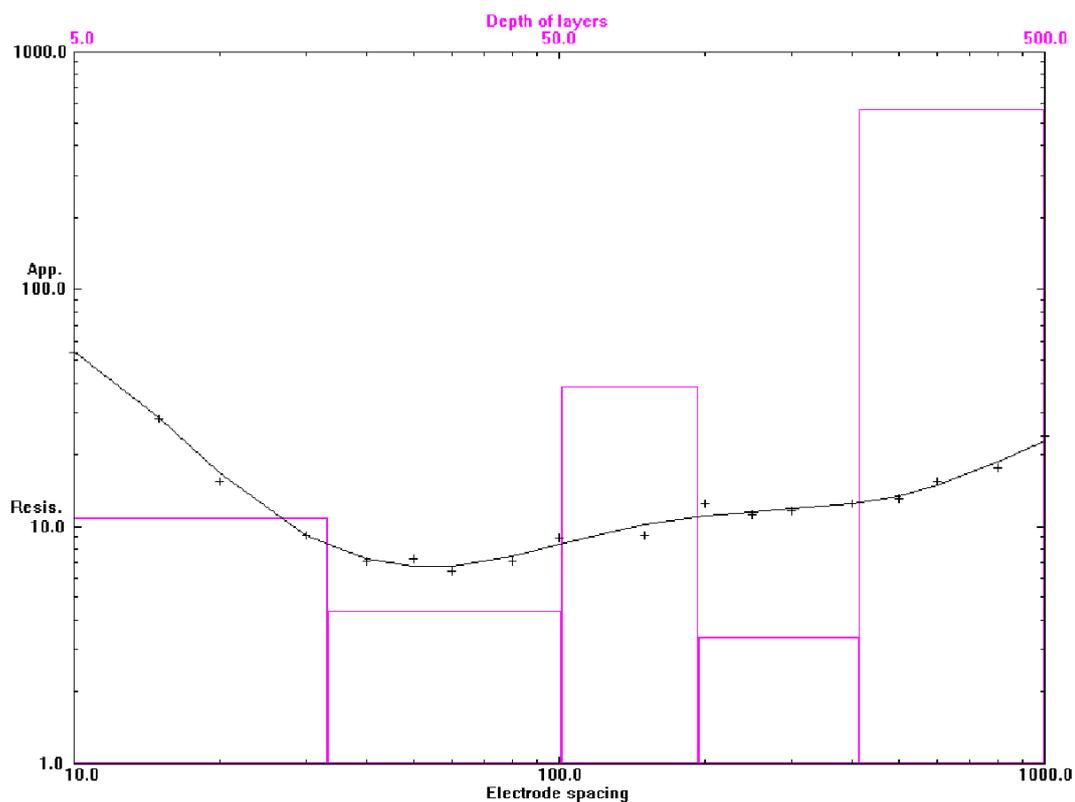


(a)

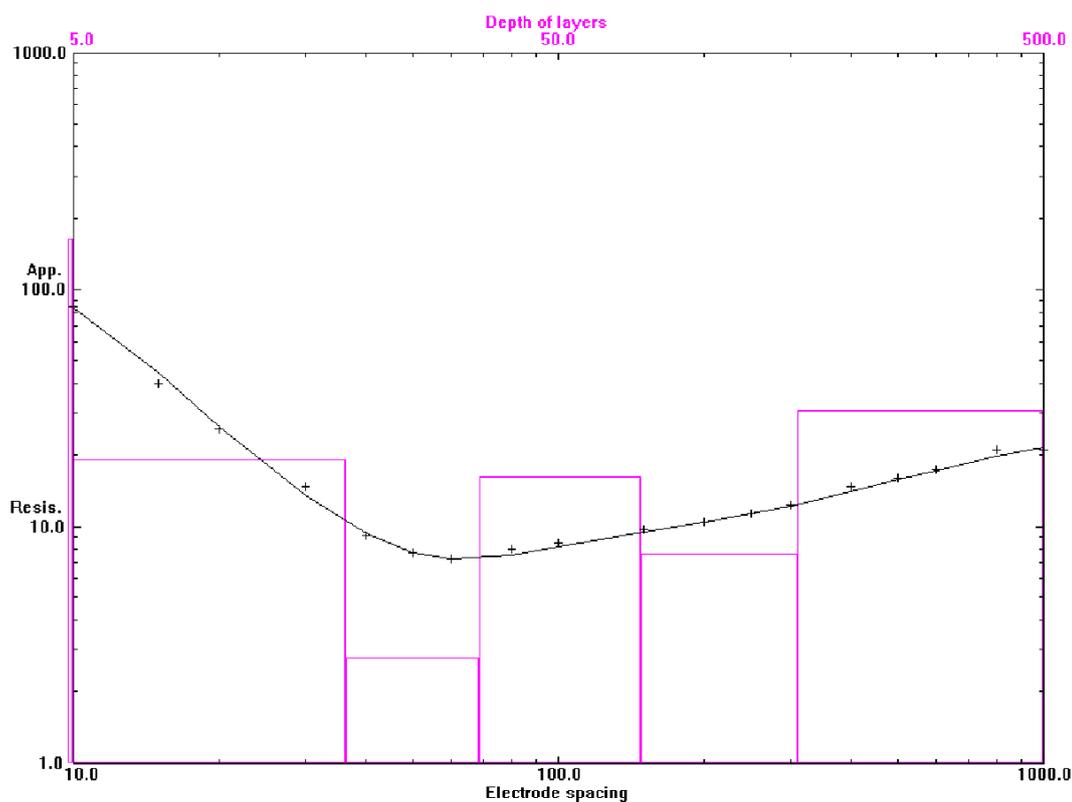


(b)

Figura 3.8: Perfis da sondagem elétrica vertical, (a): Se-31, (b): Se-33



(c)



(d)

Figura 3.9: Perfis da sondagem elétrica vertical, (c): Se-18, (d): Se-9

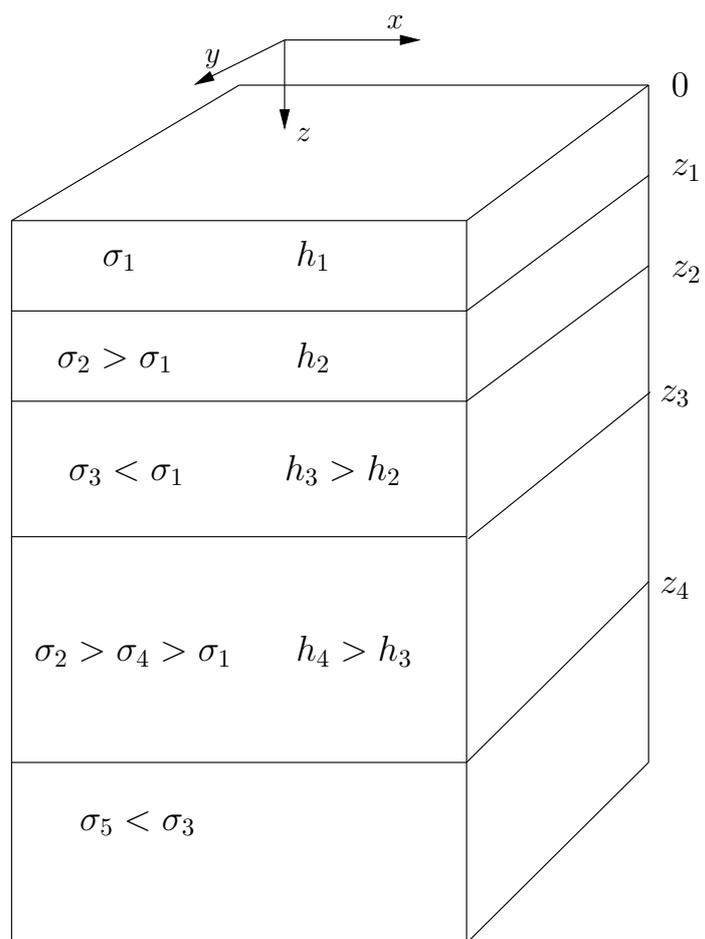


Figura 3.10: Modelo inicial sugerido para modelagem direta, multicamadas.

# 4

## Conclusões

Essa dissertação aborda o problema do efeito da topografia do terreno em dados EM de multifrequência, de forma ampla, estabelecendo uma expressão geral do campo magnético em um plano inclinado de aquisição. As matrizes de transformação  $\tilde{T}$  e inversa  $\tilde{T}^{-1}$  garantem a relação entre o plano inclinado e a base horizontal, considerando a geometria do terreno. A modelagem direta do caso de semi-espaço homogêneo com um dipolo vertical, demonstrou que:

- Pequenas inclinações do dipolo da ordem de 5 até 10°, não afetam os dados adquiridos. Porém é conveniente escolher locais para a instalação da bobina transmissora de forma a se evitar grandes perturbações no eixo do dipolo,
- a maior influência da topografia sobre os dados EM de multifrequência se deve à diferença de altitude entre transmissor e receptor. Essa influência diminui à medida em que o afastamento transmissor-receptor aumenta, pois diminui a inclinação. Esse caso é o mais comum na área do campo de Araças, o que gera a necessidade de se pesquisar métodos adequados para minimizar os desvios causados pela diferença de altitude,
- quanto mais o azimute se acerca a 90°, menor é o erro. Este é um aspecto a ser levado em consideração no planejamento das linhas de levantamento.

Os dados adquiridos no campo de Araçás são influenciados tanto pelo efeito topográfico como também pelos ruídos culturais, devidos à rede elétrica de alta tensão, e de diversas atividades humana.

Acima de 2000 m, nas condições de Araçás, o ruído é maior do que o sinal, o que faz com que a exploração com o T-3, nessas condições, não deva passar de 2 km ao invés de 3 km como usado na investigação.

As sondagens elétricas realizadas na área mostram uma alternância entre pacotes de arenitos e argilas, ambiente propício a deposição de hidrocarbonetos. A interpretação desses sondagens juntamente com os perfis do poço, permitiu propor um modelo inicial para a modelagem EM de multicamadas.

Recomenda-se investigar métodos de inversão e modelagem que tomem nas suas soluções o efeito da topografia.

# Agradecimentos

Meus agradecimentos a Allah, pela misericórdia e clemência, aos meus pais por existirem e que a paz esteja com o Profeta Mohamed (SAW).

Agradeço ao Curso da Pós-graduação em Geofísica da UFBA, ao Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia da UFBA (CPGG/UFBA) e os órgãos financiadores da bolsa de mestrado (CAPES e FAPESB), pela oportunidade brindada.

A todos meus professores pelo valioso conhecimento dado durante minha formação.

Meus profundos e sinceros agradecimentos aos meus orientadores Prof. Hédison K. Sato e Prof. Olivar A. L. de Lima, pelos ensinamentos, as orientações, e apoio recebido como orientado e como aluno do CPGG.

A todos os colegas do CPGG e do Instituto da Geociências, pela receptividade e amizade, em particular aos colegas Luis S. Lima, Rogerio Porciúncula, Ricardo Barreto, Alan Souza, Rodrigo Andrade e especial agradecimento a Joaquim B. Lago pelo apoio e as dicas.

Agradeço ao Prof. Antonio Puentes, responsável pela minha vinda ao Brasil, por sua irmandade e apoio constante. À minha mãe Brasileira Iray Galvão, pela incondicional assistência.

A toda a comunidade islâmica de Salvador, em particular ao Sheikh Ahmad Abdul Hamid, as irmãs Monique N. Gomez, Ninevah C. Barreiro e Dona Karimat.

A todos os que contribuíram ao sucesso de minha estadia em Salvador, em particular as colegas e grandes amigas da casa (Rejhane Cunha, Ana-Luisa Días, Sandra Brazil, Dalila Santos), aos meus amigos João Batista, Jemisson Mattos e George Antonio Dacunha e sua família.

# Referências Bibliográficas

- Aragão, M. A. N. F. (2004) Arquitetura, estilos tectônicos e evolução da Bacia do Recôncavo, Simpósio sobre Cretáceo do Brasil, 3 Boletim de Resumos, pp. 165–167, Brasil, UNESP/IGGE.
- Baba, K. e Chave, D. (2005) Correction of seafloor magnetotelluric data for topographic effects during inversion, *Journal International*, **150**:392–402.
- Baker, H. A. (1979) VLF-EM model studies and some simple quantitative application to field results, *Geoexploration*, **17**:55–63.
- Brandão, A. T. (2008) Análise estratigráfica e hidrológica da formação São Sebastião no campo de Araçás, Bacia do Recôncavo, Dissert. de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Butkov, E. (1968) *Mathematical physics*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., St. John's University, New York.
- Caixeta, J. M.; Bueno, G. V.; Magnavita, L. P. e Feijó, F. J. (1994) Bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá, Rel. Téc., PETROBRAS.
- Cardador, M. H.; Cuevas, A. L.; Watanabe, H.; Saito, A.; Wada, K.; Ishikawa, H. e Okuzumi, K. (2003) Experiment evaluation of hydrocarbon detection with the long-offset time domain electromagnetic method in the cretaceous carbonates of the Tampico-Misantla basin, Mexico, *Applied Geophysics*, **52**:103–122.
- Cetrel (2000) Zoneamento de recursos hídricos subterrâneos na região do pólo petroquímico de Camaçari/Ba, Rel. Téc..
- Dias, C. A. (1968) A non-grounded method for measuring induced electrical polarization and conductivity, Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley.

- Eidesmo, T.; Ellingsrud, S.; Johansen, S.; Sinha, M. C.; Macgregor, L.; Kong, F. N.; Westerdahl, H. e Constable, S. (2002) Sea Bed Logging (SBL), a new method for remote and direct identification of hydrocarbon filled layers by deepwater areas, First Break, The Leading Edge, **20**:144–152.
- Ellingsrud, S.; T., E.; Johansen, S.; Sinha, M. C.; Macgregor, L. e Banerjee, B. S. (2002) Remote sensing of hydrocarbon layers by Sea Bed Logging (SBL): Results from a cruise offshore Angola, The Leading Edge, **21**:972–982.
- Frischknecht, F. (1967) Fields about an oscillating magnetic dipole over a two-layer earth, and application to ground and airborne electromagnetic surveys, Geoplot, **62**:1–326.
- George, R. e Jiracek (2005) Near-surface and topographic distortions in electromagnetic induction, Surveys in Geophysics, **11**:163–203.
- Grant, F. S. e West, G. F. (1965) Interpretation theory in applied geophysics, International Series in The Earth Sciences, McGraw-Hill Book Company, USA.
- IBGE (2008) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Estimativa da população para 1 de julho de 2008, Rel. Téc..
- Karous, M. R. (1979) Effect of relief in EM methods with very distant source, Geoplot, **17**:33–42.
- Keller, G. V. e Frischknecht, F. C. (1966) Electrical methods in geophysical prospecting, Pergamon Press, England.
- Koefoed, O. e Biewinga, D. T. (1976) The application of electromagnetic frequency sounding to groundwater problems, Geoplot, **14**:229–241.
- Ku, G. G.; Hsieh, M. S. e Lim, S. H. (1973) The topographic effect in electromagnetic fields, Can. J. Earth Sci., **10**:645–656.
- Lima, O. A. L. (1999) Caracterização hidráulica e padrões de poluição no aquífero Recôncavo na região de Camaçari-Dias D’Avila, Rel. Téc., CPGG/UFBA.
- Lima, O. A. L. (2009) Exploração direta de petróleo com levantamentos elétricos e eletromagnéticos a multifrequência na Bacia de Recôncavo, Rel. Téc., CPGG/UFBA.

- Milhomen, P. S.; Maman, E. J.; Oliveira, F. M.; Carvalho, M. S. S. C. e Lima, W. S. (2003) Bacias sedimentares brasileiras, Bacia do Recôncavo, Revista Phoenix, **51**.
- Nascimento, M.; Moraes, L. R. S.; Castro, M. G. R. e Santana, A. V. A. (2008) Estudos qualitativos de águas subterrâneas como componente do plano municipal de saneamento ambiental de Alagoinhas, Rel. Téc., IBGE/DPE/COPIIS, Brasil.
- Parasnis, D. (1970) Principles of applied geophysics, Harmattan, USA.
- Patras, H. P. (1969) Central frequency sounding in shallow engineering and hydro-geological problems, Elsevier Scientific Publishing Company.
- Patras, H. P. e Mallick, K. (1980) Geosounding principles, time-varying geoelectric soundings, Elsevier Scientific Publishing Company, **2**:47–112.
- Raja, G. P. (1991) Paleosismicidade e sedimentação evidências no compartimento sul da Bacia do Recôncavo, Bahia, Rel. Téc., PETROBRAS.
- Reis, A. C.; Roch, P. S.; Ferreira, L. E.; Correia, J. S.; Alves, R. L. e Viana, M. (2005) Avaliação dos impactos dos “royalties” no desenvolvimento dos municípios arredores da Bacia do Recôncavo, III Congresso Brasileiro de Petróleo e Gás, Salvador, Bahia, Brasil.
- Russel, J. (1994) Química geral, Makron Books do Brasil, São Paulo.
- Ryu, H. J.; Morrison, F. e Ward, S. H. (1970) Electromagnetic field about a loop source of current, Geophysics, **35**:862–896.
- Sasaki, Y. e Nakazato, H. (2003) Topographic effects in frequency-domain helicopter-borne electromagnetics, Exploration Geophysics, **34**(2):24–28.
- Sato, H. K. (1979) Método eletromagnético para interpretação de polarização induzida e resistividade, usando o protótipo de um sistema a multifrequência, Dissert. de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Sinha, A. (1980) A study of topographic and misorientation effects in multifrequency electromagnetic soundings, Geoexploration, **18**:111–133.
- Spies, B. R. e Frischknecht (1991) Electromagnetic sounding, In: M. N. Nabighian, ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics*, vol. 2, pp. 285–422, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.

- Tarso, P. D. e Morais, E. R. (2003) Shallow eletromagnetic exploration for hidrocarbons at Sergipe-Alagoas Basin, Brazil, *The Leading Edge*, **11**:1127–1129.
- Wait, J. (1955) Mutual electromagnetic coupling of loops over a homogeneous ground, *Geophysics*, **20**:630–637.
- Wambo, T. O. (2007) Prospection par la méthode hélio magnétotellurique le long d´un profil dans le bassin sédimentaire de Manfe, Ph.D.Thesis, Université de Yaoundé I, Faculté des Sciences, Yaoudé-Cameroun.
- Ward, S. H. e Hohmann, G. W. (1988) Electromagnetic theory for geophysical applications, In: M. N. Nabighian, ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics*, vol. 1, Theory, pp. 131–311, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.
- Ward, S. H.; Ryu, J.; Glenn, W. E.; Hohmann, G.; Dey, A. e Smith, B. D. (1974) Electromagnetic methods in conductive terranes, *Geoexploration*, **12**:12–183.
- Wright, D. e Ziolkwski, A. amd Hobbs, B. (2002) Hydrocarbon detection and monitoring with a multi-component transient electromagnetic mtem survey, *The Leading Edge*, **21**:852–864.
- Zonge, K. L. e Hughes, L. J. (1991) Controlled source audio-frequency magnetotellurics, In: M. N. Nabighian, ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics*, vol. 2, pp. 713–807, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.

# Anexo



## Programa de Computador Número Um

```
! program principal impedancia(alfa,beta,alfaM,betaM,ikro)
!=====
!Esse programa calcula a impedância mútua para a modelagem direta no caso de
! um semi-espaço homogêneo.
!Dados de entrada:
!alfa= é o azimute do terreno
!beta= é a inclinação ou mergulho do terreno
!alfaM= é o azimute do transmissor
!betaM=é a inclinação do transmissor
!rho=é a distancia trasnmissor-receptor
! considera-se nesse programa o observador tal que x=rho, y=0.0

!Autor= Zoukaneri Ibrahim (03/2010)
!=====

        implicit none
        real ::alfa,beta,alfaM,betaM,rho,freq,f_step,omega,sigma,m
        real ::tt
        complex ::campoh_alfa,ikrho,nonda,n_onda,impedancia,campo,impedancia
        complex, parameter::i =(0.0,1.0)
        real ,parameter ::pi =acos(-1.0)

        m=1.0
        rho=1000.0
        sigma= 0.010
        freq=0.1
        f_step=1/10.

        write(0,*)'valores dos ângulos de entrada?'
        read(5,*) alfa,beta,alfaM,betaM

        do while(freq.le.10000*1.0000)

                omega=2*pi*freq
                tt=rho*sqrt(omega*sigma*2e-7)

                nonda=n_onda(omega,sigma,4e-7*pi)
                if (aimag(nonda).gt.0) nonda=-nonda
                ikrho=i*nonda*rho
```

```

    impedancia= campoH(alfa,beta,alfaM,betaM,ikrho)
    write(10,*)tt, real(impedancia(alfa,beta,alfaM,betaM,ikrho))
    write(13,*)tt, aimag(impedancia(alfa,beta,alfaM,betaM,ikrho))
    freq=freq+f_step
enddo
end
!=====
function campoH(alfa,beta,alfaM, betaM,ikrho)
!=====
    implicit none
    real, intent(in):: alfa,beta,alfaM, betaM
    complex, intent(in):: ikrho

    complex:: gx_mx, gz_mz,gx_mz,gz_mx, gy_my ! funcoes
    complex:: wxx,wzz,wxz,wzx,wyx,wxy,wyy,wzy,wyz !funções de Ward-Hohmann

    complex::A, B, C, D, E, F, h_zero, campoh_alfa, desvio
    real:: cosalfa,sinalfa,sinbeta,tanbeta,cosbeta !inclinações do terreno
    real::cosalfaM, cosbetaM,sinalfaM,sinbetaM !angulos no transmissor
    real::lx, ly, lz,mx,my,mz,nx,ny,nz !coeficientes da matriz de tansf.
    real, parameter:: pi=acos(-1.), pi180 =pi/180

    !funções W de Ward e Hohmann
    wxx=gx_mx(ikrho)
    wzz=gz_mz(ikrho)
    wxz=gx_mz(ikrho)
    wzx=gz_mx(ikrho)
    wyx= 0.
    wxy= 0.
    wyy= gy_my(ikrho)
    wzy=0.
    wyz=0.

    !angulos no transmissor
    cosalfaM=cos(alfaM*pi180)
    sinalfaM=sin(alfaM*pi180)
    cosbetaM=cos(betaM*pi180)
    sinbetaM=sin(betaM*pi180)

    !angulos relativos ao azimute e mergulho do terreno.
    cosalfa=cos(alfa*pi180)
    sinalfa=sin(alfa*pi180)
    sinbeta=sin(beta*pi180)
    tanbeta=tan(beta*pi180)
    cosbeta=cos(beta*pi180)

    !coeficientes da matriz de transformação.
    lx=1/sqrt(1+tanbeta**2 *cosalfa**2)
    ly=(tanbeta*cosalfa*sinalfa*sinbeta)/sqrt(1+tanbeta**2 *cosalfa**2)
    lz=-sinbeta*cosalfa
    mx= 0.
    my=(cosbeta/sqrt(1+tanbeta**2*cosalfa**2)) -sinbeta*sinalfa
    mz=sinbeta*cosalfa
    nx=tanbeta*cosalfa/sqrt(1+tanbeta**2 *cosalfa**2)
    ny=sinbeta*sinalfa/sqrt(1+tanbeta**2 *cosalfa**2)
    nz=cosbeta

    !campo horizontal H=SWTM calculado em duas fases SW * TM
    !primeiro, os elementos da operação SW(A B C)

    A=lx*wxx + ly*wxy +lz*wxz

```

```
B=lx*wyy +ly*wyy + lz*wyz
C=lx*wzx +ly*wzy +lz*wzz
```

```
!segundo, os elementos da operação TM{D, E, F} (matriz coluna)
```

```
D=lx*sinbetaM*cosalfaM +mx*sinbetaM*sinalfaM +nx*cosbetaM
E=ly*sinbetaM*cosalfaM +my*sinbetaM*sinalfaM +ny*cosbetaM
F=lz*sinbetaM*cosalfaM +mz*sinbetaM*sinalfaM +nz*cosbetaM
```

```
!campo horizontal
campoH= A*D + B*E + C*F
```

```
end
```

```
=====
complex function gx_mx(ikrho)
```

```
!=====
!ese programa calcula o campo magnético radial do momento mx
!baseado na expressao 4.126,p.227 de Ward e Hohmann(1987)
! Electromagnetic Theory for Geophysical Applications. In:
! Nabighian, M. N., Electromagnetic Methods in Applied
! Geophysics, Society of Exploration Geophysicists. Tulsa.
!
! normaliza-se por 1/4/pi/rho**3
!
! Autor: Zoukaneri Ibrahim M.
!=====
```

```
implicit none
complex,intent(in) ::ikrho
if (abs(ikrho).le.2e-1)then
gx_mx=-2/ikrho**2*(-ikrho**2 - ikrho**5/15 + ikrho**6/24 )
+ ikrho**7/70 - ikrho**8/288)
else
gx_mx=-2/ikrho**2*(-2*ikrho**2 +12-(((ikrho +5)*ikrho + 12)*ikrho
+12)*exp(-ikrho))
endif
end
```

```
!=====
complex function gx_mz(ikrho)
```

```
!=====
!ese programa calcula o campo magnético radial do momento mz
!baseado na expressao 4.59,p.212 de Ward e Hohmann(1987)
! Electromagnetic Theory for Geophysical Applications. In:
! Nabighian, M. N., Electromagnetic Methods in Applied
! Geophysics, Society of Exploration Geophysicists. Tulsa.
! O resultado vem dividido por (1/4 pi rho**3)
!=====
```

```
implicit none
integer, parameter:: kode=1.0
real, parameter:: fnu=1.
complex:: ci(2), ck(2)
complex, intent(in):: ikrho

call cbesibes(ikrho/2,ci,ck,fnu,kode)
gx_mz=-ikrho**2*(ci(1)*ck(1)-ci(2)*ck(2))
return
```

```

end
=====
      complex function gz_mz (ikrho)
=====
!ese programa calcula o campo magnetico vertical do momento mz
!baseado na expressao 4.56,p.211 de Ward e Hohmann(1987)
! Electromagnetic Theory for Geophysical Applications. In:
! Nabighian, M. N., Electromagnetic Methods in Applied
! Geophysics, Society of Exploration Geophysicists. Tulsa.
!
!=====
Meus      implicit none
      complex,intent(in) ::ikrho
      if (abs(ikrho).lt.2e-1)then
gz_mz =-2/ikrho**2*(-ikrho**2/2.-ikrho**4/8.+(2*ikrho**5)/15.-ikrho**6/16)
      else
gz_mz=-2/ikrho**2*(-9+ (((ikrho+4)*ikrho+9)*ikrho+9)*exp(-ikrho))
      end if
      end
=====
      complex function gz_mx(ikrho)
=====
!ese programa calcula o campo magnetico radial do momento mz
!baseado na expressao 4.129,p.228 de Ward e Hohmann(1987)
! Electromagnetic Theory for Geophysical Applications. In:
! Nabighian, M. N., Electromagnetic Methods in Applied
! Geophysics, Society of Exploration Geophysicists. Tulsa.
!
! normaliza-se por 1/4/pi/rho**3
!Autor: Zoukaneri Ibrahim M.
!=====
      implicit none
      integer, parameter:: kode=1.
      real, parameter:: fnu=1.
      complex:: ci(2), ck(2)
      complex, intent(in):: ikrho
      call cbesibesk(ikrho/2,ci,ck,fnu,kode)
gz_mx=-ikrho**2*(ci(1)*ck(1)-ci(2)*ck(2))
      return
      end
=====
      complex function gy_my(ikrho)
=====
!ese programa calcula o campo magnetico radial do momento mx
!baseado na expressao 4.126,p.227 de Ward e Hohmann(1987)
! Electromagnetic Theory for Geophysical Applications. In:
! Nabighian, M. N., Electromagnetic Methods in Applied
! Geophysics, Society of Exploration Geophysicists. Tulsa.
!
! normaliza-se por 1/4/pi/rho**3
!
! Autor: Zoukaneri Ibrahim M.
!=====
      implicit none
      complex,intent(in) ::ikrho
      if (abs(ikrho).le.2e-1)then
gz_my=-2/ikrho**2*(-ikrho**2/2 -ikrho**4/8 + ikrho**5/15 - ikrho**6/48)
      else
gz_my=-2/ikrho**2*(3 -ikrho**2 -((ikrho + 3)*ikrho +3)*exp(-ikrho))
      endif
      end

```