

**ESTUDO DA RESPOSTA DE DIFERENTES ARRANJOS DE  
BOBINAS NA PERFILAGEM DE INDUÇÃO DE POÇO:  
MODELAMENTO ANALÓGICO**

por

**JOSÉ FLÁVIO BEZERRA MONTENEGRO**

Engenheiro Mecânico (Universidade de Fortaleza - 1984)

Tese submetida como requisito parcial ao grau de

**MESTRE EM CIÊNCIAS**

em

**GEOFÍSICA**

ao

Colegiado do Curso de Pós-Graduação em

Geofísica

da

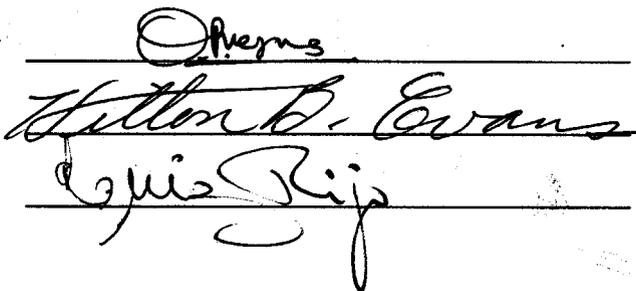
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**

Banca Examinadora :

Dr. Om Prakash Verma (Orientador)

Dr. Hilton Bernard Evans

Dr. Luiz Rijo



Data da Homologação : 25/11/1991

T 378     **MONTENEGRO, José Flávio Bezerra. Estudo da resposta de**  
M 777     **diferentes arranjos de bobinas na perfilagem de in-**  
          **dução de poço: modelamento analógico.** Belém, Uni-  
          **versidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 1991.**  
          64p. il.

**Tese (Mestrado em Geofísica) – Curso de Pós-Graduação**  
**em Geofísica, Centro de Geociências, UFPa., 1991.**

**1. PERFILAGEM INDUÇÃO DE POÇOS. 2. MODELA-**  
**MENTO ANALÓGICO EM PERFILAGEM DE POÇO. 3.**  
**INTERPRETAÇÃO GEOELETROMAGNÉTICA. I. Uni-**  
**versidade Federal do Pará. Centro de Geociências–Departa-**  
**mento de Geofísica. II. Título**

T 378     - 0391/556 - 12.12.91  
M 777

## SUMÁRIO

Sumário .....	i
Lista de Ilustrações .....	iii
Lista de Ilustrações .....	iv
Resumo .....	1
Abstract .....	2
<b>CAPÍTULO 1. ASPECTOS GERAIS .....</b>	<b>3</b>
1.1 Introdução .....	3
1.2 Geofísica de poço .....	4
1.3 Objetivo do trabalho .....	4
1.4 Perfil de indução .....	5
<b>CAPÍTULO 2. MODELAMENTO ANALÓGICO ELETROMAGNÉTICO - CONJUNTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>15</b>
2.1 Relações de similitude .....	17
2.2 Aproximações físicas .....	19
2.3 Descrição do modelo geológico simulado .....	19
2.4 Instrumentação .....	20
2.5 Processo de medida .....	24
<b>CAPÍTULO 3. ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>27</b>
3.1 Descrição geológica dos modelos estudados .....	27
3.2 Análise das respostas .....	29

<b>CAPÍTULO 4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>35</b>
<b>4.1 Conclusões .....</b>	<b>35</b>
<b>4.2 Recomendações .....</b>	<b>36</b>
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>38</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>39</b>
<b>APÊNDICE.....</b>	<b>41</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Tab. I - Descrição dos modelos geológicos e E.M.-reduzidos .....	27
Tab. II - Valores da fase ( $\theta$ ) em graus para o compartimento 4 do modelo 2 .....	29
Tab. III - Valores da componente em fase de S/P (%) na frequência de 100 kHz .....	30
Tab. IV - Valores da componente em quadratura de S/P (%) na frequência de 100 kHz .....	30
Tab. V - Valores da componente em fase de S/P (%) para o compartimento 3 .....	33
Tab. VI - Comparação entre a condutividade teórica e a experimental .....	42

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fig. 1 - Loop circular (sistema de coordenadas).....	43
Fig. 2 - Diferença de fase entre as correntes induzidas relativas a corrente emitida .....	44
Fig. 3 - Orientação das bobinas.....	44
Fig. 4 - A sonda de indução com duas bobinas.....	45
Fig. 5 - Fator geométrico radial $g(r)$ da sonda de duas bobinas.....	46
Fig. 6 - Fator geométrico vertical $g(z)$ da sonda de duas bobinas .....	46
Fig. 7a - Situação em que ocorre o fenômeno de "annulus" .....	47
Fig. 7b - Distribuição radial de resistividade .....	47
Fig. 8a - Modelo experimental simulando situação geológica de poço (vista lateral).....	48
Fig. 8b - Sistema de abastecimento das zonas lavadas e de transição.....	48
Fig. 8c - Seção transversal do modelo geológico do poço.....	48
Fig. 9 - Diagrama de blocos do sistema elétrico .....	49
Fig. 10a - Vista lateral da sonda de arranjo coaxial .....	50
Fig. 10b - Vista lateral da sonda de acoplamento mínimo .....	50
Fig. 10c - Vista lateral da sonda de arranjo coplanar .....	50
Fig. 11a - Blindagem eletrostática dos cabos .....	51
Fig. 11b - Blindagem eletrostática das bobinas de arranjo coaxial .....	51
Fig. 11c - Blindagem eletrostática das bobinas de arranjo coplanar.....	51
Fig. 12a - Modelo geológico representando um arenito sobreposto por um folhelho.....	52
Fig. 12b - Modelo geológico simulando o perfil de invasão tipo " annulus " do arenito do modelo 1 .....	52

Fig. 13a - Modelo geológico representando um calcário sobreposto por um folhelho .....	53
Fig. 13b - Modelo geológico simulando o perfil de invasão tipo "annulus" do calcário do modelo 3 .....	53
Fig. 14a - Modelo geológico representando um folhelho intercalado por camadas finas de rochas com hidrocarbonetos (resistivas).....	54
Fig. 14b - Modelo geológico representando um folhelho intercalado por camadas finas de rochas com hidrocarbonetos (resistivas) e uma camada fina de sulfeto (condutiva).....	54
Fig. 15 - Respostas do arranjo coaxial de bobinas nas frequências de 100, 80 e 60 kHz referentes ao modelo 2 .....	55
Fig. 16 - Respostas do arranjo coplanar de bobinas nas frequências de 100, 80 e 60 kHz referentes ao modelo 2 .....	56
Fig. 17 - Respostas dos arranjos de bobinas coaxial e coplanar referentes ao modelo 1 .....	57
Fig. 18 - Respostas dos arranjos de bobinas coaxial e coplanar referentes ao modelo 2 .....	58
Fig. 19 - Respostas dos arranjos de bobinas coaxial e coplanar referentes ao modelo 3 .....	59
Fig. 20 - Respostas dos arranjos de bobinas coaxial e coplanar referentes ao modelo 4 .....	60
Fig. 21 - Respostas dos arranjos de bobinas coaxial e coplanar referentes ao modelo 5 .....	61
Fig. 22 - Respostas dos arranjos de bobinas coaxial e coplanar referentes ao modelo 6 .....	62
Fig. 23 - Respostas do arranjo coaxial de bobinas para os modelos 1 e 2.....	63
Fig. 24 - Respostas do arranjo coplanar de bobinas para os modelos 1 e 2.....	64

**ESTUDO DA RESPOSTA DE DIFERENTES ARRANJOS DE BOBINAS NA  
PERFILAGEM DE INDUÇÃO DE POÇO: MODELAMENTO ANALÓGICO**  
(TESE DE MESTRADO : Nov./91)

**JOSÉ FLÁVIO BEZERRA MONTENEGRO**

Orientador : Dr. Om Prakash Verma

*Departamento de Geofísica – Centro de Geociências/UFPA*

*Caixa Postal 309 – Belém, PA, Brasil*

## **RESUMO**

A sonda de indução tem sido largamente utilizada na perfilagem de poço para detectar reservatórios através do contraste de condutividade existente entre as zonas contendo hidrocarbonetos e as zonas contendo água conata. A sonda de indução, além de auxiliar na localização de formações que contêm hidrocarbonetos, possibilita o cálculo de reservas para análise da viabilidade de exploração do reservatório.

Porém, apesar do grande avanço da sonda de indução, a qual utiliza arranjo coaxial, existem várias restrições ao seu uso. Camadas delgadas, poços preenchidos com lama condutiva e invasão profunda são algumas das situações onde não é adequada a utilização da sonda de indução.

Considerando as limitações da sonda de indução é que desenvolvemos em laboratório um estudo sobre as diferentes disposições de bobinas para a perfilagem de indução. O estudo consiste em comparar a resposta da sonda de arranjo de bobinas coaxiais, com a resposta da sonda de arranjo de bobinas coplanares e verificar se as respostas encontradas resolvem alguns dos problemas apresentados pela sonda de bobinas coaxiais.

As respostas das sondas de diferentes disposições de bobinas foram obtidas através da montagem de um sistema de modelamento analógico simulando um poço. Para o sistema modelo foi utilizado um fator de escala linear igual a 20. Um tanque contendo soluções salinas de diferentes condutividades simulava algumas situações geológicas controladas. O sistema permitia uma variação na frequência de 50 kHz a 100 kHz.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, em virtude do arranjo de bobinas coplanares ter apresentado melhor resolução vertical que o arranjo de bobinas coaxiais.

**ANALOG MODEL STUDIES OF DIFFERENT COIL CONFIGURATIONS  
IN INDUCTION LOGGING**  
(MASTER THESIS : Nov./91)

**JOSÉ FLÁVIO BEZERRA MONTENEGRO**

Adviser : Dr. Om Prakash Verma

*Departamento de Geofísica – Centro de Geociências/UFGA*

*Caixa Postal 309 – Belém, PA, Brasil*

**ABSTRACT**

Induction logs are frequently run in the drill holes to distinguish the zones containing hydrocarbons from those containing conate water, based on the conductivity contrast. Besides localizing these zones, the induction log can be used to calculate the hydrocarbon reserves reservoir evaluation.

Most commercial induction logs use a coaxial coil system, which have poor response in thin beds, deep invasion and conductive muds.

A comparative study of E.M. responses both coaxial and a coplanar coil systems was carried out for different geological situations to test the two systems in conditions where the coaxial system responds poorly.

For this study, an existing analog model was modified. The model source frequency is in the range of 50 to 100 kHz. A scale factor of 20 was chosen for this study. Solutions of varying electrical conductivities, obtained using different concentrations of amonium chloride contained in various compartments in a fiber glass tank, simulated the geological models.

The measurements obtained demonstrate that the coplanar coil system has a better vertical resolution than the coaxial coil system normaly used in induction logging.

## CAPÍTULO 1

### ASPECTOS GERAIS

#### 1.1. Introdução

Desde que foi inventada por Doll (1949), a ferramenta de indução eletromagnética, com arranjo coaxial de bobinas, vem sendo muito estudada devido a sua grande importância. A sonda de indução é a única ferramenta elétrica que apresenta bons resultados corrida em poços com lama a base de óleo, por não existir o contato galvânico. O objetivo da sonda de indução é conseguir valores aproximados da resistividade da zona virgem ( $R_t$ ). O "skin effect", camadas finas e o perfil de invasão tipo "annulus" são algumas das situações que não apresentam resultados satisfatórios para a resistividade da zona virgem.

Muitos trabalhos importantes foram surgindo com os seguidores de Doll, como Duesterhoeft (1961) que analisou a propagação de ondas eletromagnéticas em meios estratificados e a solução analítica da resposta da ferramenta de indução. A solução completa para sondas de duas bobinas em meio homogêneo foi desenvolvida por Moran e Kunz (1962). Harben et al. (1987) estudaram outros tipos de arranjos de bobinas para a perfilagem de poço, tais como acoplamento mínimo e arranjo coplanar de bobinas além do arranjo coaxial. Em um dos trabalhos mais recentes, Barbara Anderson et al. (1988) desenvolveram filtros e técnicas de deconvolução para corrigir o "skin effect".

A resposta do perfil de indução frente às situações geológicas complexas também é alvo de atenção por parte dos pesquisadores. Desta forma, é necessário estudar a resposta de diferentes configurações de bobinas através de modelamento analógico ou modelamento digital, para condições conhecidas e controladas.

Neste estudo, optamos por adotar a técnica de modelamento analógico para estudar os 3 diferentes arranjos de bobinas, e verificar o comportamento das respostas para os referidos arranjos, no sentido de solucionar problemas existentes, principalmente quanto a resolução vertical.

## 1.2. Geofísica de Poço

A geofísica de poço consiste na maioria das vezes, em descer conjuntos de instrumentos através de poços na superfície da terra, cujo objetivo principal é obter medidas de parâmetros físicos que caracterizem as formações atravessadas pelo poço. Essas medidas obtidas através das ferramentas são apresentadas contra as medidas de profundidade e são conhecidas como perfis, que nada mais são do que registros de informações geológicas e petrofísicas.

O conjunto de instrumentos inclui uma sonda que contém os sensores que executam as medidas. Uma central eletrônica conectada à sonda controla os sensores, fornecendo energia em níveis apropriados, recebendo e processando os sinais de saída provenientes dos sensores, podendo incluir também uma pequena estação utilizada para transmitir os dados através de um sistema de telemetria digital. A sonda e o pacote eletrônico juntos são conhecidos como ferramenta de perfilagem.

A ferramenta de perfilagem é suspensa por um cabo que é normalmente multicondutor, onde a parte superior do cabo é conectada a um computador e a um sistema de aquisição de dados. Este computador é programado para executar o processamento de dados "on-line". Portanto, ao mesmo tempo em que as ferramentas são corridas no poço, os perfis com os parâmetros físicos contra valores de profundidade são registrados continuamente.

Originalmente, a geofísica de poço é aplicada principalmente para auxiliar no julgamento das formações de subsuperfície, e analisar a natureza dos fluidos que preenchem os poros de rochas sedimentares, isto é, determinar as saturações de água, óleo e gás. Atualmente, o espectro de medidas de perfis disponíveis é suficientemente grande que nos permite, com uma precisão relativamente boa, determinar densidades de rochas, constituintes principais da rocha, tipos de argila presente, presença de fraturas e suas orientações, estruturas de formações e mergulhos estratigráficos, permeabilidade dos fluidos, ocorrência de elementos radioativos, etc.

## 1.3. Objetivo do trabalho

A ferramenta utilizada atualmente na perfilagem de poço possui o arranjo de bobinas coaxial. O arranjo coaxial conta com a grande vantagem da simetria radial, diminuindo as componentes da fonte de três dimensões para duas dimensões apenas. Esta peculiaridade é a responsável pe-

la grande utilização deste tipo de arranjo na perfilagem, devido a simplificação matemática que ela proporciona, tendo comõ consequência grandes números de trabalhos que são desenvolvidos buscando melhorias para este tipo de sonda.

Mas, apesar do arranjo coaxial ser bastante estudado, ele ainda apresenta alguns problemas, permitindo erros nas leituras de resistividade. Um dos problemas do arranjo coaxial é sua baixa resolução para camadas finas. Camadas com espessura menor que  $1,5L$  ( $L$ =espaçamento entre bobinas) não são sensíveis. Outro problema do arranjo coaxial é quando se tem o perfil de invasão tipo "Annulus".

O perfil de invasão tipo "Annulus" ocorre quando o filtrado da lama empurra a água salgada que está próxima à parede do poço, zona lavada, deixando apenas hidrocarboneto residual. A zona de transição fica apenas com água salgada e hidrocarboneto residual e na zona virgem com água salgada e hidrocarboneto leve (Fig. 7a). Então teremos como consequência uma zona condutiva intercalada por duas zonas resistivas. Para este tipo de perfil, a sonda com o arranjo de bobinas coaxiais registra valores de resistividade da zona virgem menores que os valores reais (Schlumberger 1987), Fig. 7b.

Em virtude dos problemas apresentados pelo arranjo coaxial, o objetivo deste trabalho consiste em estudar, através de modelamento analógico, diferentes arranjos de bobinas, arranjo coplanar e acoplamento mínimo, visando uma comparação com a resposta do arranjo coaxial e tentando encontrar possíveis soluções para os problemas apresentados, verificando a possibilidade da utilização destas diferentes configurações de bobinas na perfilagem de poço.

#### **1.4. Perfil de Indução**

##### **1.4.1. Introdução**

Os perfis elétricos de indução foram originalmente desenvolvidos para medir a resistividade das formações em poços contendo lama a base de óleo (lama resistiva), permitindo um cálculo quantitativo aproximado da saturação de água da formação ( $S_w$ ), através de valores da resistividade da zona virgem ( $R_t$ ) e permitindo também uma correlação poço a poço.

Uma das principais funções dos perfis de indução é a determinação da resistividade da zona

virgem, e conseqüentemente a saturação de água da formação, pois

$$S_w = \frac{R_o}{R_t},$$

onde  $R_o$  é a resistividade da formação 100% saturada de água.

#### 1.4.2. Histórico

O perfil de indução é uma extensão de um detetor de minas montado em jeeps, que Henri Doll, engenheiro chefe da Schlumberger, desenvolveu para o Departamento de Guerra dos Estados Unidos, para ser utilizado durante a Segunda Guerra Mundial. O detetor compreendia duas bobinas montadas horizontalmente em um eixo de madeira fixado a frente do jeep. Uma corrente alternada passando em uma das bobinas criava um campo magnético que induzia loops de correntes na terra. A segunda bobina detectava o campo magnético secundário criado pelos loops de correntes. As minas, sendo metálicas e condutivas, criavam loops de correntes mais intensos do que os normalmente detectados. O dispositivo de Doll, ao detectar esse efeito na segunda bobina, automaticamente acionava os freios do jeep.

Devido ao fato de que o contato galvânico não era necessário, Doll reconheceu que a técnica poderia permitir as medidas de condutividade em formações atravessadas por poços em que não havia fluido presente, ou o fluido presente apresentava alta resistividade.

Após a guerra, Doll adaptou esta técnica para que a mesma pudesse ser utilizada em perfilagens de poços. Em 1949, três anos depois que o primeiro perfil de indução foi corrido no Texas, Doll apresentou a perfilagem de indução para a indústria (Anderson et al. 1988).

Historicamente podemos citar o trabalho escrito por Doll (1949), no qual ele cita a invenção de uma nova ferramenta de perfilagem composta de um sistema de bobinas, que pode ser utilizada em poços contendo fluidos de perfuração não condutivos. Esta sonda de perfilagem tinha o objetivo de superar as dificuldades das sondas elétricas em poços que usavam lama a base de óleo. Outra dificuldade para as sondas elétricas eram as perfilagens de poços secos (Anderson et. al., 1988), situações essas que dificultam o contato dos eletrodos e, conseqüentemente, o fluxo de corrente elétrica.

Doll, após a apresentação da ferramenta inicial que continha duas bobinas, fez experiências

com arranjos que possuíam vários pares de bobinas. Um par era utilizado para efetuar a medida primária de condutividade, e os pares adicionais para eliminar as contribuições indesejáveis de camadas localizadas acima e abaixo do primeiro par. Após dez anos, este trabalho culminou na sonda 6FF40, introduzida em 1959, composta de três pares de bobinas que proporcionaram uma sensível melhora no fator geométrico e na resolução vertical da ferramenta.

Uma das simplificações da teoria de Doll era o "skin depth" (profundidade pelicular), o que não é válido para litologias condutivas. Pensando nas litologias condutivas é que Duesterhoeft & Smith (1962), Moran & Kunz (1962) baseados na teoria eletromagnética desenvolveram algoritmos que melhor incorporavam o skin effect.

Anderson & Gianzero (1983) modelaram a sonda de indução em um meio de multicamadas plano-paralelas, através de uma solução analítica para o campo eletromagnético. Este estudo culminou com a criação das sondas ILD e ILM (Schlumberger Deep e Medium Induction) e construção das cartas de correções para o efeito das camadas adjacentes.

Harben et al. (1987) analisaram a resposta de sistemas de duas bobinas através de modelamento digital, avaliando os efeitos de frequência, espaçamento entre bobinas, contrastes de resistividade e posição de anomalias. Estudando estes efeitos para 3 arranjos diferentes de bobinas: acoplamento nulo, coaxial e sistema coplanar, verificaram que a orientação coaxial possui maior profundidade de investigação e é de mais simples construção, ao menos para as condições simuladas.

Porém, os perfis de indução tornam-se bastante deficientes com relação à resolução vertical, principalmente quando as camadas consideradas são de menor espessura que o espaçamento entre a bobina transmissora e a bobina receptora, ou quando o contraste de condutividade entre camadas adjacentes for pequeno.

Existem vários métodos que melhoram a resolução vertical destes perfis de indução. Os métodos utilizados são normalmente soluções através de inversões, tal como filtros, ou exaustivas correções utilizando cartas de interpretação.

### **1.4.3. Princípios**

A ferramenta básica do perfil de indução é composta de duas bobinas, transmissora e receptora, acopladas em um mandril mantendo uma distância de aproximadamente 1 metro (40")

uma da outra. Uma corrente alternada de frequência 20 kHz e amplitude constante é injetada na bobina transmissora criando um campo magnético (campo primário) em volta da ferramenta. O campo magnético gera um fluxo circular de correntes, coaxial ao eixo do poço, nas áreas adjacentes ao poço (correntes de Foucault). Estas correntes estão 90° fora de fase com a corrente transmitida (Figura 2), e sua magnitude depende da condutividade das formações adjacentes ao poço. Os loops de correntes criam seus próprios campos magnéticos (campo secundário) que induzem na bobina receptora uma voltagem alternada 90° fora de fase. Selecionando apenas a componente da voltagem que está em fase com a corrente transmitida, o sinal obtido é proporcional a condutividade da formação. A medida dessa voltagem constitui o perfil de indução.

#### 1.4.4. Arranjo de bobinas (sonda com duas bobinas)

No perfil de indução, as bobinas transmissora e receptora devem manter uma orientação e espaçamento fixos com respeito uma da outra durante o levantamento. Pode-se escolher alguns possíveis arranjos da geometria das bobinas. Para simplificar e facilitar as interpretações dos dados, os arranjos das bobinas podem ser: a) acoplamento-nulo (planos das bobinas são perpendiculares), b) bobinas coaxiais e c) bobinas coplanares como mostra a Figura 3:

O arranjo de bobinas de acoplamento-nulo possui a vantagem de eliminar o campo primário na bobina receptora. Isso porque o fluxo do campo magnético primário se propaga paralelo ao plano da bobina receptora. O campo secundário, devido as anomalias, não se propaga geralmente na direção do campo primário. Portanto, alguns dos fluxos dos campos anômalos passam através do plano da bobina receptora, gerando uma corrente que pode ser medida. O arranjo de bobinas de acoplamento-nulo parece ser teoricamente o melhor caminho para a orientação das bobinas, mas na prática ele apresenta alguns problemas. A principal dificuldade é manter as bobinas em uma geometria perpendicular. Pequenos erros, de 10° na orientação permitem que 17% do fluxo primário passe através da bobina receptora, provocando um erro considerável no campo secundário anômalo (Harben et al.,1987). Pode ocorrer também acoplamento do campo primário através do cabo da bobina receptora, novamente uma indicação de erro na presença do campo magnético secundário.

O arranjo de bobinas coplanares requer que a componente do campo primário na bobina receptora seja cancelada. Isso é realizado usando um compensador, o qual é conectado em série com a bobina receptora. O compensador é ajustado para cancelar a amplitude e a fase do campo

primário na bobina receptora. A maior vantagem de usar um compensador é que ele também elimina os acoplamentos de  $\bar{t}$ abo.

A orientação de bobinas que possui os eixos das bobinas transmissora e receptora coincidentes com o eixo do poço é chamada de arranjo coaxial. As bobinas que estão contidas em um mesmo plano com eixos perpendiculares ao eixo do poço são chamadas de arranjo coplanar.

Segundo Harben et al. (1987), bobinas coaxiais não possibilitam a resolução de corpos inclinados anômalos. Entretanto, são investigadas a profundidade e distância lateral do poço. A vantagem das bobinas coaxiais está na simplicidade da orientação e independência da resposta de duas bobinas para posição angular ou rotação dentro do poço, devido a simetria do campo eletromagnético. Devido a isso, o arranjo de bobinas coaxiais é utilizado hoje na perfilagem de poço.

O arranjo de bobinas coplanares apresenta alguma possibilidade de resolução de corpos inclinados bem como a investigação de profundidades e distância lateral. Quando a anomalia é localizada em um lado das bobinas, contudo, muito pouco campo secundário é detectado, daí a orientação das bobinas dentro do poço deve ser seguida. Leituras devem ser tomadas em algumas posições angulares, para proporcionar garantia da discriminação da anomalia sobre todo  $360^\circ$ .

#### 1.4.5. Resposta da sonda de indução (bobinas coaxiais)

No caso particular da sonda com arranjo coaxial de bobinas em um meio homogêneo, o valor do campo elétrico em coordenadas cilíndricas (Moran & Kunz, 1962) é dado por

$$E_\phi(r, z) = -\hat{z} \frac{m_z}{4\pi R^2} (1 + ikR) e^{-ikR} \left( \frac{r}{R} \right), \quad (1)$$

onde  $m_z = I(w)a^2\pi$  é o momento de dipolo magnético,  $R^2 = r^2 + z^2$  e  $r^2 = x^2 + y^2$  (Fig. 1).

Para uma bobina receptora de  $N_r$  espiras e raio  $a$ , a voltagem induzida é simplesmente

$$V(a, L) = 2\pi a N_r E_\phi(a, L), \quad (2)$$

onde  $L$  é a distância entre as bobinas transmissora e receptora. Inserindo o valor de  $E_\phi$ , equação (1), na equação (2), fazendo  $r = a$  e  $R = L$  em (1), pelo fato de  $L \gg a$ , e sabendo-se que

$m_z = \pi a^2 N_t I(w)$ , onde  $N_t$  é o número de espiras da bobina transmissora, teremos para a voltagem induzida na bobina receptora

$$V(a, L) = -i\omega\mu \frac{\pi a^2 N_t N_r I}{4\pi L^3} 2\pi a^2 (1 + ikL) e^{-ikL}. \quad (3)$$

Fazendo então  $K = \frac{(\omega\mu\pi a^2)^2 N_t N_r I(w)}{4\pi L}$ , teremos

$$V(a, L) = \frac{-2iK}{\omega\mu L^2} (1 + ikL) e^{-ikL}, \quad (4)$$

onde  $k^2 = \frac{-2i}{\delta^2}$  e  $\delta^2 = \frac{2}{\omega\mu\sigma}$ . A quantidade  $\delta$  introduzida aqui é o "skin depth", o qual define a ordem de magnitude da profundidade de penetração do campo eletromagnético dentro do condutor.

Substituindo o valor de  $k$  na equação (4), teremos

$$V(a, L) = -i\sigma K \left(\frac{\delta}{L}\right)^2 \left[1 + \frac{L}{\delta}(1+i)\right] e^{-\frac{L}{\delta}(1+i)}. \quad (5)$$

Expandindo em série de potências a exponencial da equação (5) e desprezando as potências mais altas, acharemos

$$V(a, L) = -K\sigma \left[ \frac{\delta^2}{L^2} i + 1 - \frac{2L}{3\delta}(1+i) + \frac{1}{2} \left(\frac{L}{\delta}\right)^2 i - \frac{2}{15} \left(\frac{L}{\delta}\right)^2 (i-1) + \dots \right]. \quad (6)$$

Separando as partes real e imaginária da voltagem (equação 6), encontraremos

$$-V_r = K\sigma \left[ 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{L}{\delta}\right) + \frac{2}{15} \left(\frac{L}{\delta}\right)^3 - \dots \right] \quad (7)$$

e

$$V_x = -\frac{2K}{\omega\mu L^2} \left[ 1 - \frac{2}{3} \left(\frac{L}{\delta}\right)^3 + \frac{1}{2} \left(\frac{L}{\delta}\right)^4 - \dots \right]. \quad (8)$$

Então o valor da condutividade aparente ( $\sigma_a$ ) é dado por

$$\sigma_a = -\frac{V_r}{K} = \sigma \left( 1 - \frac{2L}{3\delta} \right). \quad (9)$$

Se  $\sigma = 0$ , a voltagem,  $V_x$ , dada pela equação (8) é devido ao acoplamento direto entre as bobinas transmissora e receptora. Quando  $\sigma$  cresce,  $V_x$ , a componente 90 graus fora de fase com a corrente

do transmissor (I), decresce. Enquanto que  $V_r$ , a componente em fase com a corrente do transmissor, cresce.

Fazendo portanto a razão entre as equações (7) e (8), teremos

$$-\frac{V_r}{V_x} = \frac{[1 - \frac{2}{3}\frac{L}{\delta} + \frac{2}{15}(\frac{L}{\delta})^3 - \dots]}{\frac{\delta^2}{L^2}[1 - \frac{2}{3}(\frac{L}{\delta})^3 + \dots]}, \quad (10)$$

e impondo a condição prática do perfil de indução, poço com lama resistiva e baixas frequências,  $\frac{L}{\delta} \ll 1$ , tem-se que  $-\frac{V_r}{V_x} \ll 1$ . Isso mostra, portanto, a grande dificuldade na separação dos dois sinais, e consequentemente de instrumentação.  $V_r$  possui, muitas vezes, a mesma magnitude de um ruído, ocasionando mais uma vez problemas de instrumentação.

A equação (6) é, portanto, a resposta de uma sonda de duas bobinas coaxiais para um meio homogêneo, isotrópico e ilimitado. A componente  $V_r$  da voltagem, mostra informações sobre o meio através de sua condutividade. E é através da resistividade, inverso da condutividade, que se apresentam os perfis de indução.

#### 1.4.6. Resposta da sonda de indução (bobinas coplanares)

Partiremos com a equação da componente  $H_z$  do campo magnético, relativa ao campo magnético de um loop em um meio homogêneo e isotrópico, para analisar a resposta da sonda com o arranjo de bobinas coplanares. A equação do campo magnético em coordenadas cilíndricas (Rijo, 1990) é dada por

$$H_z(r, z) = \frac{m_z}{4\pi R^5} [(3 + 3ikR - k^2 R^2)z^2 - (1 + ikR - k^2 R^2)R^2] e^{-ikR}, \quad (11)$$

onde o momento de dipolo magnético é dado por

$$m_z = \pi a^2 N_t I(w)$$

e

$$R^2 = r^2 + z^2.$$

Calculando o campo magnético no centro (r,z) da bobina receptora do arranjo coplanar, onde  $R = r = L$  e  $z = 0$ , teremos

$$H_z(L, 0) = -\frac{m_z}{4\pi L^3} [1 + ikL - k^2 L^2] e^{-ikL}, \quad (12)$$

então, a voltagem no ponto ( $r = L, z = 0$ ) é

$$V(L, 0) = -i\omega\mu H_z(L, 0)a^2\pi N_r. \quad (13)$$

Substituindo o valor do campo magnético (equação 12) na equação (13), teremos para a voltagem induzida na bobina receptora

$$V(L, 0) = i \left( \frac{(\omega\mu\pi a^2)^2 N_t N_r I}{8\pi L} \right) \sigma \left( \frac{\delta}{L} \right)^2 \left[ 1 + ikL + (ikL)^2 \right] e^{-ikL}.$$

Fazendo então  $K = \frac{(\omega\mu\pi a^2)^2 N_t N_r I(\omega)}{8\pi L}$ , teremos

$$V(L, 0) = iK\sigma \left( \frac{\delta}{L} \right)^2 \left[ 1 + ikL + (ikL)^2 \right] e^{-ikL}. \quad (14)$$

Devemos salientar que, devido a diferença na geometria dos dois arranjos de bobinas, o valor da constante da ferramenta K é diferente para os dois sistemas, ou seja

$$K_{coplanar} = \frac{1}{2} K_{coaxial}.$$

Fazendo  $ikL = \frac{L}{\delta}(1+i)$  na equação (14), encontraremos

$$V(L, 0) = iK\sigma \left[ \left( \frac{\delta}{L} \right)^2 + \frac{\delta}{L}(1+i) + 2i \right] e^{-\frac{L}{\delta}(1+i)}. \quad (15)$$

Expandindo em série de potências a exponencial em (15) e desprezando as potências mais altas, acharemos

$$V(L, 0) = -K\sigma \left[ -\left( \frac{\delta}{L} \right)^2 i + 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{L}{\delta} \right) (1+i) + \frac{3}{2} \left( \frac{L}{\delta} \right)^2 i + \frac{8}{15} \left( \frac{L}{\delta} \right)^3 (1-i) - \dots \right]. \quad (16)$$

Separando as partes real e imaginária da voltagem (equação 16), teremos

$$-V_r = K\sigma \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{L}{\delta} \right) + \frac{8}{15} \left( \frac{L}{\delta} \right)^3 - \dots \right]$$

e

$$V_x = \frac{K\sigma\delta^2}{L^2} \left[ 1 + \frac{4}{3} \left( \frac{L}{\delta} \right)^3 - \frac{3}{2} \left( \frac{L}{\delta} \right)^4 + \frac{8}{15} \left( \frac{L}{\delta} \right)^5 - \dots \right].$$

Desprezando as potências mais altas de  $\frac{L}{\delta}$ , teremos que a condutividade aparente para o arranjo coplanar é dada por

$$\sigma_a = -\frac{V_r}{K} = \sigma \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{L}{\delta} \right) \right]. \quad (17)$$

#### 1.4.7. Teoria do fator geométrico

Iremos estudar as ferramentas de poço que utilizam o princípio da indução, através de uma abordagem conhecida como teoria do fator geométrico. Esta teoria é rigorosamente correta apenas no limite quando a frequência é zero ou a resistividade é infinita. Para o perfil de indução, onde utiliza-se baixas frequências (20kHz), pode-se obter resultados satisfatórios para a componente da voltagem na bobina receptora.

Doll (1949) explicou a resposta do perfil de indução com a sua teoria do fator geométrico. A voltagem na bobina receptora é a soma da contribuição de grande número de anéis infinitesimais de correntes de Foucault. Usando a lei de Biot-Savart, Doll demonstrou a contribuição de um anel com área de seção transversal unitária, de raio  $r$ , e situada a uma distância  $z$  do ponto médio entre as duas bobinas Figura 4, como

$$V_r = \left[ \frac{\mu^2 w^2 A_T A_R I_T}{4\pi L} \right] \cdot \left[ \frac{L}{2} \cdot \frac{r^3}{(r^2 + (\frac{L}{2} - z)^2)^{3/2} (r^2 + (\frac{L}{2} + z)^2)^{3/2}} \right] \sigma(r, z).$$

Todos os parametros entre o primeiro par de parenteses descrevem sobre a ferramenta, e Doll chamou esse termo de constante da ferramenta (K) onde

$L =$  distância entre as bobinas transmissora e receptora,

$A_T =$  produto da área pelo número de voltas da bobina transmissora,

$A_R =$  produto da área pelo número de voltas da bobina receptora,

$I_T =$  amplitude máxima da corrente no transmissor e

$r, z =$  coordenadas cilíndricas do anel unitário.

O segundo par de parenteses contém informações da posição do anel unitário. Doll chamou este termo de fator geométrico,  $g(r, z)$ . O último termo,  $\sigma(r, z)$ , é a condutividade da formação dentro do anel, assumida constante.

Escrevendo K como a constante da sonda e  $g(r, z)$  para o fator geométrico, a expressão para um anel torna-se

$$V_r = K g(r, z) \sigma(r, z).$$

Para um infinito número de anéis, cada um especificado por seus valores em  $r$  e  $z$ , contribuindo para a voltagem no receptor, a resposta da ferramenta é a integral dupla:

$$V_r = K \int_{z=-\infty}^{z=+\infty} \int_{r=0}^{r=+\infty} g(r, z) \sigma(r, z) dr dz.$$

Podemos então estender essa equação para cobrir o caso de algumas zonas cilíndricas coaxiais de diferentes condutividades no poço (zona lavada, zona de transição e zona virgem)

$$V_r = K \left[ \sigma_a \int \int_a g(r, z) dr dz + \sigma_b \int \int_b g(r, z) dr dz + \dots \right].$$

onde  $a, b, \dots$  são as zonas coaxiais. Isso torna

$$V_r = K [\sigma_a G_a + \sigma_b G_b + \dots],$$

onde

$$G_a = \int \int_a g(r, z) dr dz,$$

$$G_b = \int \int_b g(r, z) dr dz,$$

e assim em diante.

$G_a, G_b, \dots$  são os fatores geométricos das zonas  $a, b, \dots$ , respectivamente. Suas magnitudes dependem das dimensões e posições das respectivas zonas, e elas representam a fração de contribuição de cada zona para o sinal total, assumindo uma condutividade uniforme dentro de cada zona.

O perfil de indução é uma medida de  $V_r/K$ , chamada de condutividade aparente da formação ( $\sigma_{ap}$ ), dada por

$$\sigma_{ap} = V_r/K = \sigma_a G_a + \sigma_b G_b + \dots,$$

onde temos que

$$G_a + G_b + \dots = 1.$$

Da equação acima, percebemos que quanto mais alta a condutividade da zona, maior será sua contribuição para  $\sigma_{ap}$ , para um dado fator geométrico.

#### a) Característica da investigação lateral

O fator geométrico de um meio homogêneo contido entre dois cilindros, coaxiais ao eixo do poço, de raios  $r$  e  $r+dr$ , estendendo verticalmente de  $-\infty$  até  $+\infty$ , é escrito como

$$g(r) = \int_{z=-\infty}^{z=+\infty} g(r, z) dz.$$

A integral em  $z$  é resolvida em termos de integrais elípticas tabulares que permitem o cálculo da função mostrada na Figura 5. Podemos observar que a posição radial em relação à sonda que contribui com a maior quantidade de informação está situada a uma distância de aproximadamente  $L/2$  do eixo da sonda, porém, para distâncias  $r > 3L$  as contribuições não são insignificantes.

#### b) Característica da investigação vertical

O fator geométrico vertical, em uma distância vertical  $z$  do ponto médio da sonda, é definido como

$$g(z) = \int_{r=0}^{r=\infty} g(r, z) dr.$$

A função  $g(z)$ , mostrada na Figura 6, representa as contribuições de discos de extensão radial infinita e tem a forma dada pelas equações a seguir:

$$g(z) = \frac{1}{2L} \quad \text{para} \quad |z| < \frac{L}{2}$$

e

$$g(z) = \frac{1}{8z^2} \quad \text{para} \quad |z| > \frac{L}{2}.$$

Através do gráfico da função  $g(z)$ , Figura 6, podemos observar que a resolução vertical da ferramenta em questão é aproximadamente  $L$  ou  $2L$ , conforme o grau de resolução requerido, pois é fácil observar que uma camada que possui espessura  $2L$  terá uma resolução melhor que uma camada que possui espessura  $L$ . Devido ao fato de que a condutividade de uma camada para outra

pode sofrer variações da ordem de  $10^4$ , a função  $g(z)$  não pode ser ignorada mesmo para valores de  $z > 10L$  onde o valor de  $g(z)$  é pequeno. Portanto uma camada altamente condutiva, mesmo a uma distância considerável, acima ou abaixo da sonda pode contribuir mais para o sinal recebido do que uma camada de menor condutividade nas proximidades do ponto de medida (centro da ferramenta, ponto 0 da Fig. 4).

Em um meio isotrópico, homogêneo e infinito ( $\sigma$  constante) a equação

$$V_r = K \int_{z=-\infty}^{z=+\infty} \int_{r=0}^{r=+\infty} g(r, z) \sigma(r, z) dr dz,$$

se reduz a  $V_r/K = \sigma_t$ , onde  $\sigma_t$  é a condutividade da zona virgem, enquanto que, para o caso usual de formações invadidas ou laminadas, é conveniente definir uma condutividade aparente  $\sigma_{ap} = V_r/K$  para cada profundidade, onde  $V_r$  corresponde a voltagem medida nos terminais da bobina receptora. Porém, quando a ferramenta se encontra defronte a uma formação não invadida de espessura suficientemente grande, teremos que  $\sigma_{ap} = \sigma_t$ .

## CAPÍTULO 2

### MODELAMENTO ANALÓGICO ELETROMAGNÉTICO - CONJUNTO EXPERIMENTAL

Modelo em escala reduzida é uma técnica bastante eficiente e prática para estudar a resposta de sondas em poço. Uma das grandes vantagens do modelamento analógico em escala reduzida é poder verificar cálculos de respostas teóricas, que no caso de ambientes em escala natural seria muito difícil e oneroso.

A relação de similitude é que garante a utilização dos modelos em escala reduzida, de forma que um sistema modelo pode reproduzir precisamente a configuração geométrica das linhas de força do sistema real. Podemos então variar a escala de acordo com nossas necessidades mantendo as devidas proporções e obedecendo os parâmetros da equação de similitude.

#### 2.1. Relações de similitude

Partindo da linearidade das equações de Maxwell no domínio da frequência, que permitem a utilização de escalas de modelamento lineares, temos que o campo eletromagnético no sistema modelo é dado por

$$\nabla_m^2 \vec{H}_m - k_m^2 \vec{H}_m = 0$$

e

$$\nabla_m^2 \vec{E}_m - k_m^2 \vec{E}_m = 0, \quad (18)$$

para a escala real teremos

$$\nabla_r^2 \vec{H}_r - k_r^2 \vec{H}_r = 0$$

e

$$\nabla_r^2 \vec{E}_r - k_r^2 \vec{E}_r = 0, \quad (19)$$

onde  $\nabla_m^2$  é o operador laplaciano referido às coordenadas  $(x_m, y_m, z_m)$  e  $\nabla_r^2$  é o operador laplaciano referido às coordenadas  $(x_r, y_r, z_r)$ . Também existem relações lineares das escalas, onde

$$l = \frac{x_r}{x_m} = \frac{y_r}{y_m} = \frac{z_r}{z_m},$$

$$\begin{aligned}\vec{E}_r(x_r, y_r, z_r, t_r) &= a\vec{E}_m(x_m, y_m, z_m, t_m), \\ \vec{H}_r(x_r, y_r, z_r, t_r) &= b\vec{H}_m(x_m, y_m, z_m, t_m) \text{ e} \\ g &= \frac{w_m}{w_r} = \frac{f_m}{f_r} = \frac{T_r}{T_m},\end{aligned}\tag{20}$$

sendo  $l, a, b$  e  $g$  os fatores de escala linear, campo elétrico, campo magnético e tempo, respectivamente. Podemos então concluir que

$$\nabla_r^2 = \frac{1}{l^2} \nabla_m^2.\tag{21}$$

Manipulando apenas com o campo elétrico nas equações (18) e (19), se escolhessemos o campo magnético encontraríamos o mesmo resultado. Teremos

$$\frac{\nabla_m^2 \vec{E}_m}{\nabla_r^2 \vec{E}_r} = \frac{k_m^2 \vec{E}_m}{k_r^2 \vec{E}_r}.\tag{22}$$

Substituindo os resultados de (20) em (22), encontraremos

$$k_r^2 = \frac{k_m^2}{l^2},$$

onde

$$k_r^2 = iw_r \mu_r \sigma_r$$

e

$$k_m^2 = iw_m \mu_m \sigma_m,$$

para uma aproximação quase-estática. Então concluímos que

$$w_m \mu_m \sigma_m = l^2 w_r \mu_r \sigma_r.\tag{23}$$

O fator de escala  $l$  é igual a  $\frac{l_r}{l_m}$ , onde

$l_r$  = dimensão linear característica no sistema real e

$l_m$  = dimensão linear correspondente no sistema modelo.

Com isso achamos o número de indução ( $\alpha$ ) que é a condição de similitude para o laboratório, dado

por

$$\alpha = w_m \mu_m \sigma_m l_m^2 = w_r \mu_r \sigma_r l_r^2.\tag{24}$$

Normalmente, a permeabilidade magnética relativa dos materiais escolhidos é aproximadamente igual a do vácuo, resultando uma equação de similitude ainda mais simples, reduzindo-se a

$$w_m \sigma_m = l^2 w_r \sigma_r.$$

## 2.2. Aproximações físicas

O sistema modelo foi projetado para possuir camadas espessas, evitando assim influências de camadas adjacentes nas medidas. Desta forma, uma camada a ser considerada infinitamente espessa possuirá, no modelo geológico, um comprimento  $\geq$  a  $13L$  paralelamente ao poço e  $\geq$  a  $5L$  radialmente ao mesmo, onde  $L$  é o espaçamento entre bobinas. A validade destas aproximações é analisada mais detalhadamente pela teoria do fator geométrico de Doll.

Outra aproximação é a necessidade que as bobinas se comportem como pequenos dipolos magnéticos. Então foram feitos testes (Salvadoretti, 1990) para comprovar o esperado decaimento da amplitude do campo primário com o inverso do cubo do espaçamento entre bobinas. Os resultados foram satisfatórios, chegando em média a erros de 2%.

## 2.3. Descrição do modelo geológico simulado

O modelo físico simulando condições de poço e de geologia na escala reduzida foi montado em um tanque de fibra de vidro, de dimensões internas iguais a 0,6 m de altura, 1,0 m de largura e 2,6 m de comprimento. Seu interior foi dividido em 5 compartimentos, no sentido perpendicular ao comprimento (Fig. 8). O compartimento 1 tem dimensão de 0,30 m, enquanto que os compartimentos 2,3 e 4 possuem dimensões iguais a 0,65 m e o compartimento 5 tem dimensão de 0,35 m. As divisórias entre os compartimentos 1-2 e 3-4 são de PVC com 1,0 cm de espessura e as divisórias dos compartimentos 2-3 e 3-4 são de vidro com 0,5 cm de espessura.

O primeiro e o quinto compartimentos ficam vazios para o cancelamento do campo primário e alojam as polias que direcionam a sonda durante a coleta de dados. Nos compartimentos 2 e 3 existem 3 tubulações de PVC concêntricas. A primeira tubulação, mais interna, simula o poço, onde a sonda move efetuando as medidas. Seu diâmetro interno é de 1,4 cm ( $0,28L$ ), onde  $L$  é a distância de centro a centro entre as bobinas e vale 5 cm. A região entre a primeira e segunda tubulações é preenchida com solução de cloreto de amônia ( $NH_4Cl$ ), de forma a simular a zona

lavada, com diâmetro igual a 5 cm (1L). O espaço entre a segunda e terceira tubulações, também preenchidos com solução de cloreto de amônia, representa a zona de transição com diâmetro igual a 10 cm (2L). O tanque foi dimensionado de modo a obter grande parte da resposta do arranjo de duas bobinas.

O quarto compartimento contém apenas a tubulação mais interna e serve para calibração da sonda.

Toda a vedação dos compartimentos e tubulações foi feita com manta de fibra de vidro aplicada com resina de poliéster e cola de silicone, para garantir uma perfeita vedação.

As regiões que representam as zonas lavada e de transição são abastecidas por solução salina através de mangueiras (Fig. 8b).

Para algumas situações, foi colocada uma placa de alumínio de espessura igual a 0,1 cm simulando uma zona condutiva. A placa de alumínio foi colocada no centro do compartimento 3 no sentido perpendicular ao comprimento do tanque.

#### 2.4. Instrumentação

A parte mais crítica do trabalho foi a do desenvolvimento de instrumentação, devido ao campo primário ser três ordens de grandeza maior do que o campo secundário, que possui baixo nível, exigindo uma sensibilidade muito grande por parte do sistema de recepção. Isso foi visto com detalhe pela equação (10). Para se ter uma idéia, tomando os valores intermediários utilizados  $\sigma = 2 S/m$ ,  $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ ,  $f = 75 kHz$  e  $L = 5 \times 10^{-2} m$ , a equação (10) fornece a razão  $-\frac{V_r}{V_x} = 1,5 \times 10^{-3}$ . Esta é aproximadamente a razão entre as magnitudes do campo secundário e primário sobre a bobina receptora, dando uma idéia das dificuldades a serem superadas em instrumentação e dos cuidados a serem tomados para se detectar o sinal secundário. Devemos ter cuidado com as blindagens eletrostáticas nas bobinas e cabos, diminuindo o efeito capacitivo entre as bobinas e a solução condutiva. Outro cuidado que se deve ter é com a separação dos sistemas de recepção e transmissão, pois pequenos ruídos podem possuir a mesma magnitude do sinal secundário.

Os equipamentos estão organizados basicamente em 3 sistemas: de transmissão, a sonda e de recepção. Todos os equipamentos, exceto a sonda, foram colocados em ambiente isolado a

uma temperatura ideal, evitando umidade e possíveis vapores corrosivos desprendidos pelo líquido contido no tanque, capazes de danificar seus componentes eletrônicos.

A Figura 9 mostra o diagrama de blocos do sistema elétrico.

#### 2.4.1. Sistema de transmissão

O sistema de transmissão é formado por um oscilador senoidal que fornece diretamente uma corrente senoidal a bobina transmissora  $T_x$ .

O oscilador utilizado é de fabricação da General Radio (USA), modelo GR-1316, e trabalha numa faixa de frequência de 10 Hz a 110 kHz. A potência máxima de saída do equipamento é igual 1,6 watts. A faixa da voltagem de saída varia na ordem de 0 a 150 volts. Além da transmissão o oscilador fornece voltagem para o compensador e as referências de fase e quadratura ( $1,25 \pm 0,2V_{rms}$ ) ao detector de fase.

O sistema elétrico foi implementado para trabalhar na faixa de 50 kHz a 110 kHz.

#### 2.4.2. Sonda

As sondas foram feitas de acrílico com 1,4 cm de diâmetro e comprimento total de 27 cm. Há uma rosca central (Fig.10) que permite separá-las em duas partes independentes, facilitando assim a colocação da ferramenta no tanque e possibilitando o aumento entre bobinas para eventuais testes.

As bobinas no arranjo coaxial são enroladas no próprio mandril, enquanto que as bobinas no arranjo coplanar são enroladas em peças separadas, também de acrílico, e depois colocadas no mandril na posição coplanar como indica a Fig.10c. A sonda do arranjo coaxial está mostrada na Figura 10a e a sonda de acoplamento mínimo na Figura 10b.

Todas as bobinas foram enroladas com 70 espiras de fio esmaltado bitola A.W.G. nº 29, e elas possuem um raio médio de 0,7 cm e indutância de  $34 \mu H$ .

Como o sensor é a parte mais crítica no funcionamento do sistema como um todo, cuidados foram tomados com as blindagens eletrostáticas das bobinas (Fig.11a). Tentamos assim evitar o acoplamento capacitivo entre as bobinas transmissora e receptora e também entre bobinas e soluções salinas, quando o mandril penetra no tanque com solução salina. Para blindar as bobinas

do arranjo coaxial, foi colocada uma fita de papel alumínio sobre o mandril antes da bobina ser enrolada, formando um anel. Esta fita deve ser colocada de modo que suas extremidades não entrem em contato fechando o circuito. Após a bobina ser enrolada, uma blindagem externa é colocada de modo idêntico à interna. Feito isso, as duas blindagens são conectadas ao aterramento como mostra a Fig.11b. A blindagem das bobinas do arranjo coplanar (Fig.11c) seguiu o mesmo método do arranjo coaxial, mas com a colocação de papel alumínio também nas partes inferiores e superiores das bobinas, pois no arranjo coplanar as bobinas não fazem parte do mandril (Fig.10c).

A movimentação da sonda para a perfilagem é feita através de um motor de passo localizado numa das extremidades do tanque (Fig.8a). A velocidade de perfilagem é variável, e o valor mais apropriado está em torno de 0,5 m/minuto.

A polia do motor de passo contém um pequeno imã que aciona um read-relé a cada volta da polia. O read-relé está acoplado ao marcador de eventos do registrador gráfico, permitindo desta forma conhecer-se a posição das bobinas no modelo geológico.

#### 2.4.3. Sistema de recepção

O sistema de recepção é formado de: bobina receptora  $R_x$ , compensador, pré-amplificador, amplificador, atenuador, detector de fase e registrador gráfico.

a) A bobina receptora, descrita na secção 2.4.2, capta o campo secundário (campo anômalo) em nível muito baixo na ordem de  $10^{-5}$  V e envia para o pré-amplificador.

b) O pré-amplificador tem como funções principais aumentar o nível de sinal recebido da bobina receptora e cancelar o campo primário usando o sinal enviado pelo compensador.

O pré-amplificador trabalha com um ganho de 20 dB (10 vezes). O nível de ruído é de aproximadamente 1  $\mu$ V pico-a-pico. A alimentação é feita por duas baterias de 9 V para garantir melhor isolamento do sistema e, conseqüentemente, menor nível de ruído.

c) Devido o campo primário ser muitas vezes maior do que o campo secundário, ele deve ser anulado. Por esta razão, construiu-se (Salvadoretti, 1990) um circuito compensador para cancelamento do campo primário. O compensador recebe o sinal senoidal proveniente do oscilador e ajusta as magnitudes das componentes de fase e quadratura. Então, o compensador consegue

produzir um sinal de mesma fase e mesma amplitude, mas de sinal contrário, da voltagem gerada na bobina receptora devido ao campo primário.

O sinal produzido pelo compensador é então enviado para o pré-amplificador, onde será comparado com o sinal recebido pela bobina receptora devido ao campo primário, de forma que a voltagem resultante seja nula.

O controle para o cancelamento das componentes de fase e quadratura do campo primário no compensador é feito por 4 potenciômetros, um de  $10\text{ k}\Omega$  para ajuste grosso e  $100\ \Omega$  para ajuste fino referente ao cancelamento da fase, existindo mais dois potenciômetros de mesmos valores para o cancelamento da amplitude.

d) O sinal sai do pré-amplificador e é acoplado a um amplificador de maior potência. O amplificador, modelo Tektronix AM-502, fornece um ganho de até 500 vezes. O sinal então saindo do amplificador segue para um atenuador Tektronix, modelo 2701.

e) O atenuador Tektronix 2701 tem como função reduzir o sinal primário antes da execução do cancelamento, de modo a se calibrarem as amplitudes dos sinais de referência em fase e quadratura com relação ao campo primário. O atenuador possui uma escala que varia de 0 dB a 79 dB e que pode ser posicionada sem que haja giro de fase apreciável no sinal.

A presença do atenuador no sistema de recepção se faz necessária pois, devido ao sinal primário ser da ordem  $10^3$  maior que o secundário, quando a sensibilidade necessária para o registro do sinal secundário fosse atingida, o primário já teria saturado o circuito de entrada do analisador de fase. Da mesma forma, o ganho do detector de fase não poderia ser aumentado gradualmente após a execução do cancelamento, pois observou-se que a mudança do ganho é acompanhada de mudança de fase do sinal, desfazendo-se a calibração inicial das amplitudes dos sinais de referência.

f) O detector de fase, modelo GR-1238, fabricado pela General Radio (USA), recebe as componentes de referência do oscilador. As componentes de referência são calibradas de modo a serem iguais a f.e.m. produzida pelo campo primário e respondem a qualquer variação devido a presença de sinais desconhecidos. As leituras são mostradas em uma escala de 10 divisões no visor. Então, esta escala é uma medida do campo secundário anômalo relativa ao campo primário, ou seja,  $S/P$ .

g) Os resultados obtidos no detector de fase seguem para um registrador gráfico de dois canais, modelo RB102, da ECB do Brasil. O registro dos resultados pode ser realizado em 24 diferentes velocidades numa carta de largura 25 cm. O registrador conta ainda com um marcador de eventos que permite posicionar o sistema de bobinas com respeito às leituras obtidas.

## 2.5. Processo de medida

### 2.5.1. Calibrações

O primeiro passo é colocar a sonda no ar, mais distante possível da primeira camada, no mínimo de 3L da primeira interface. Isso é feito para garantir apenas a influência do campo primário na bobina receptora.

Posiciona-se o atenuador em 40 dB (atenuação de 100 vezes). Ajusta-se o oscilador e o amplificador AM-502 de tal forma que o campo primário atinja o fundo de escala no registrador gráfico. As 10 divisões da escala do detector de fase correspondem, portanto, a 100% do campo primário.

Ajusta-se as voltagens em fase e quadratura fornecidas pelo oscilador (sistema de referência) ao detector de fase, de modo a ficarem iguais a voltagem produzida pelo campo primário na bobina receptora. Isso é feito colocando a componente em fase do sinal de referência em quadratura (90 graus fora de fase) com o campo primário por meio do deslocador de fase do detector de fase. Neste caso, a pena do registrador gráfico que corresponde a componente em fase é colocada na posição zero e a componente em quadratura em uma posição qualquer escolhida, correspondente a 100% do campo primário, no papel de registro. Em seguida, gira-se o sinal de referência em 90°, de modo que o sinal em fase do oscilador fique em fase com campo primário atenuado. Agora a componente em quadratura é colocada na posição zero e a componente em fase na posição correspondente a 100%.

Após estes passos, as penas podem ser levadas a uma posição escolhida como base para leitura, pois a escala está calibrada.

O próximo passo agora é efetuar o cancelamento do campo primário. Liga-se o compensador e ajusta-se as componentes em fase e quadratura na posição zero no detector de fase. Retira-se a atenuação gradativamente e continua-se a cancelar o campo primário com o compensador, até que

retire-se toda a atenuação. Após a retirada de toda a atenuação, o sistema estará com a máxima sensibilidade e o fundo de escala no detector de fase corresponderá a 1% do campo primário, onde as componentes serão nulas na ausência do campo secundário, ou seja, o sinal de referência não acusará variações sempre que houver apenas o campo primário. Desta forma, o sistema está pronto para fazer medidas e qualquer campo secundário anômalo induzirá a bobina receptora e será decomposto em suas componentes em fase e quadratura.

### 2.5.2. Medições

Após a calibração, as medidas são tomadas e analisadas de acordo com o quociente entre o campo secundário e o primário ( $S/P$ ) em termos de porcentagem. No apêndice mostraremos como pode ser convertida esta escala para uma escala linear de condutividade aparente, pois o quociente  $S/P$  é diretamente proporcional a condutividade do meio.

### 2.5.3. Erros na simulação

É de grande importância a identificação de possíveis erros que possam influenciar diretamente nas medidas, para que em futuros trabalhos eles possam ser minimizados.

#### a) erro devido às dimensões das bobinas

As bobinas, no caso da sonda de indução, devem comportar-se como pequenos dipolos. No nosso caso, elas possuem dimensões maiores que as ideais, mas obedecendo ainda o decaimento do campo com o aumento da distância entre bobinas, correspondendo ao comportamento de um campo dipolar.

#### b) erro devido a presença de material não condutivo usado no modelamento

Existe a redução do sinal secundário devido à interposição das canalizações de PVC, nas quais não há formação de correntes secundárias devido à baixa condutividade do material.

A presença das canalizações de PVC reduzem em menos de 4% o sinal que chega à bobina receptora.

#### c) erro devido à calibração

Durante o processo de calibração a sonda, embora esteja a uma distância considerável das

soluções, pode sofrer influência pela presença de soluções salinas na sua vizinhança. Este erro pode ser estimado em menos de 2%.

d) erro devido à blindagem eletrostática

A blindagem eletrostática pode alterar a resposta da sonda, e esse erro é de difícil quantificação. Uma melhor blindagem pode ser conseguida com uma malha de fio fino esmaltado, usando solda para melhor contato com as fiações de aterramento, em substituição ao papel alumínio que foi usado, pois o papel alumínio atenua muito o sinal recebido na bobina receptora.

e) erro devido ao efeito da parede do tanque

O erro devido ao efeito provocado pelas reflexões do campo eletromagnético, produzido na bobina receptora, proveniente da proximidade da parede do tanque, pode ser negligenciado. A relação entre a voltagem gerada na bobina receptora por uma reflexão total do primário no fundo do tanque (parede mais próxima) e pelo primário é  $\leq 0,1\%$ . Mas como a reflexão não é total e ocorre atenuação devido ao "skin effect", este erro chega a ser muito menor que 0,1%.

f) erro na medida da condutividade

O erro na medida da condutividade da solução é na ordem de 1%. Cuidados para homogeneizar bem as soluções foram tomados, pois as concentrações de sais utilizadas são muito altas. O aparelho, modelo CM-6A de fabricação da TOA Electronics LTD, utilizado para medir a condutividade das soluções é de boa precisão e usamos uma célula para medir altas condutividades de soluções com constante de célula igual a 10.

Por último, temos os erros ocasionados pela leitura das cartas do registrador gráfico que podem chegar até a 10%, principalmente quando o conjunto perfila nas frequências mais baixas, onde as amplitudes das medidas são menores.

Tomando o efeito conjunto de todos os fatores responsáveis por erros, as leituras podem ser afetadas em até 12% em casos extremos.

## CAPÍTULO 3

## ANÁLISE DE RESULTADOS

## 3.1. Descrição geológica dos modelos estudados

Os modelos geológicos estudados no laboratório, através de simulação eletromagnética em escala reduzida (20:1), estão sucintamente descritos na Tabela I e ilustrados nas Figuras 12, 13 e 14.

Tabela I. Descrição dos modelos geológicos e E.M.-reduzidos.

MODELO GEOLÓGICO				MOD. EM-REDUZIDO $\sigma$ (S/m) (esc. 20:1)		
MOD.	COMP.	LITOLOGIA	COND. (S/m)	ZONA LAVADA	ZONA DE TRANSIÇÃO	ZONA VIRGEM
1	4	folhelho	0,25	20	20	20
	3	arenito com HC	0,05	1,6	2,7	4
	2	arenito com água	0,25	8	10	20
2	4	folhelho	0,25	20	20	20
	3	arenito com HC	0,05	1,6	20	4
	2	arenito com água	0,25	8	10	20
3	4	folhelho	0,25	20	20	20
	3	calcário com HC	0,025	0,8	1	2
	2	calcário com água	0,05	1,6	3	4
4	4	folhelho	0,25	20	20	20
	3	calcário com HC	0,025	0,8	8	2
	2	calcário com água	0,05	1,6	3	4

MODELO GEOLÓGICO					MOD. EM-REDUZIDO $\sigma$ (S/m) (esc. 20:1)		
MOD.	LITOLOGIA	COND.(S/m) FOLHELHO	COND.(S/m) ROCHA COM HC	COND.(S/m) SULFETO	FOLHELHO	ROCHA COM HC	SULFETO
5	folhelho intercalado de rocha com HC	0,07	0	-	5	0	-
6	folhelho intercalado de rocha com HC e camada de sulfeto	0,07	0	$3 \times 10^3$	5	0	$3 \times 10^5$

Os modelos geológicos (1) e (2) representam um arenito poroso (reservatório), sobreposto por um folhelho. O arenito está subdividido em duas zonas. A primeira zona, compartimento 3, representa o arenito contendo hidrocarboneto e água residual. A segunda zona, compartimento 2, representa o arenito contendo água conata de alta condutividade. Estas zonas estão representadas no modelo E.M.-reduzido por soluções salinas de condutividades diferentes. O folhelho está representado por uma condutividade de 20 S/m, o arenito contendo hidrocarboneto por 4 S/m e o arenito contendo água conata por 20 S/m.

Existem ainda nos compartimentos 2 e 3, próximo a parede do poço, divisões com diferentes condutividades simulando as zonas lavada e de transição, que são formadas pela invasão do filtrado da lama na rocha reservatório, como mostra a Figura 12a.

O modelo geológico (2) representa o mesmo reservatório que está representado no modelo (1), apenas com a modificação no modelo E.M.-reduzido, na zona de transição do compartimento 3, passando a condutividade da solução de 2,7 S/m para 20 S/m, visando a simulação do perfil de invasão tipo "annulus" indicado na Fig. 12b.

Os modelos geológicos (3) e (4) representam um calcário com baixa porosidade (reservatório), sobreposto por um folhelho (rocha selante). O calcário está subdividido em duas zonas distintas. A primeira zona, compartimento 3, representa o calcário contendo hidrocarboneto mais água residual. A segunda zona, compartimento 2, representa o calcário contendo água conata. Estas zonas estão representadas no modelo E.M.-reduzido por: o folhelho está representado por uma solução de 20 S/m, o calcário contendo hidrocarboneto por 2 S/m e o calcário contendo água conata por 4 S/m (Fig. 13a).

O modelo geológico (4) representa o mesmo reservatório mostrado no modelo (3), apenas com a modificação no modelo E.M.-reduzido, na zona de transição do compartimento 3, passando a condutividade da solução de 1 S/m para 8 S/m, simulando o perfil de invasão tipo "annulus", como mostra a Figura 13b.

Os modelos (5) e (6) foram propostos para verificação, com mais detalhe, da resolução vertical dos dois tipos de arranjos de bobinas. O modelo geológico (5) mostra um folhelho, que está simulado no modelo E.M.-reduzido por uma solução de 5 S/m, intercalado por camadas finas

de rochas com hidrocarbonetos de baixa condutividade, e estão representadas no modelo E.M.-reduzido por placas de vidro de espessura 0,5 cm e de condutividade próxima a zero (Fig. 14a).

O modelo (6) representa o mesmo folhelho intercalado por camadas finas de rochas com óleo, com o acréscimo de uma camada fina de sulfeto, no centro do compartimento 3, e está representado no modelo E.M.-reduzido por uma placa de alumínio de condutividade igual a  $3 \times 10^5$  S/m (Fig. 14b).

### 3.2. Análise das respostas

#### 3.2.1. Efeito da variação de frequência nas respostas

Comparando a resposta do modelo 2 com respeito as frequências de 100, 80 e 60 kHz, referentes aos arranjos coaxial e coplanar, Figuras 15 e 16, verificamos o aumento da amplitude da componente em fase com o aumento da frequência. Verificamos também que a frequência de 100 kHz apresentou melhor resolução do que as frequências mais baixas. Quanto maior a frequência, maior a amplitude do sinal e conseqüentemente melhor a precisão do registrador gráfico, principalmente para os perfis com maior detalhes (arranjo coplanar). A componente em quadratura, por possuir menor amplitude, é mais evidenciada na frequência de 100 kHz. Portanto chegamos a conclusão que a frequência ideal para o nosso sistema modelo é em torno de 100 kHz e utilizaremos esta frequência para a análise dos modelos sugeridos.

Observamos também que há uma pequena rotação na fase ( $\theta$ ) do sinal com a mudança da frequência para altos valores de condutividade. Teoricamente, há também um giro na fase do sinal para baixos valores de condutividade, mas estes valores são muito pequenos e não são sensíveis ao nosso sistema. A Tabela II mostra os valores de  $\theta$  para a resposta dos arranjos coaxial e coplanar do modelo 2, compartimento 4 de condutividade 20 S/m.

**Tabela II. Valores da fase ( $\theta$ ) em graus para o compartimento 4 do modelo 2**

FREQ. (kHz)	$\theta^\circ$ (ARRANJO COAXIAL)	$\theta^\circ$ (ARRANJO COPLANAR)
100	5,7	8,6
80	3,7	5,3
60	3,0	4,4

### 3.2.2. Estudo comparativo dos arranjos coaxial e coplanar

#### a) Resultados obtidos com os modelos 1, 2, 3 e 4

Analisando a resposta do perfil referente ao modelo 1, Figura 17, observamos que a amplitude da componente em fase do arranjo coplanar é cerca de 1,14 vezes maior do que a amplitude da componente em fase do arranjo coaxial para altos valores de condutividade (compartimentos 4 e 2,  $\sigma = 20 \text{ S/m}$ ). A Tabela III mostra esta afirmação com mais detalhe.

**Tabela III. Valores da amplitude da componente em fase de S/P(%)  
na frequência de 100 kHz**

COMP.	ARRANJO	ARRANJO	RAZÃO
	COAXIAL	COPLANAR	AMP2 E
	AMP1(%)	AMP2(%)	AMP1
4	0,93	1,06	1,14
2	0,70	0,80	1,14

Outro fator importante a ser observado é que as deflexões, para altos valores de condutividade, da amplitude da componente em quadratura do arranjo coplanar são maiores cerca de 1,65 vezes do que as deflexões sofridas pela componente em quadratura no perfil de arranjo coaxial de bobinas. Isso pode ser visto nos dados da Tabela IV, tomados no perfil do modelo 1, nos compartimentos de alta condutividade ( $\sigma = 20 \text{ S/m}$ ), 2 e 4, para frequência de 100 kHz. Este é mais um fator importante a ser considerado para que se processe também a componente em quadratura no perfil do arranjo coplanar de bobinas.

**Tabela IV. Valores da amplitude da componente em quadratura de S/P(%)  
na frequência de 100(kHz)**

COMP.	ARRANJO	ARRANJO	RAZÃO
	COAXIAL	COPLANAR	AMP2 E
	AMP1(%)	AMP2(%)	AMP1
4	0,12	0,20	1,67
2	0,10	0,16	1,60

Outra comparação feita entre os dois tipos de arranjos foi com respeito a camadas finas. Verificamos que o arranjo coplanar possui melhor resolução vertical do que o arranjo coaxial. Podemos ver claramente comparando os dois perfis da Figura 17. Nesta Figura podemos observar ainda que o perfil referente ao arranjo coaxial atinge mais rapidamente o valor máximo do que o perfil do arranjo coplanar. Porém, o perfil do arranjo coplanar apresenta melhor definição de borda da camada.

Os resultados obtidos nos modelos 2, 3 e 4, apresentados nas Figuras 18, 19 e 20, são similares aos resultados obtidos no modelo 1. Estudos comparativos destes modelos serão descritos no item 3.2.3.

b) Resultados obtidos com o modelo 5

O modelo 5 foi especialmente proposto para verificação da resolução vertical dos dois tipos de arranjos. Para isso usou-se as condutividades das soluções iguais para todos os compartimentos, destacando-se apenas as camadas finas de vidro (divisórias dos compartimentos 4-3 e 3-2), Fig. 14a. Mais uma vez houve a comprovação já observada nos modelos anteriores de que o arranjo coplanar apresentou melhor resolução vertical do que o arranjo coaxial de bobinas (Figura 21).

O arranjo coplanar consegue detectar camadas finas de rocha reservatório de alta resistividade representadas pelas divisórias de vidro com 0,5 cm de espessura,  $1/10$  da distância entre bobinas ( $L/10$ ), intercaladas no folhelho. O arranjo coaxial não consegue detectar estas camadas finas de vidro (Fig. 21). Os resultados para camadas finas estão de acordo com Dewan (1983), segundo ele a resolução vertical do arranjo coaxial é de 4 ft. Então, o arranjo coaxial consegue detectar camadas com espessuras maiores que 1,5 vezes a distância entre bobinas ( $1,5L$ ), que na nossa escala correspondem as camadas com espessuras superiores a 7,5 cm.

No perfil de bobinas coplanares, para detecção de camadas finas (Fig.21), uma camada com 0,5 cm de espessura está identificada no perfil com uma espessura de 7 cm. A espessura da camada fina no perfil foi calculada tomando as leituras, na escala de profundidade, no ponto de inflexão do topo e base da camada. A leitura no perfil referente ao topo da primeira camada fina (divisória dos compartimentos 4 e 3) é 63 cm e da base é igual a 70 cm, logo a espessura da primeira camada lida no perfil é de 7 cm. O erro considerado é de 13 vezes a espessura real, ou seja,

$$erro = \frac{7-0,5}{0,5} = 13.$$

### c) Resultados obtidos com o modelo 6

O modelo 6 difere do modelo 5 apenas pela colocação de uma placa de alumínio no compartimento 3 representando uma camada fina de sulfeto de alta condutividade (Tabela I).

Para a camada condutiva fina de sulfeto (Fig.22), representada pela placa de alumínio com 0,1 cm de espessura, o perfil do arranjo coplanar apresentou variação muito mais significativa na componente em quadratura do sinal do que na componente em fase. Entretanto, o perfil do arranjo coplanar mostra claramente a posição da camada fina condutiva.

Podemos explicar o maior valor da componente em quadratura em relação a componente em fase pelo efeito de "current gathering". Este efeito é percebido quando um material de alta condutividade, que no nosso caso é a placa de alumínio, está imerso e em contato galvânico com um meio de condutividade muito mais baixa (solução salina), ocorrendo a condução das correntes induzidas preferencialmente pelo material mais condutivo (Verma e Gaur, 1975; Spies e Parker, 1984). Neste caso, a amplitude da componente em quadratura é maior que a amplitude da componente em fase.

No perfil do arranjo coaxial indicado na Fig. 22, a placa de alumínio, mesmo possuindo pequena espessura, foi detectada pelas duas componentes do sinal. Isso pode ser explicado porque a placa de alumínio possui um alto valor do número de indução (equação 24) devido sua condutividade ser muito alta, compensando assim sua pequena espessura (0,1 cm).

A componente em quadratura, no perfil do arranjo coaxial, também apresentou o valor da amplitude muito maior do que o valor da amplitude da componente em fase, confirmando o efeito de "current gathering" ocorrido no perfil do arranjo coplanar.

### 3.2.3. Estudo comparativo dos diferentes modelos

Comparando os perfis dos modelos 1 e 2, Figuras 23 e 24, com relação ao perfil de invasão tipo "annulus" do compartimento 3, verifica-se que a resposta variou na mesma proporção para os dois tipos de arranjos. A Tabela V mostra os valores de amplitude da componente em fase de S/P(%) retirados dos perfis dos modelos 1 e 2 para os arranjos coaxial e coplanar, onde foi

mudada a condutividade da zona de transição de 2,7 S/m no modelo 1 para 20 S/m no modelo 2, permanecendo as condutividades da zona lavada e zona virgem.

**Tabela V. Valores da amplitude da componente em fase de S/P(%) para o compartimento 3**

FREQ. (KHz)	MODELO 1 ARRANJO COAXIAL	MODELO 1 ARRANJO COPLANAR	MODELO 2 ARRANJO COAXIAL	MODELO 2 ARRANJO COPLANAR
100	0,15	0,15	0,30	0,30
80	0,13	0,13	0,26	0,26
60	0,10	0,10	0,20	0,20

Verifica-se, portanto, que os valores de S/P subiram em 50%, tanto no arranjo coaxial como no arranjo coplanar, nas três frequências, ocasionando com isso um erro na condutividade da zona virgem. Desta forma, podemos afirmar que o arranjo coplanar não resolve o problema do perfil de invasão tipo "annulus". Isso devido ao "skin effect" que atua igualmente para os dois casos e independe do arranjo de bobinas. Para resolução do perfil de invasão tipo "annulus" é necessário o arranjo de bobinas focalizadas com diferentes espaçamento entre bobinas para investigação rasa e profunda. Podemos assim identificar o perfil de invasão tipo "annulus", pois a investigação rasa identificará a zona condutiva e a investigação profunda identificará a zona resistiva, mostrando uma zona condutiva antes da zona resistiva (zona virgem), comprovando o perfil de invasão tipo "annulus" (Fig. 7b). Isso permite investigar mais precisamente a condutividade da zona virgem, zona mais profunda.

Analisando o comportamento dos perfis referentes aos modelos 3 e 4 em relação ao perfil de invasão tipo "annulus", Figuras 19 e 20, verificamos que eles apresentaram resultados semelhantes aos já analisados nos modelos 1 e 2.

#### 3.2.4. Análise da simetria do sistema

Devido a simetria do nosso modelo a orientação das bobinas, no arranjo coplanar, dentro do poço não foi levada em conta. Mas no caso de modelos assimétricos, a orientação das bobinas

para o arranjo coplanar é de fundamental importância e deve ser obedecida.

No caso do arranjo coaxial, a orientação das bobinas dentro do poço não é necessária, mesmo para modelos assimétricos, pois para qualquer posição das bobinas a resposta será a mesma, resultando na grande vantagem operacional do arranjo coaxial em relação aos outros tipos de arranjos.

Medidas foram feitas também com o arranjo de bobinas de acoplamento mínimo. Mas, devido a simetria do nosso sistema modelo, a resposta do perfil para as componentes de fase e quadratura do arranjo de acoplamento mínimo é zero. Este fato pode ser explicado considerando a bobina transmissora como sendo a coaxial ao eixo do poço e a bobina receptora como a paralela ao eixo do poço. Os loops formados no sistema modelo que preferencialmente excitarão a bobina receptora, estarão paralelos ao eixo do poço e conseqüentemente à bobina receptora. Logo os loops formados em um dos lados do poço, terão a mesma intensidade e sinal contrário aos loops formados do outro lado do poço, anulando-se os dois campos secundários na bobina receptora, ocasionando então um valor nulo para a resposta do arranjo de acoplamento mínimo.

## CAPÍTULO 4

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

#### 4.1. Conclusões

Atualmente, um dos grandes problemas da sonda de indução, a qual utiliza arranjo de bobinas coaxial, é quanto as sequências muito delgadas de camadas que normalmente não são detectadas. Camadas finas no perfil de indução são confundidas com oscilações da sonda, rugosidade nas paredes do poço, bem como a presença de ruídos nas transmissões de dados da ferramenta para a superfície.

Os perfis de raio gama, neutrônicos e densidade possuem maior resolução vertical que os perfis de indução, sendo por este motivo utilizados para detectar possíveis camadas de pouca espessura.

Analisando os resultados obtidos através de modelamento analógico eletromagnético, verificamos que o arranjo de duas bobinas coplanares apresentou melhor resolução vertical para camadas delgadas do que o arranjo de duas bobinas coaxiais. As respostas para os dois arranjos foram obtidas em situações de elevado contraste entre as camadas adjacentes, como por exemplo, as delgadas intercalações de arenitos portadores de hidrocarbonetos em folhelhos.

Outra vantagem do arranjo coplanar com relação ao arranjo coaxial é que o arranjo coplanar apresentou melhor definição de borda das camadas. O arranjo coplanar apresenta resolução para situações não simétricas como: camadas inclinadas e fraturas.

A desvantagem do arranjo coplanar em relação ao arranjo coaxial é operacional, já que no arranjo coplanar necessita-se de várias medidas angulares em uma mesma profundidade para cobrir todo 360°. Para resolver o problema da operacionalidade do arranjo coplanar, pode-se desenvolver sondas com várias bobinas receptoras coplanares cobrindo várias posições angulares.

Os resultados mostraram também que, para os perfis de invasão tipo "annulus", as respostas para os dois tipos de arranjos foram as mesmas.

Estudos devem ser feitos no sentido de desenvolver o arranjo de bobinas coplanares, para que ele possa ser também utilizado como opção para detectar camadas de pouca espessura, já que

este tipo de arranjo possui excelente resolução vertical. Técnicas devem ser desenvolvidas com o objetivo de processar os dados do arranjo coplanar para se chegar a valores cada vez mais precisos do grande objetivo da perfilagem de poço, que é a resistividade da zona virgem ( $R_t$ ) das formações e, conseqüentemente, melhores definições de saturação água/óleo para estes reservatórios.

A grande dificuldade encontrada no trabalho foi com relação a equipamentos, dada a pequena amplitude dos sinais medidos e, conseqüentemente, da sensibilidade requerida dos equipamentos. Mas os resultados foram considerados satisfatórios, pois as leituras obtidas com o conjunto, quando comparadas aos resultados teóricos, mostraram variações em torno de 8% do valor esperado (ver Apêndice).

#### 4.2. Recomendações

Várias sugestões podem ser feitas para melhorar o desempenho do sistema. A blindagem eletrostática pode ser melhorada pelo uso de tela de fio esmaltado, ou pela substituição dos anéis de alumínio por cobre de menor espessura, possibilitando a solda das conexões de terra.

Obtenção de equipamentos mais precisos que possibilitem a aquisição digital dos dados, aumentando a confiabilidade nas respostas e possibilitando visualização e tratamento de dados mais rapidamente. Também é importante a aquisição de equipamentos que trabalhem com uma faixa maior de frequência, objetivando o estudo da influência da frequência no arranjo de bobinas coplanares, principalmente para frequências mais altas, em torno de 500 kHz.

A sonda, contendo o arranjo de bobinas coplanares, pode ser testada em diversas situações importantes na perfilagem de poço. As fraturas preenchidas com óleo e água conata, que geralmente são planos delgados verticais ou inclinados próximo a vertical, seria uma ótima situação para o estudo da sonda com arranjo de bobinas coplanares. As fraturas por serem geralmente na vertical, quando excitadas pela bobina transmissora, irão formar loops de corrente com eixos perpendiculares ao eixo do poço. O arranjo coaxial, por possuir a bobina receptora coaxial ao eixo do poço, não detectará os campos secundários provindos destes loops. Já no caso do arranjo de bobinas coplanares, por possuir a bobina receptora na mesma direção dos loops formados pela fratura, detectará facilmente os campos secundários gerados nestes loops.

Camadas inclinadas também seria uma ótima situação para o estudo com o arranjo de

bobinas coplanares, em virtude do arranjo de bobinas coaxiais não apresentarem resolução para este caso.

Poderia ser testado uma sonda com arranjo de bobinas coplanares focalizadas, melhorando cada vez mais a resolução vertical, pois para o arranjo projetado neste trabalho usou-se uma distância entre bobinas de 40" (aproximadamente 1 m) no sistema real, com o objetivo de uma investigação mais profunda. Diminuindo-se então o espaçamento entre bobinas, teria-se uma investigação mais rasa e também uma melhor resolução vertical.

Poderia ser também testado o arranjo de bobinas de acoplamento mínimo para modelos assimétricos, já que isso não foi possível no presente trabalho devido a simetria do sistema.

Modelamentos teóricos e numéricos devem ser também desenvolvidos para as sondas com diferentes disposições de bobinas, com o objetivo de se confirmar os resultados encontrados no laboratório.

A experiência nesta tese servirá como base para futuros estudos envolvendo sondas com diferentes disposições de bobinas.

## AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Om Prakash Verma pelo apoio científico na orientação da tese.

Ao Dr. Luiz Rijo no auxílio e no aprimoramento do trabalho no período de correções.

Ao Dr. Hilton B. Evans pelas correções e modificações sugeridas.

Aos técnicos Alberto e Carlos pela colaboração na montagem do conjunto experimental.

A todos os colegas que contribuíram com ajuda científica ou amiga no desenvolvimento do trabalho, em particular a Nelson Raulino, Bucheb, Abel Carrasquilla, Paulo Salvadoretti, Nélio Medeiros e Girão Nery.

Ao Departamento de Geofísica da UFPa pela infraestrutura oferecida.

Ao convênio PETROBRAS, UFPa, CNPq, FINEP e FADESP, pelo suporte financeiro necessário para a realização do trabalho.

Aos meus pais e familiares que pelo apoio fortaleceram esta realização.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ANDERSON, B.; BARBER, T.; SCHAEFER, R. 1988. Induction log: evolution of a technique. *The Technical Review*, 35: 35-41.
- ANDERSON B. & GIANZERO, S. 1983. Induction sonde response in stratified media. *The Log Analyst*, 24: 25-31.
- DEWAN, J. T. 1983. *Essentials of modern open-hole log interpretation*. Tulsa, Pennwell books, 361 p.
- DOLL, H. G. 1949. Introduction to induction logging and application to logging of wells drilled with oil base muds. *Petroleum Transactions, AIME*, June, 148-162.
- DUESTERHOEFT, W. C. 1961. Propagation effects in induction logging. *Geophysics*, 26 (2): 192-204.
- DUESTERHOEFT, W. C., & SMITH, H.,W. 1962. Propagation effects on radial response in induction logging. *Geophysics*, 27 (4): 463-469.
- ELLIS, D. V. 1987. *Well Logging for Earth Scientists*. Amsterdam, Elsevier Science Publishing, 532 p.
- GIANZERO, S. & ANDERSON, B. 1982. A new look at skin effect. *The Log Analyst*, 23(1): 20-34.
- GRANT, F. S. & WEST, G. F. 1965. *Interpretation theory in applied geophysics*. New York, McGraw-Hill Book, 584 p.
- HARBEN, P. E.; RODGERS, P. W.; HOLLADAY, G. 1987. Evaluation and design of a large spacing loop-loop electromagnetic tool. *The Log Analyst*, 28(1): 17-26.
- HARRINGTON .1961. *Time harmonic eletromagnetic field*. New York, McGraw-Hill, 480 p.
- KELLER, G. V. & FRISCHKNECHT, F. C. 1977. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Oxford, Pergamon Press, 526 p.
- LOG Interpretation. Principles/Applications. Houston, Schlumberger, 198 p.

- MORAN, J. H. & KUNZ, K. S. 1962. Basic theory of induction logging and application to study of two-coil sondes. *Geophysics*, 27(6): 829–858.
- PIRSON, S. J. 1963. *Handbook of well log analysis*. Englewoodcliffs, Prentice–Hall, 326 p.
- RIJO, L. 1990. Notas de aulas do curso “Teoria dos Métodos Elétricos e Eletromagnéticos I e II”, 269 p.
- SALVADORETTI, P. 1990. Construção de um modelo experimental simulando condições de perfilagem de indução. Belém, 54 p. (Tese de Mestrado UFPA).
- SERRA, O. 1984. *Fundamentals of well-log interpretation*. Amsterdam, Elsevier, 423 p. (Developments in Petroleum Science, 15A).
- SPIES, B. R., & PARKER, P. D. 1984. Limitations of large-loop transient electromagnetic surveys in conductive terrains. *Geophysics*, 49 (7): 902–912.
- VERMA, O. P., & GAUR, V. K. 1975. Transformation of electromagnetic anomalies brought about by a conducting host rock. *Geophysics*, 40 (3): 473–489.

## APÊNDICE

Usaremos agora a teoria do fator geométrico, analisada no Cap. 1, para converter a resposta do modelo geológico (S/P) para a escala linear de condutividade aparente, partindo-se da premissa de que a razão (S/P) é proporcional a condutividade do meio. Esta é a teoria usada para o arranjo coaxial de bobinas.

Calculando o fator geométrico integrado  $G_i$  para cada zona de interesse pela integral dupla

$$G_i = \int \int_i g(r, z) dr dz ,$$

onde

$$g(r, z) = \left( \frac{L}{2} \right) \frac{r^3}{(r^2 + (\frac{L}{2} - z)^2)^{3/2} (r^2 + (\frac{L}{2} + z)^2)^{3/2}} ,$$

encontraremos os seguintes resultados:

$G_i$  do comp. 4 (calibração) = 0,839, usando  $0,01\text{m} \leq r \leq 0,25\text{m}$  e  $-0,32\text{m} \leq z \leq 0,32\text{m}$  como limites de integração,

$G_i$  da zona lavada = 0,303, onde  $0,01\text{m} \leq r \leq 0,035\text{m}$  e  $-0,32\text{m} \leq z \leq 0,32\text{m}$ ,

$G_i$  da zona de transição = 0,095 onde  $0,037\text{m} \leq r \leq 0,047\text{m}$  e  $-0,32\text{m} \leq z \leq 0,32\text{m}$  e

$G_i$  da zona virgem = 0,403, onde  $0,049\text{m} \leq r \leq 0,25\text{m}$  e  $-0,32\text{m} \leq z \leq 0,32\text{m}$ .

A integral dupla foi calculada usando o método iterativo da quadratura de Romberg para intervalos fechados (Rijo, 1990).

A diferença entre o valor de  $G_i$  da zona de calibração e o valor unitário é 0,161, e mostra que deve haver correção da condutividade aparente  $\sigma_a$ .

Tomando como exemplo o perfil da Figura 15 (frequência de 100 kHz), podemos calcular a resposta teórica da condutividade aparente para cada compartimento, multiplicando o valor de  $G_i$  de cada zona por sua respectiva condutividade verdadeira. Então

$$\sigma_a \text{ do comp. 4} = 20 \times 0,839 = 16,78 \text{ S/m},$$

$$\sigma_a \text{ do comp. 3} = 1,6 \times 0,303 + 2,7 \times 0,095 + 4 \times 0,403 = 2,35 \text{ S/m e}$$

$$\sigma_a \text{ do comp. 2} = 8 \times 0,303 + 10 \times 0,095 + 20 \times 0,403 = 11,43 \text{ S/m}.$$

O valor da condutividade aparente experimental é lida diretamente no perfil, baseada no valor da condutividade do compartimento 4 de calibração. A leitura da condutividade aparente é feita no centro de cada compartimento e nos fornece

$\sigma_a$  do comp. 4 = 16,78 S/m,

$\sigma_a$  do comp. 3 = 2,52 S/m e

$\sigma_a$  do comp. 2 = 12,46 S/m.

A Tabela VI apresenta uma comparação entre os valores teóricos e os valores obtidos experimentalmente, mostrando que os valores experimentais situam-se em torno de 8% acima dos valores teóricos.

**Tabela VI. Comparação entre a condutividade teórica e a experimental**

COMP.	$\sigma_{(a,teorico)}$ S/m	$\sigma_{(a,experimental)}$ S/m	erro %
4*	16,78	16,78	-
3	2,35	2,52	7,23
2	11,43	12,46	9,01

\* zona de calibração

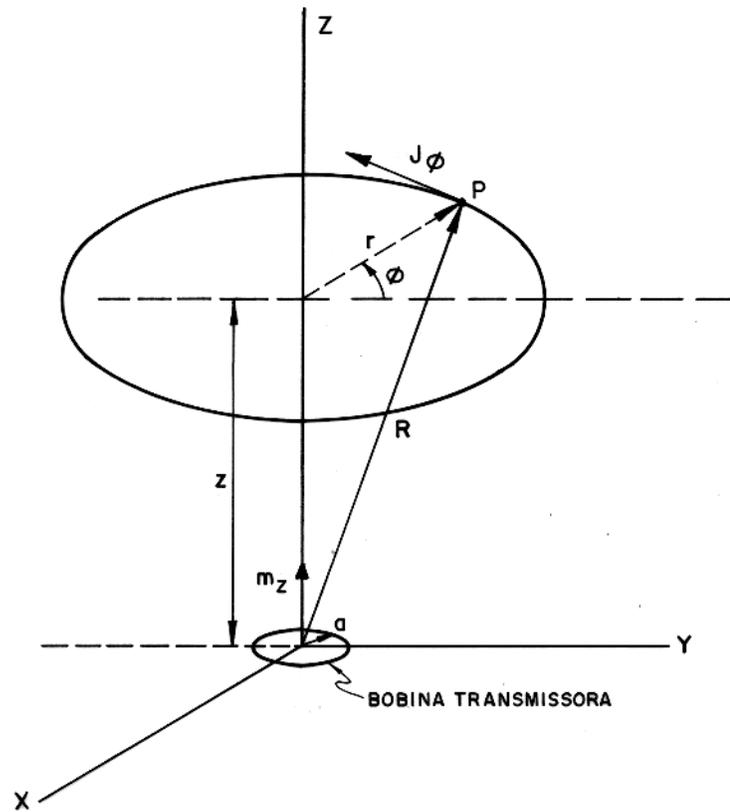


Figura 1 - Loop circular (sistema de coordenadas).

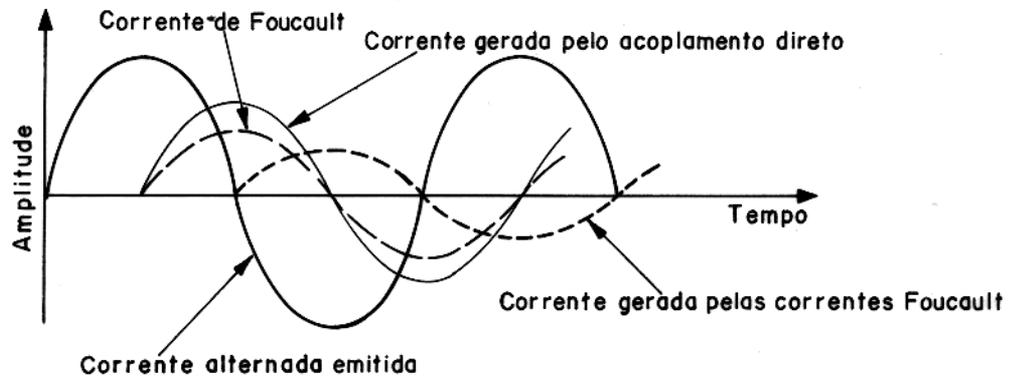
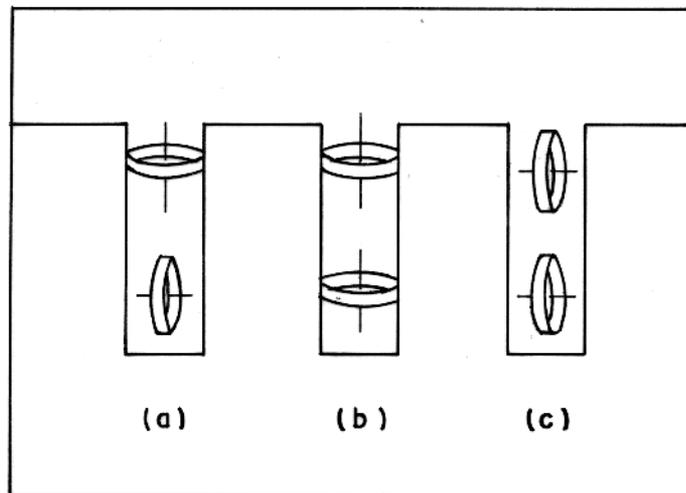


Figura 2 – Diferença de fase entre as correntes induzidas relativas a corrente emitida pelo transmissor (adaptado de Serra, 1984).



- (a) Acoplamento mínimo
- (b) Coaxial
- (c) Coplanar

Figura 3 – Orientação das bobinas.

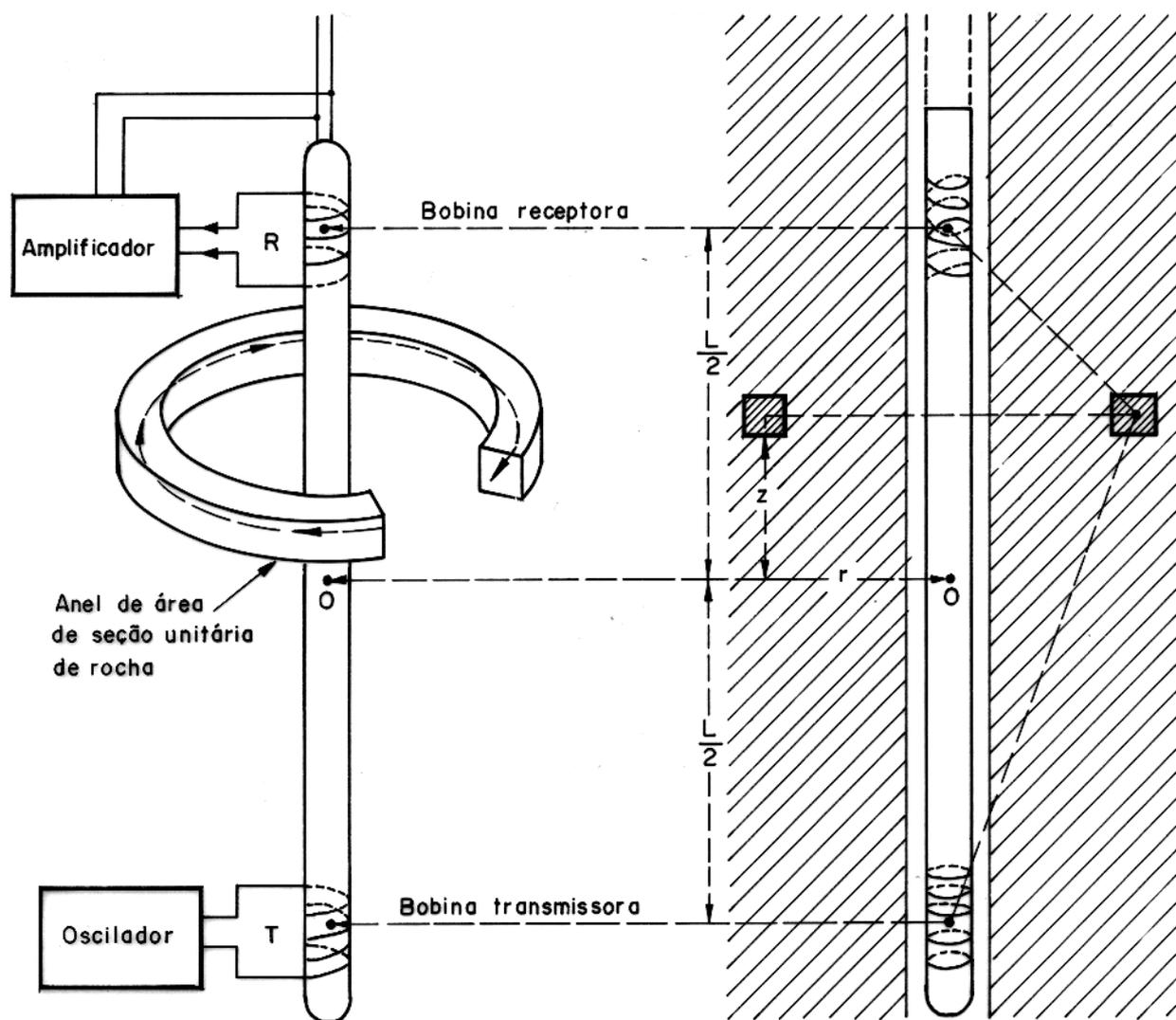


Figura 4 — A sonda de indução com duas bobinas. A bobina transmissora T e a receptora R são separadas de uma distância  $L$  e enroladas em um eixo isolante. A força eletromotriz induzida em R é proporcional à condutividade do material do anel de rocha (adaptado de Doll, 1949).

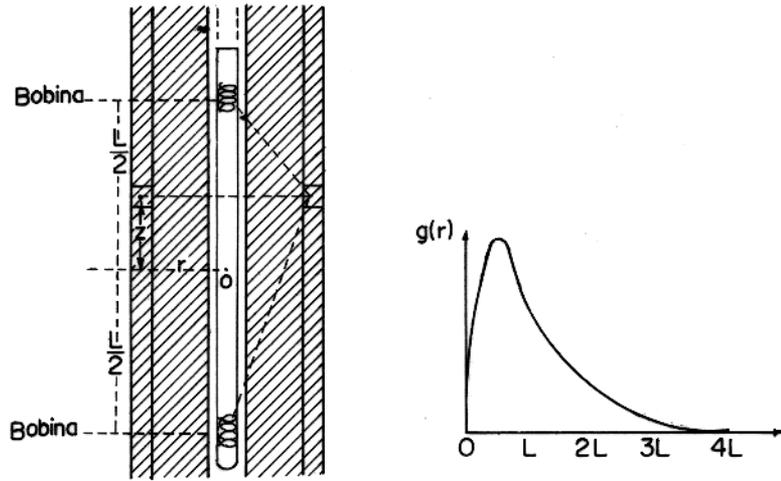


Figura 5 — Fator geométrico radial  $g(r)$  da sonda de duas bobinas. Produzido pela integração com respeito a  $z$ , fixando  $r$  (Extraído de Ellis,1987).

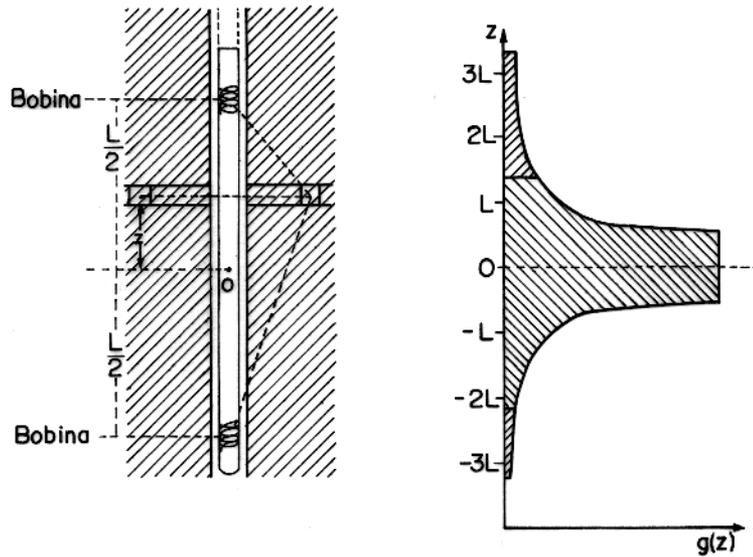


Figura 6 — Fator geométrico vertical  $g(z)$  da sonda de duas bobinas. Produzido pela integração com respeito a  $r$ , fixando  $z$  (Extraído de Ellis,1987).

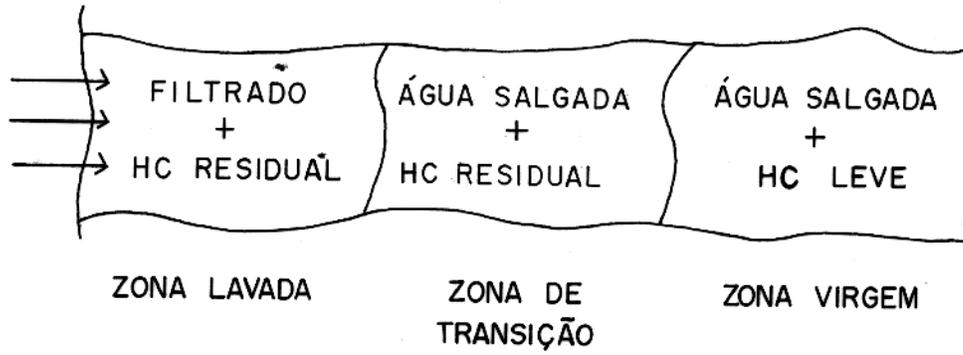


Figura 7a – Situação em que ocorre o fenômeno de "Annulus".

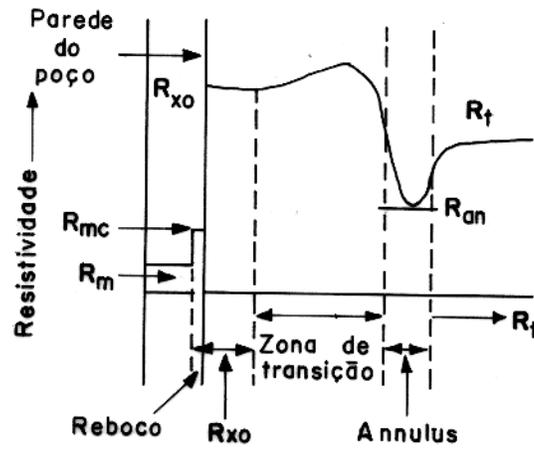


Figura 7b – Distribuição radial de resistividade ( $R_m > R_w$ , camada contendo óleo,  $S_w < 50\%$ ) (Extraído de Schlumberger, 1987).

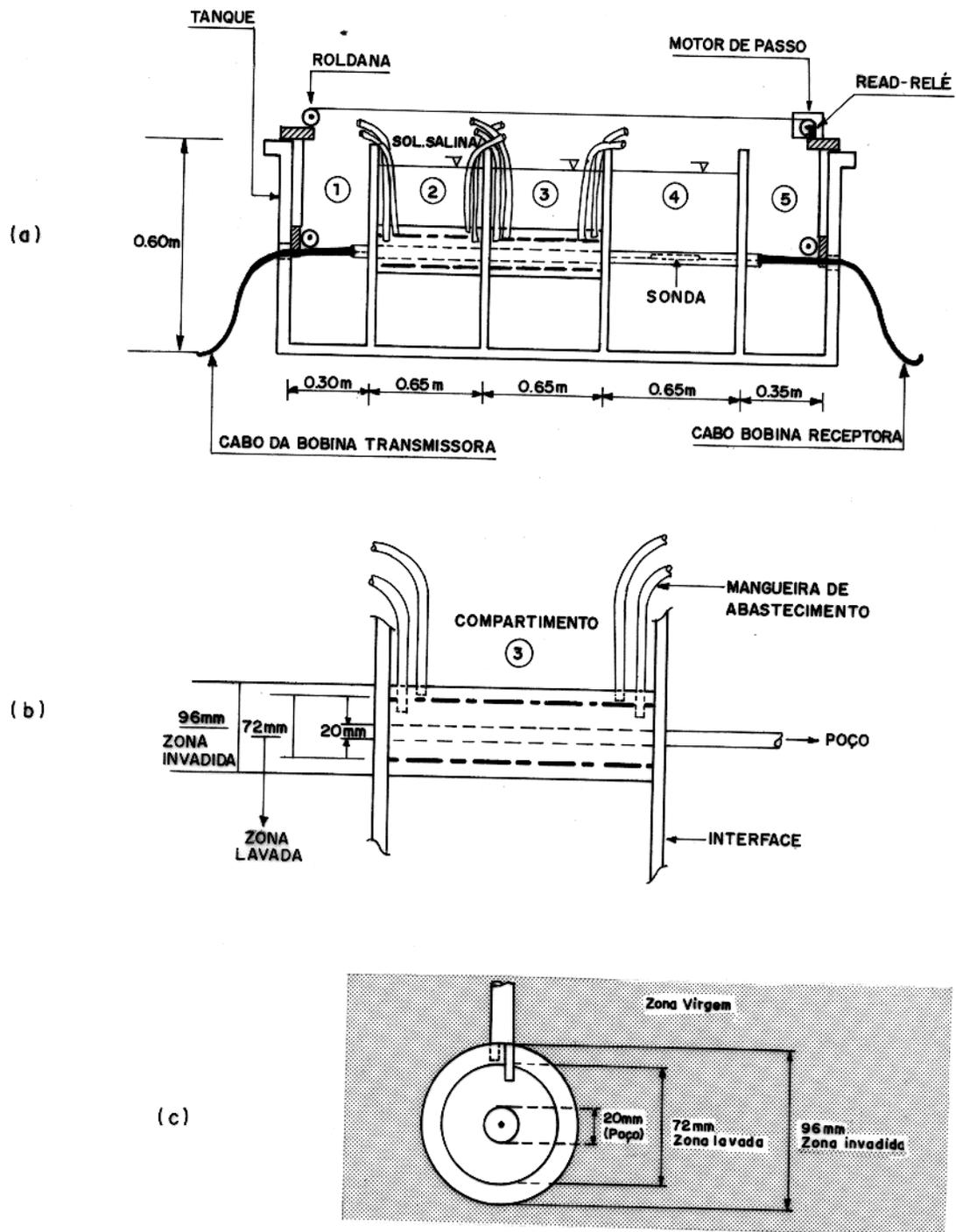


Figura 8 — (a) Modelo experimental simulando situação geológica de poço (vista lateral),  
 (b) Sistema de abastecimento das zonas lavadas e de transição e  
 (c) Seção transversal do modelo geológico do poço.

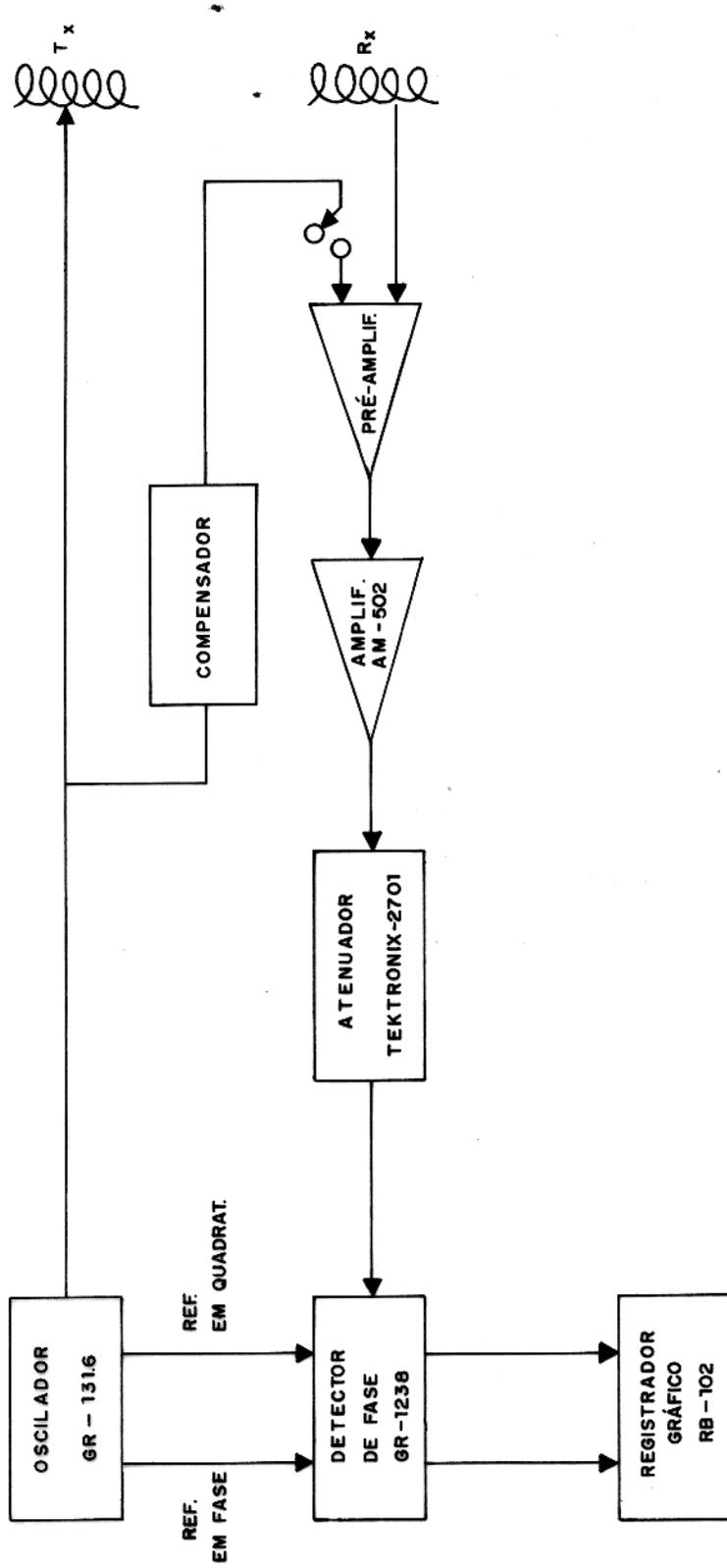


Figura 9 — Diagrama de blocos do sistema elétrico.

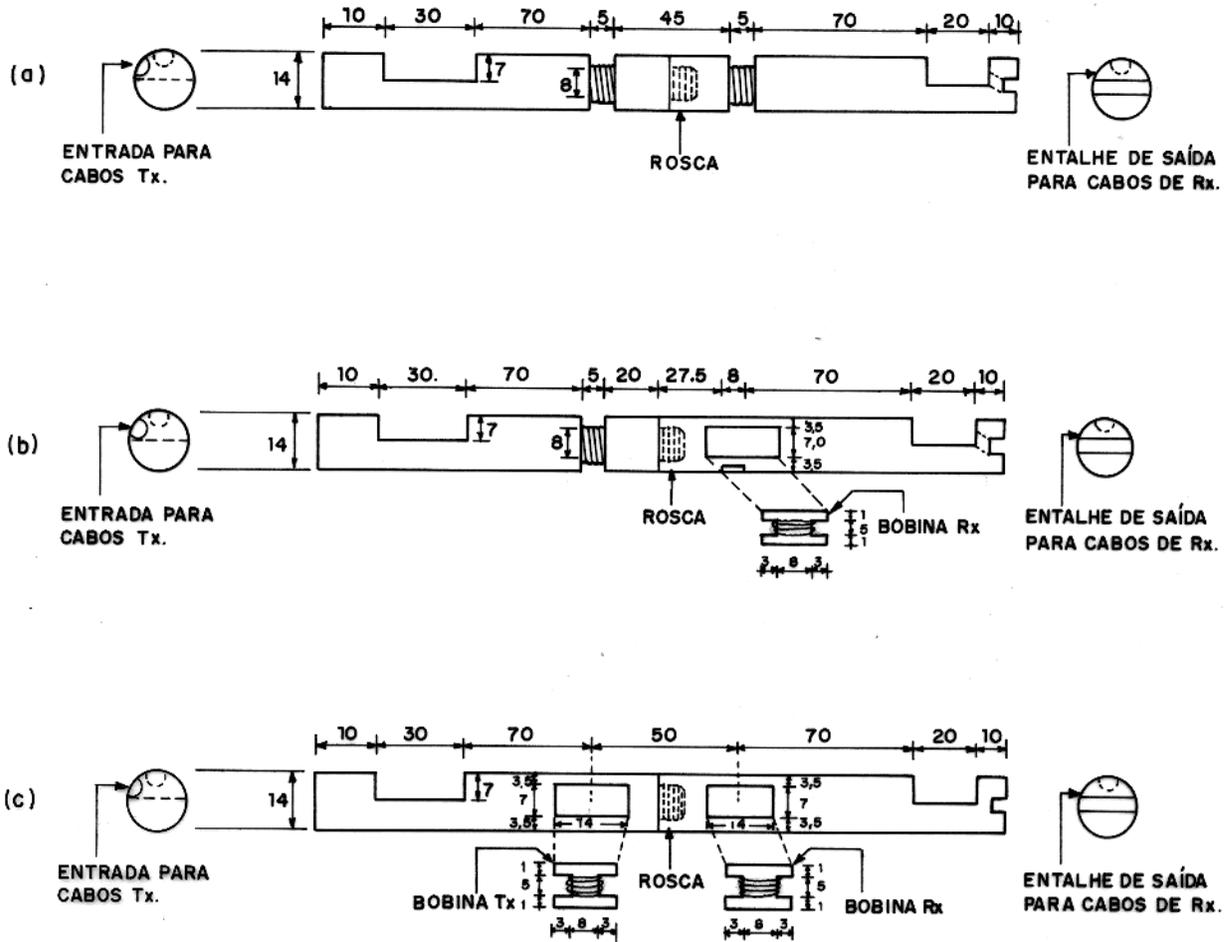


Figura 10—(a) Vista lateral da sonda de arranjo coaxial (Dimensões em milímetros),  
 (b) Vista lateral da sonda de acoplamento mínimo e  
 (c) Vista lateral da sonda de arranjos coplanar.

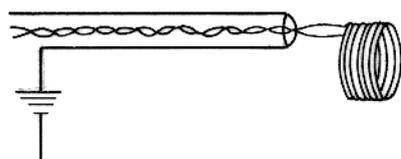


Figura 11a - Blindagem eletrostática dos cabos.

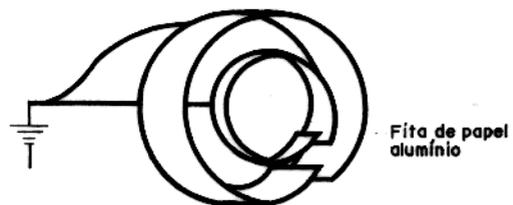


Figura 11b - Blindagem eletrostática das bobinas de arranjo coaxial.

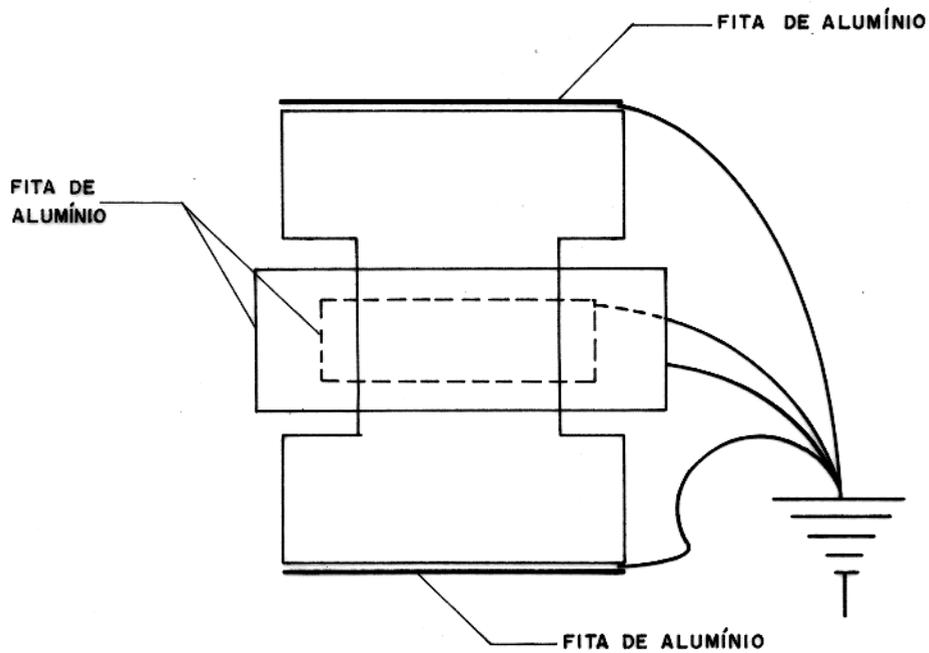
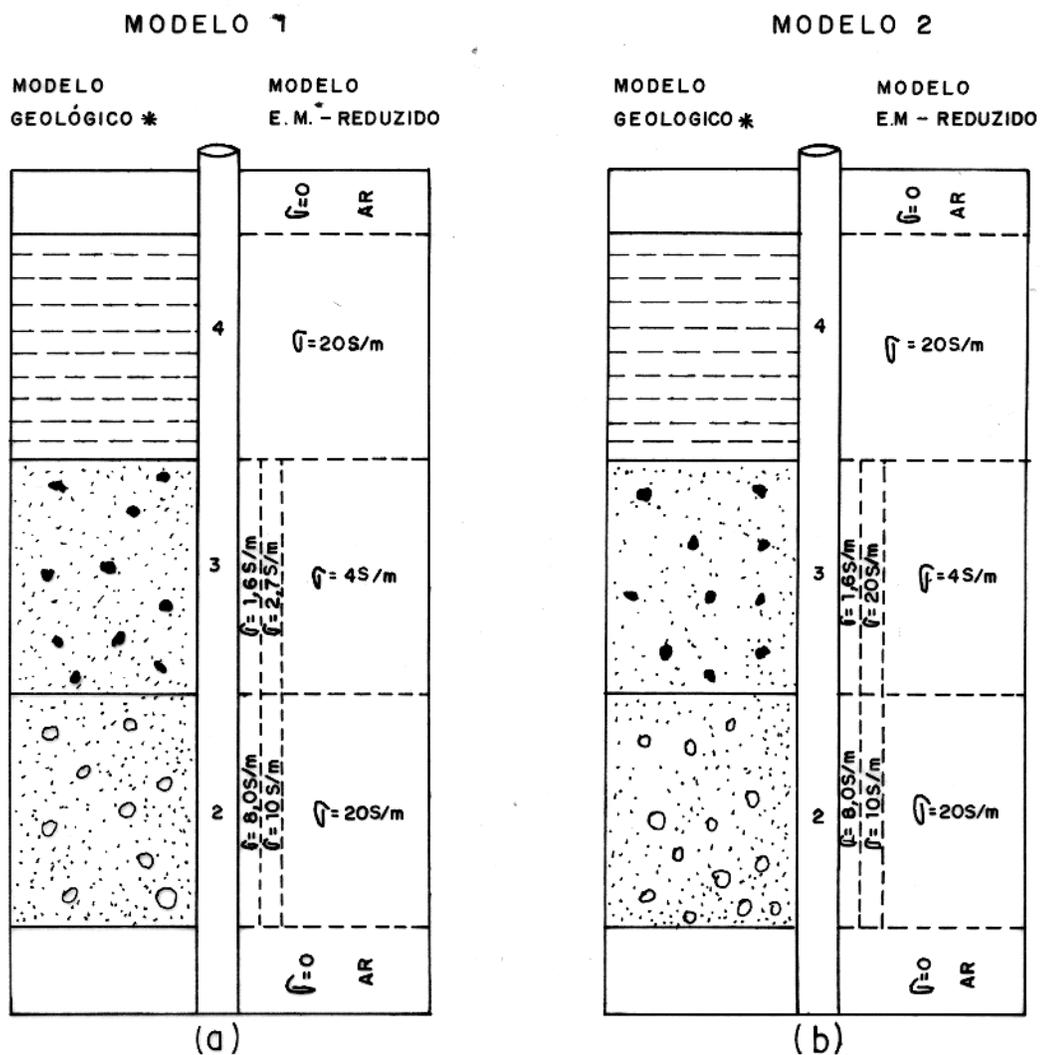
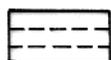


Figura 11c - Blindagem eletrostática das bobinas de arranjo coplanar.



\* Modelo representativo (sem escala)



FOLHELHO



ARENITO POROSO COM HIDROCARBONETO E ÁGUA RESIDUAL



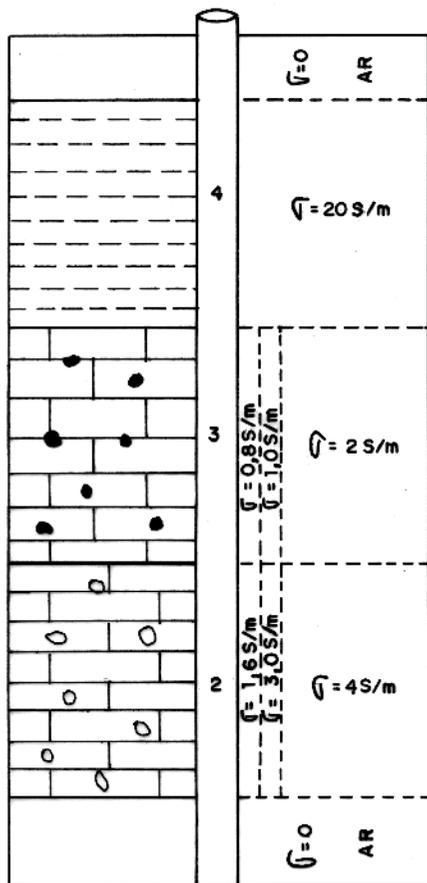
ARENITO POROSO COM ÁGUA CONATA DE ALTA CONDUTIVIDADE.

Figura 12 - (a) Modelo geológico representando um arenito sobreposto por um folhelho e

(b) Modelo geológico simulando o perfil de invasão tipo "Annulus" do arenito do modelo 1.

## MODELO 3

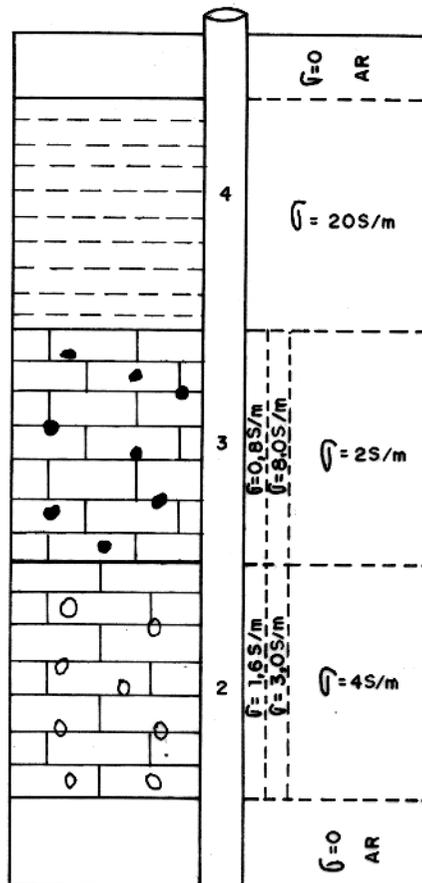
MODELO GEOLÓGICO \*      MODELO E.M. - REDUZIDO



(a)

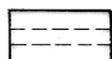
## MODELO 4

MODELO GEOLÓGICO \*      MODELO E.M. - REDUZIDO



(b)

\* Modelo representativo (sem escala)



FOLHELHO

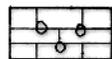
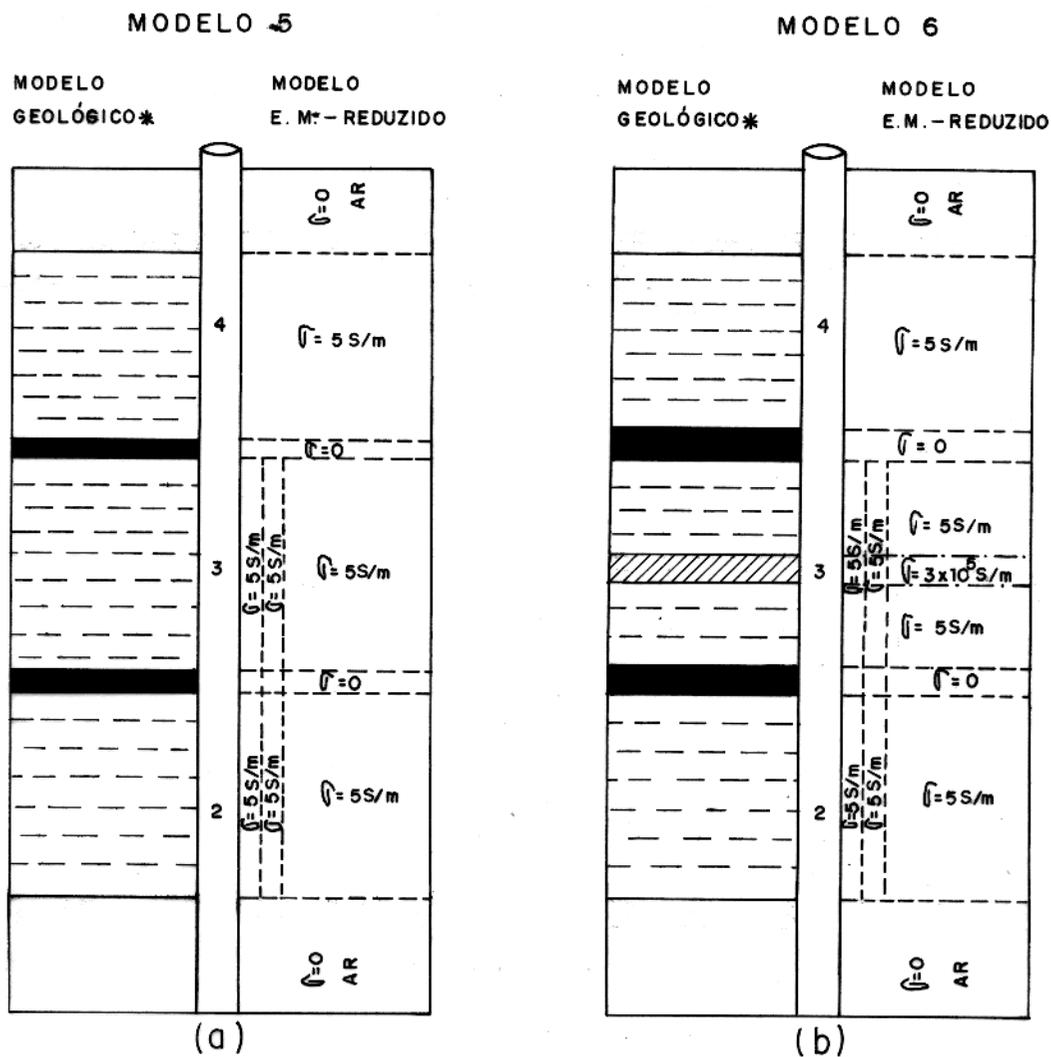
CALCÁRIO DE BAIXA POROSIDADE  
CONTENDO HIDROCARBONETO E ÁGUA RESIDUALCALCÁRIO DE BAIXA POROSIDADE  
CONTENDO ÁGUA CONATA DE ALTA CONDUTIVIDADE.

Figura 13-(a) Modelo geológico representando um calcário sobreposto por um folhelho e

(b) Modelo geológico simulando o perfil de invasão tipo "Annulus" do calcário do modelo 3.



\* Modelo representativo (sem escala)

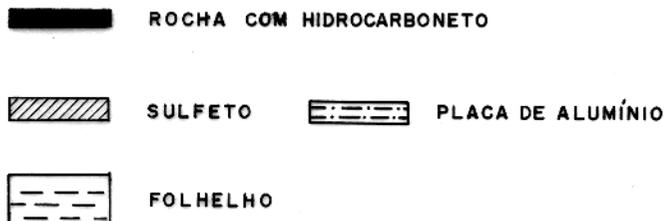


Figura 14 - (a) Modelo geológico representando um folhelho intercalado por camadas finas de rochas com hidrocarbonetos (resistivas) e  
 (b) Modelo geológico representando um folhelho intercalado por camadas finas de rochas com hidrocarbonetos.

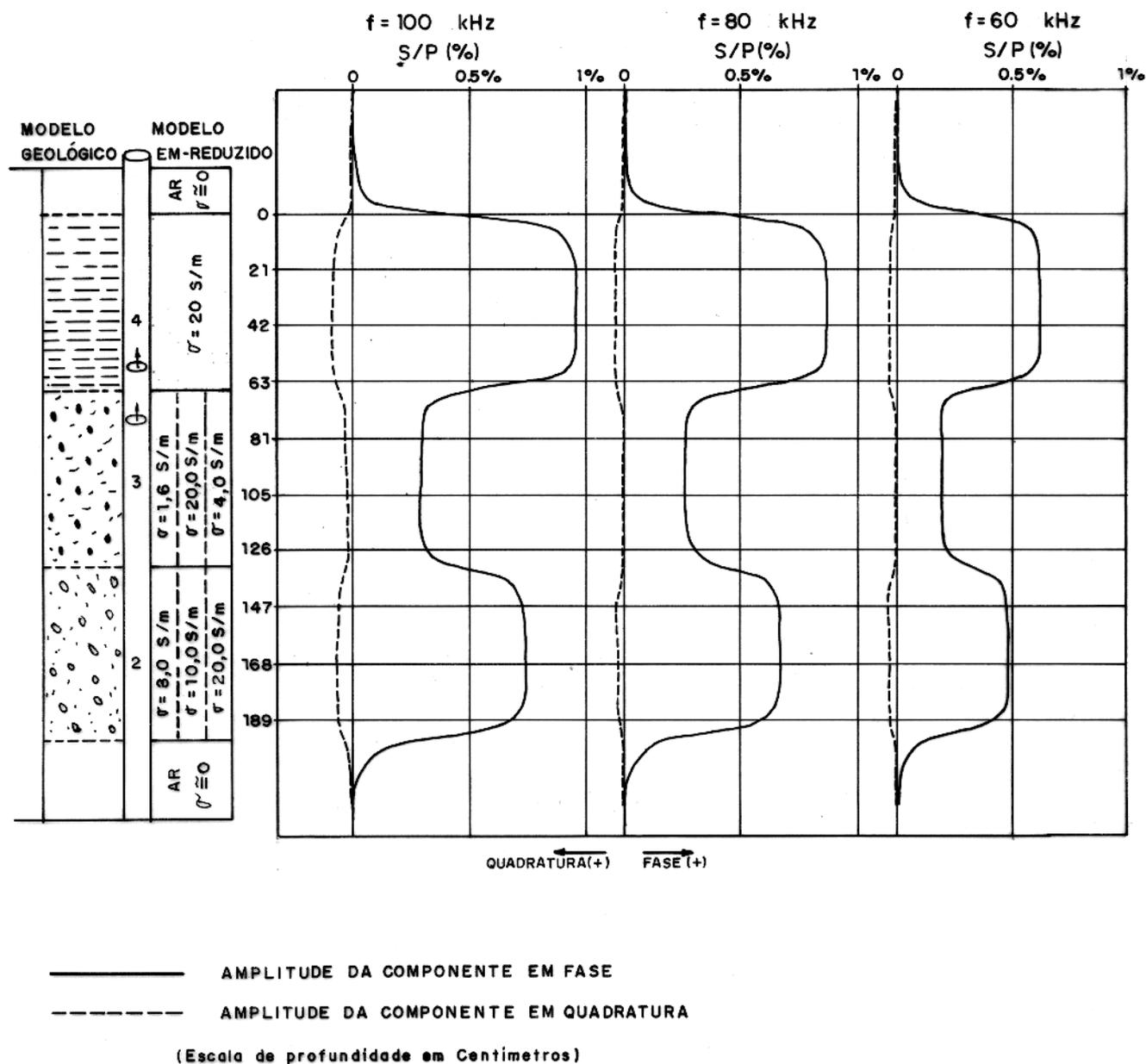


Figura 15— Respostas do arranjo coaxial de bobinas nas frequências de 100, 80 e 60 kHz referentes ao modelo 2.

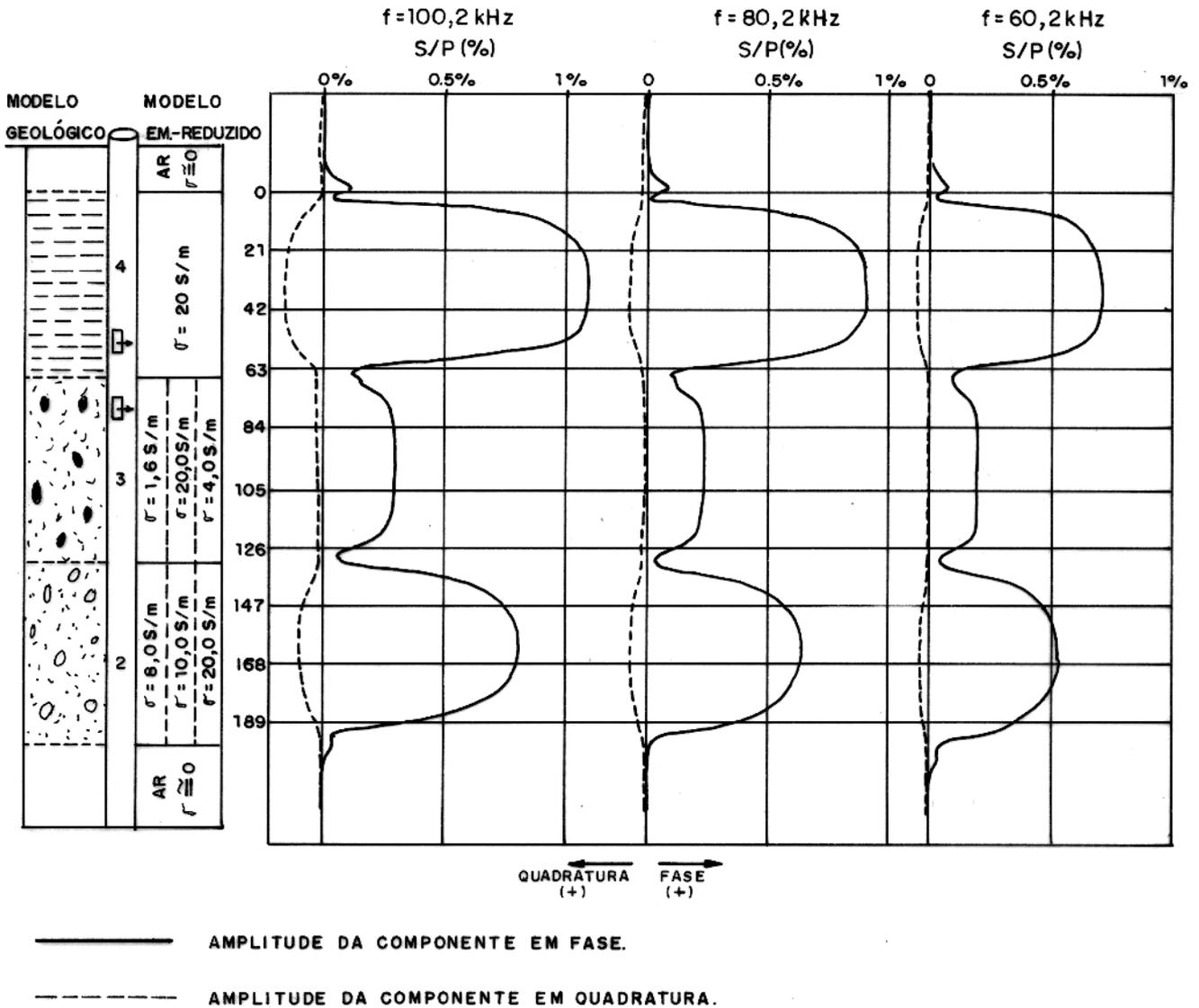


Figura 16 – Respostas do arranjo coplanar de bobinas nas frequências de 100,80 e 60 kHz referentes ao modelo 2.

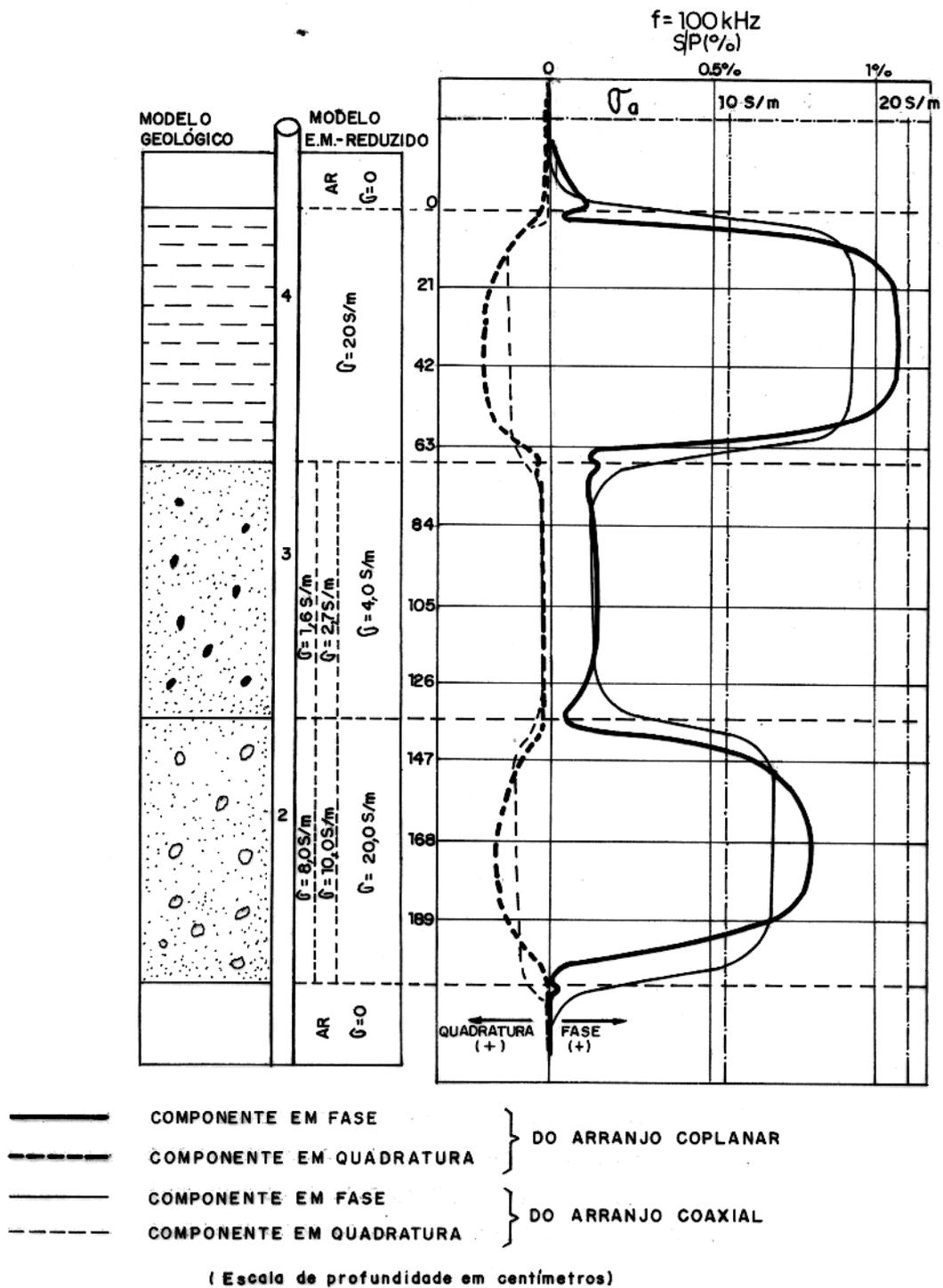


Figura 17— Respostas dos arranjos de bobinas coaxial e coplanar referentes ao modelo 1.

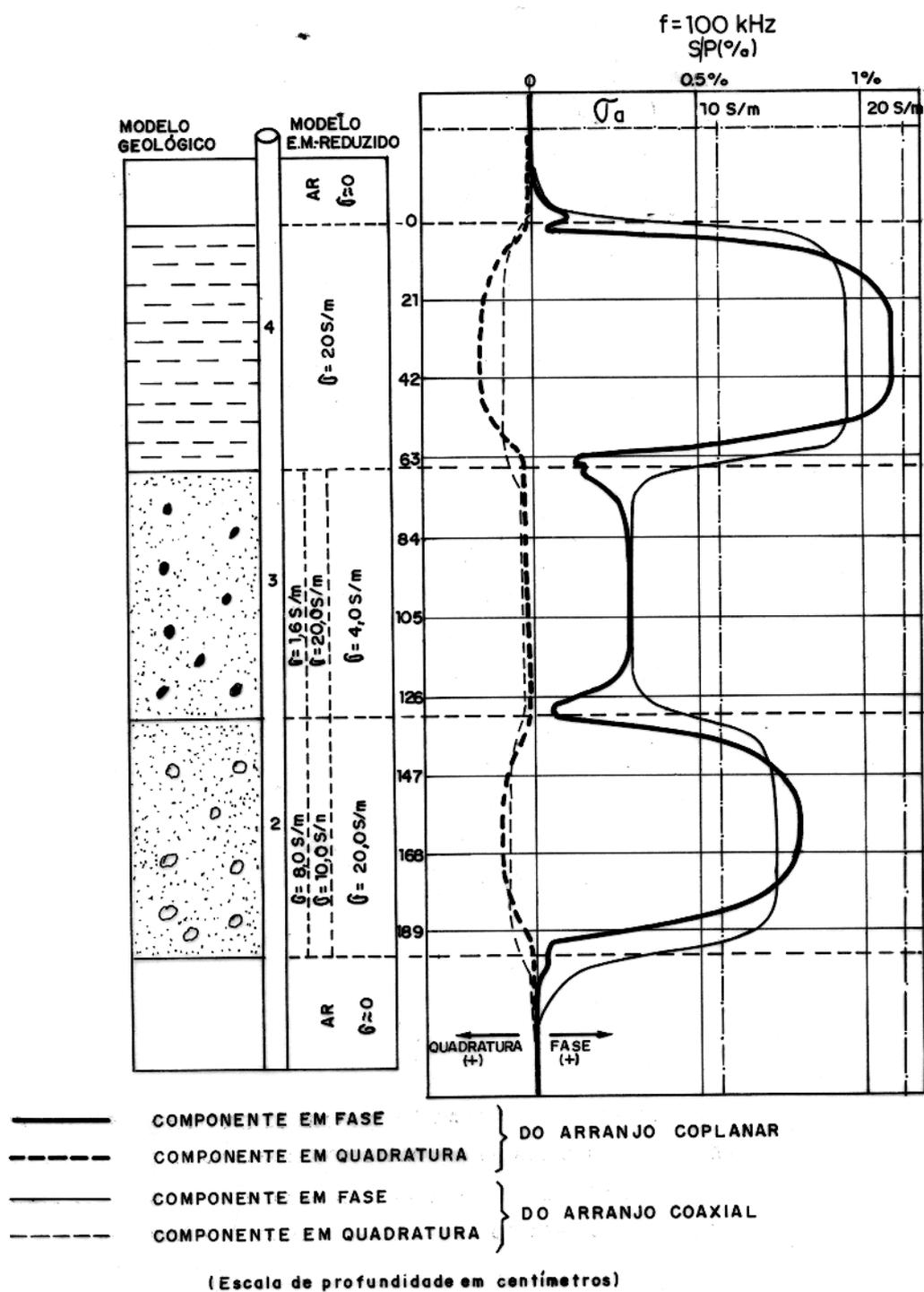


Figura 18 – Respostas dos arranjos de bobinas coaxial e coplanar referentes ao modelo 2 .

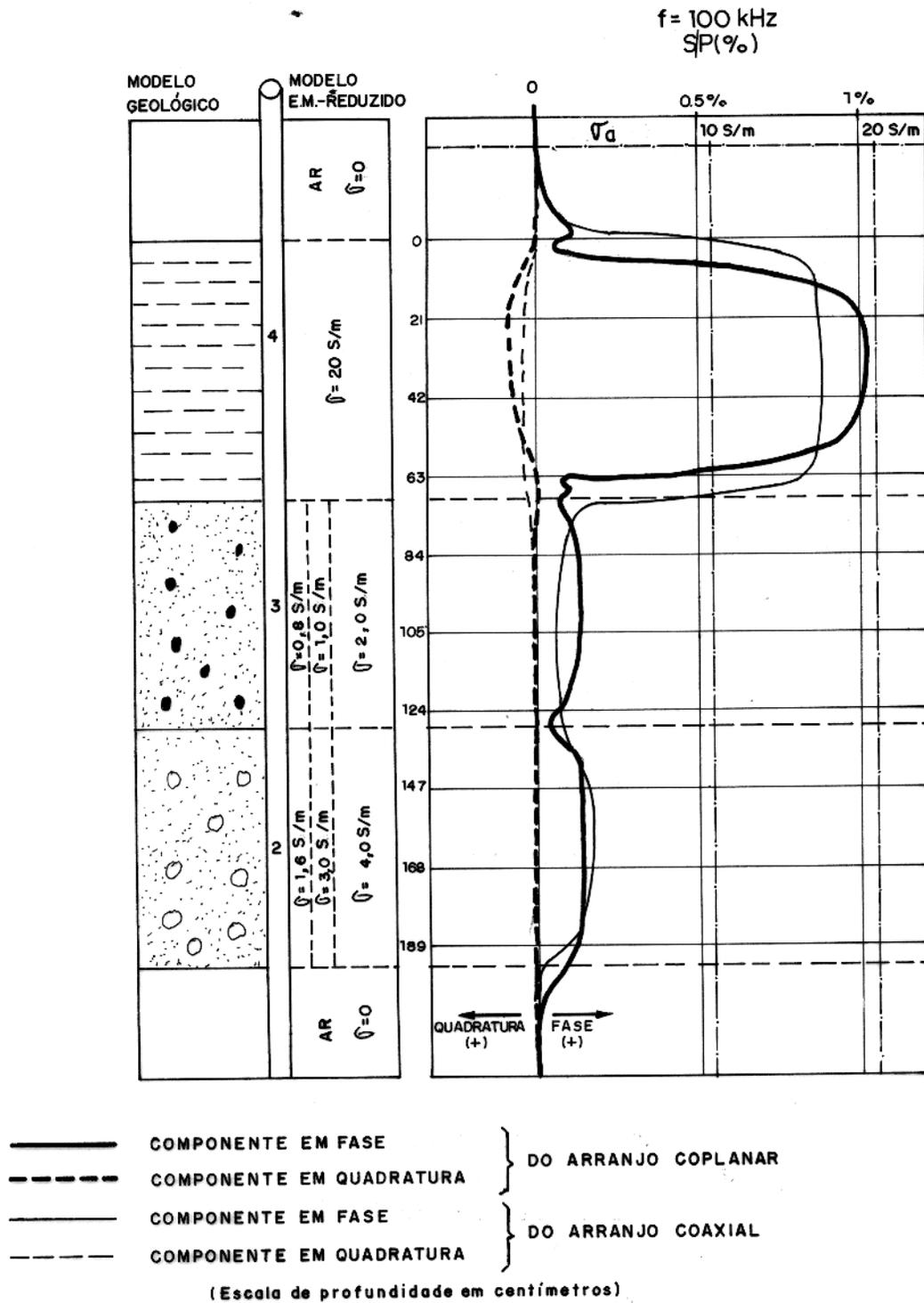
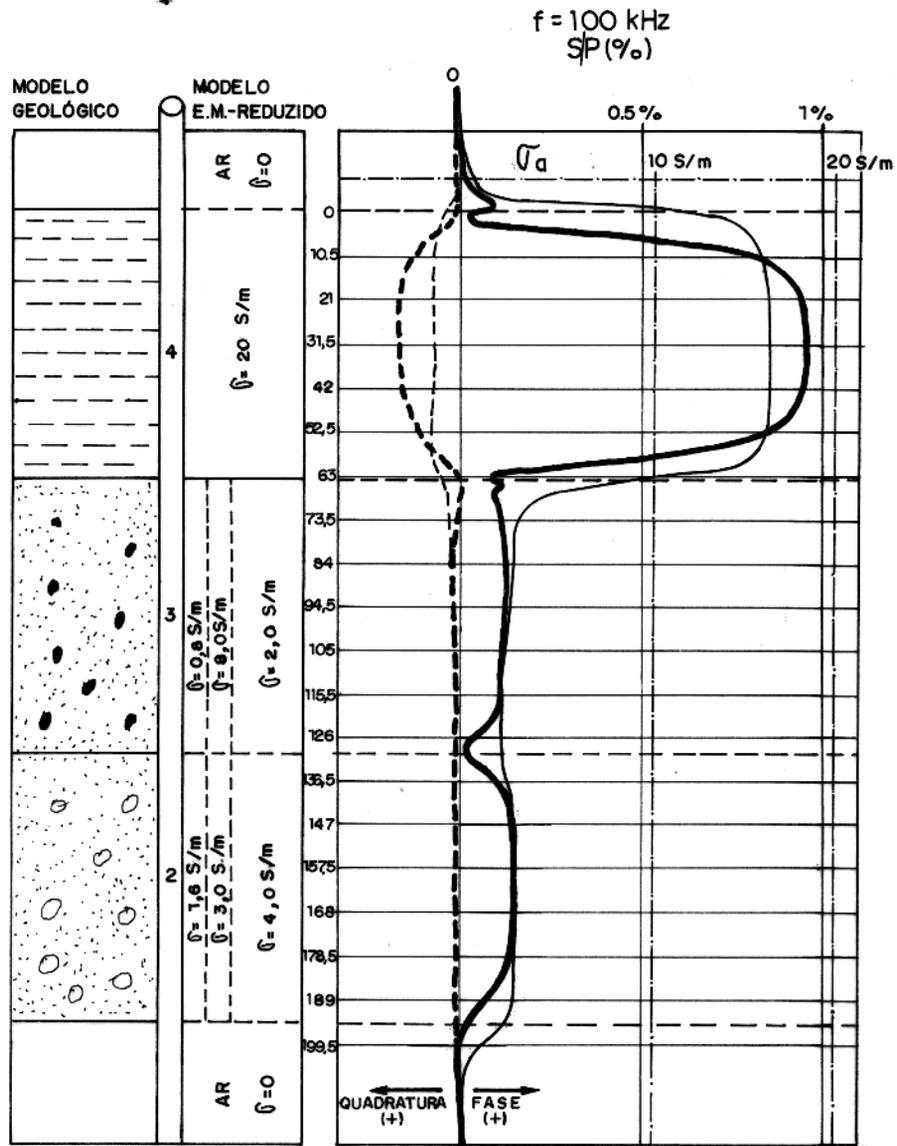


Figura 19— Respostas dos arranjos de bobinas coaxial e coplanar referentes ao modelo 3.



- COMPONENTE EM FASE } DO ARRANJO COPLANAR
- - - COMPONENTE EM QUADRATURA } DO ARRANJO COPLANAR
- COMPONENTE EM FASE } DO ARRANJO COAXIAL
- - - COMPONENTE EM QUADRATURA } DO ARRANJO COAXIAL

(Escala de profundidade em centímetros)

Figura 20— Respostas dos arranjos de bobinas coaxial e coplanar referentes ao modelo 4.

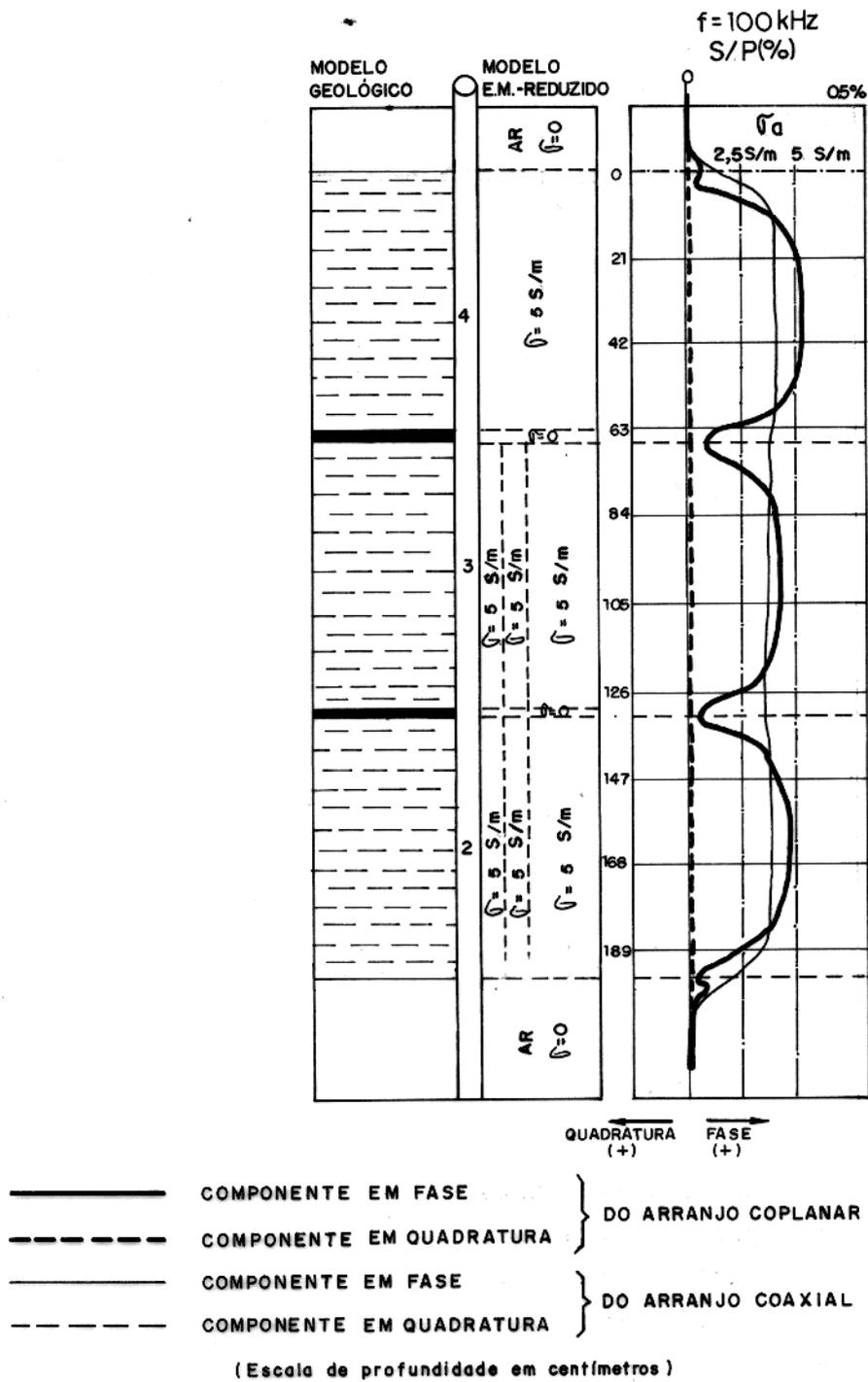


Figura 21 - Respostas dos arranjos de bobinas coaxial e coplanar referentes ao modelo 5.

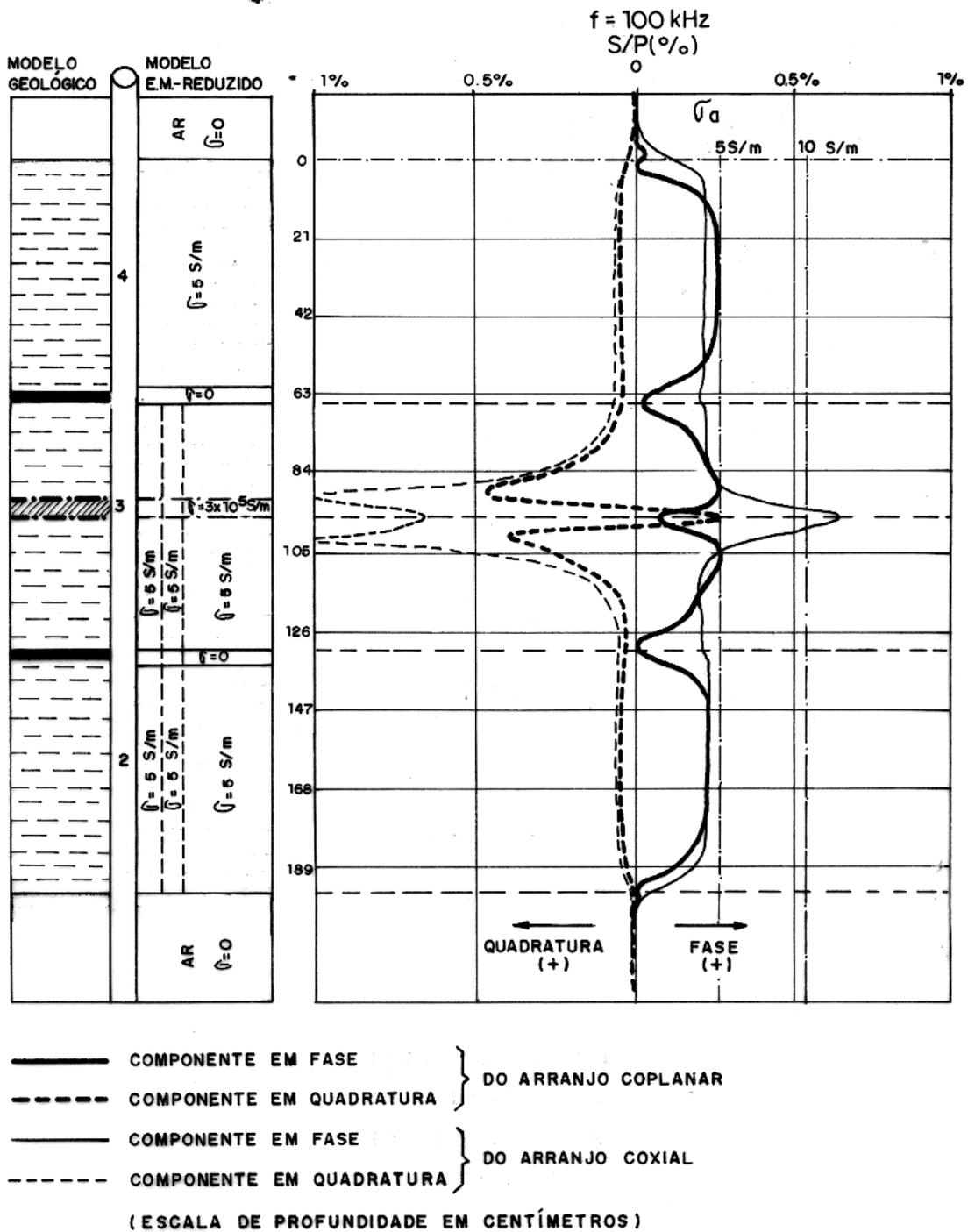


Figura 22 - Respostas dos arranjos de bobinas coaxial e coplanar referente ao modelo 6.

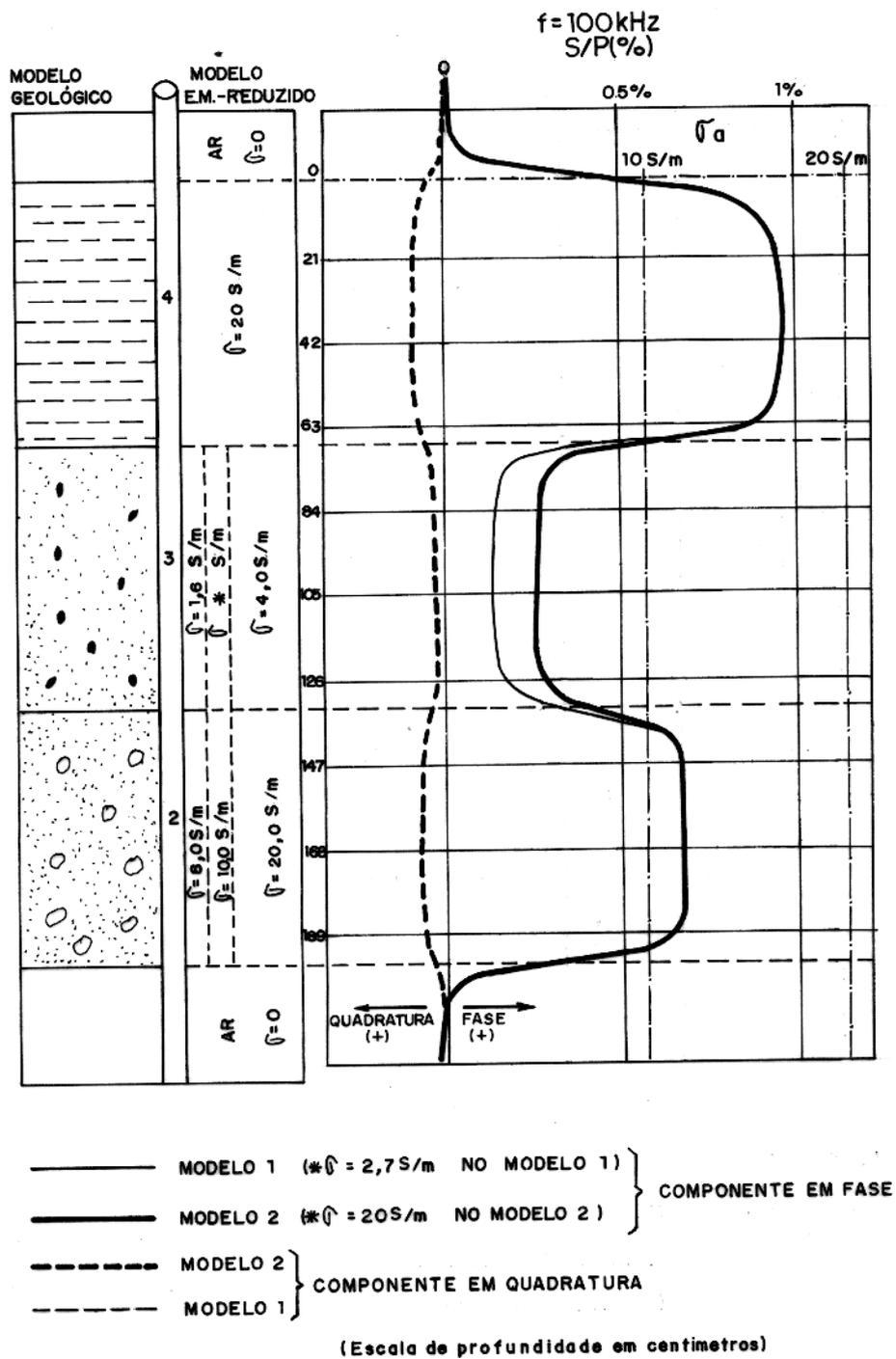


Figura 23— Respostas do arranjo coaxial de bobinas para os modelos 1 e 2 (modelo 2 referente ao perfil de invasão tipo 'Annulus').

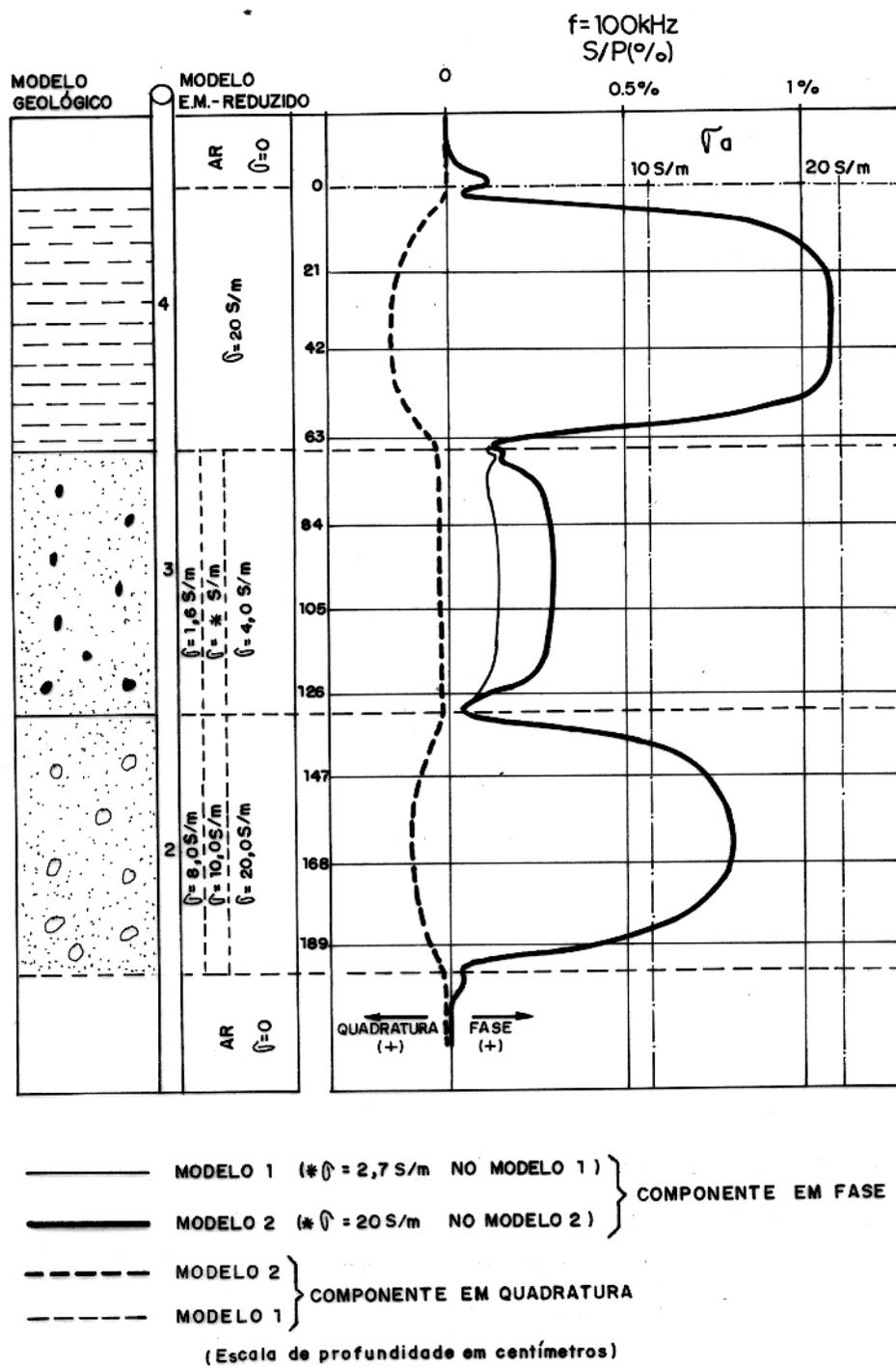


Figura 24— Respostas do arranjo coplanar de bobinas para os modelos 1 e 2 (modelo 2 referente ao perfil de invasão tipo "Annulus").