UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS–GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

ESTUDO DA RESPOSTA DE PERFILAGEM DE INDUÇÃO DE CAMADAS FINAS COM DIFERENTES ARRANJOS DE BOBINAS: MODELAMENTO ANALÓGICO

TESE APRESENTADA POR

PAULO ROBERTO DE CARVALHO

COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOFÍSICA

Data de Aprovação : 16/12/1993

COMITÊ DE TESE:

Om Prakash Verma

Dr. Om Prakash Verma (Orientador)

Allen Quentin Howard, Jr.

Dr. Allen Quentin Howard, Jr.

Antonio A. González C.

Dr. Antonio Abel Gonzalez Carrasquilla

BELÉM

1993

CARVALHO, Paulo Roberto de. **Estudo da resposta de perfilagem de indução de camadas finas com diferentes arranjos de bobinas: modelamento analógico.** Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 1993. 74 p. il.
Tese (Mestrado em Geofísica) – Curso de Pós–Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPa, 1993.

1. PERFILAGEM DE INDUÇÃO DE POÇOS. 2. CAMADAS FINAS. 3. MODELAMENTO ANALÓGICO. I. Título.

Dedico este trabalho a minha irmã
Maria do Carmo de Carvalho,
"Carminha", por ter sido a mola
impulsora para o desenvolvimento
da nossa família.

AGRADECIMENTOS

Ao corpo docente, técnico e administrativo do Departamento de Geofísica da UFPA por terem propiciado os meios para a realização deste trabalho.

Ao convênio UFPA/PETROBRÁS/FADESP/CAPES/FINEP/CNPq pelo suporte financeiro, sem o qual não seria possível a realização deste trabalho.

Ao Dr. Om Prakash Verma pelo desafio assumido na orientação desta tese e ao Dr. Allen Quentin Howard, Jr. pela valiosa contribuição nas interpretações dos fenômenos físicos observados experimentalmente.

Sabendo que corro o risco de me esquecer de alguns nomes, não poderia deixar de citar, apenas em ordem alfabética, a presença marcante de pessoas como: Abel, Adelmo, Jadir, Klaus, "Norma e Pedrinho".

SUMÁRIO

p.

DEDICATÓRIA i

AGRADECIMENTOS ii

RESUMO 1

ABSTRACT 2

1 - INTRODUÇÃO 3
1.1 TRABALHOS ANTERIORES 3
1.2 OBJETIVOS DESTE ESTUDO 6

2 - PERFILAGEM DE INDUÇÃO EM POÇO 8
2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO 8
2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS 12
2.2.1 **Fator Geométrico** 12
2.2.1.1 Fator Geométrico Radial 13
2.2.1.2 Fator Geométrico Vertical 13
2.2.2 **Efeito de Propagação** 15
2.3 FERRAMENTAS DE INDUÇÃO ATUAIS 17

3 - CAMADAS FINAS 21
3.1 CAMADAS FINAS 21
3.2 IMPORTÂNCIA ECONÔMICA E AMBIENTES DE OCORRÊNCIA 23
3.3 TÉCNICAS APLICÁVEIS 25
3.3.1 **Perfilagem de indução** 27

4 - CONJUNTO EXPERIMENTAL 28
4.1 MODELAMENTO ANALÓGICO 28
4.2 RELAÇÕES DE SIMILITUDE 29
4.2.1 **Equação de Similitude** 29
4.3 APROXIMAÇÕES FÍSICAS 31

4.4 MODELO GEOELÉTRICO 31
4.5 INSTRUMENTAÇÃO 38
4.5.1 **Sistema de Transmissão** 38
4.5.2 **Sondas** 38
4.5.2.1 Arranjos de Bobinas 38
4.5.2.2 Confecção das Sondas 41
4.5.2.3 Sistema de movimentação das sondas 43
4.5.3 **Sistema de Recepção** 43

5 - MEDIÇÕES E ANÁLISE DOS DADOS 47
5.1 PROCEDIMENTOS PARA MEDIÇÃO 47
5.1.1 **Calibração do Detetor de Fase e Registrador Gráfico** 47
5.1.2 **Cancelamento do Campo Primário** 47
5.1.3 **Medição dos Campos Secundários** 48
5.2 TESTES COM O SISTEMA ELÉTRICO 48
5.3 EFEITOS DA ZONA DE INVASÃO DE FLUIDOS 58
5.4 MODELOS GEOLÓGICOS SIMULADOS 61
5.4.1 **Pacote Psamítico com Níveis Pelíticos** 61
5.4.1.1 Perfis de Indução 61
5.4.2 **Pacote Pelítico com Lentes Psamíticas** 64
5.4.2.1 Perfis de Indução 64

6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES 69
6.1 SUGESTÕES 71

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 72

RESUMO

Objetivando contribuir para a melhoria da resolução vertical das sondas de indução, utilizando arranjos de bobinas não-convencionais, fizemos um estudo comparativo das respostas obtidas com os arranjos coaxial e coplanar, através do modelamento analógico em escala reduzida.

Construimos sondas de indução com um par de bobinas, bem como modelos geoelétricos que simulam seqüências litoestratigráficas formadas por camadas tanto espessas como delgadas, com ou sem invasão de fluidos, utilizando um fator de redução de escala igual a 20. O sistema de instrumentação nos permitiu medições da razão entre o campo secundário com relação ao primário na ordem de 0,01 %.

Analisando os perfis obtidos com ambos os arranjos, coaxial e coplanar, chegamos a conclusão que:

- quando se refere a camadas delgadas de condutividade elétrica relativamente elevadas, como é o caso de níveis argilíticos num pacote arenítico contendo hidrocarbonetos, o arranjo de bobinas coaxial é visivelmente superior ao coplanar, no que se refere ao posicionamento e estimativa das espessuras destas finas camadas;

- por outro lado, quando se trata de camadas delgadas de condutividade relativamente baixa, como é o caso de lentes areníticas saturadas em hidrocarbonetos num pacote de folhelho, verificamos que o arranjo coplanar apresenta uma resolução vertical sensivelmente melhor, tanto para camadas finas quanto para as de maior espessura;

- o efeito de camadas adjacentes (*shoulder effect*) se apresenta bem mais acentuado nos perfis obtidos com o arranjo coaxial;

- o arranjo coplanar apresenta uma melhor definição de bordas para as camadas espessas. Entretanto, em camadas de menor espessura, o arranjo coplanar perde aquela ligeira oscilação do sinal que posiciona as interfaces de contato entre camadas.

ABSTRACT

Analog model studies were carried out comparing the eletromagnetic responses of various two-coil systems in a borehole, in order to improve the vertical resolution of the indution tools. For this purpose geoeletric models, simulating well-logging situations in the stratified beds of varying thicknesses, with or without fluid invasion, were constructed at a reduced scale of 20. The sensitivity of the system to measure relative fields (secondary/primary) is of the order of 0.01 %.

Following conclusions were drawn after analysing the response profiles obtained for a coaxial and a coplanar coil systems:

- In case of thin conducting beds placed in relatively resistive beds, such as shale beds in sandstones containing hydrocarbons, the coaxial system shows a better resolution than coplanar system both in determination and estimating the thickness of thin beds;
- On the other hand, in the presence of thin resistive beds placed in relatively conductive zone, such as sandstone containing hydrocarbons lying in a shale, the coplanar coil system gives a better vertical resolution than the coaxial system;
- "Shoulder effect" is much more pronounced in the coaxial system than the coplanar coils;
- In case of thick beds, bed-boundaries are well defined in the coplanar coil system response. However, when the thickness is reduced the small oscillating signal indicating the interfaces disappears.

1 - INTRODUÇÃO

Os perfis elétricos são de grande importância na prospecção de hidrocarbonetos, visto que, em associação com outros perfis, delimitam zonas produtoras daquelas não produtoras.

As bacias sedimentares que contêm os campos petrolíferos apresentam freqüentemente um empilhamento estratigráfico formado por camadas alternadas de areia e folhelho de espessuras relativamente finas. É de extrema importância para os cálculos de produção conhecer as espessuras destas camadas, embora a maioria das ferramentas de perfilagem não tem resolução vertical suficiente.

Um dos maiores problemas das sondas de indução eletromagnética é quanto as seqüências de camadas delgadas (*thin beds reservoir*), que normalmente não são bem definidas devido às oscilações da ferramenta, rugosidade nas paredes do poço, ruídos nas transmissões de dados, além de outros fatores.

1.1 TRABALHOS ANTERIORES

Abordaremos de forma sucinta e em ordem apenas cronológica, alguns trabalhos de maior relevância para o melhor acompanhamento do nosso estudo.

- DOLL (1949) foi o pioneiro na perfilagem de indução tendo feito uma adaptação do princípio de funcionamento de um detector de minas criado por ele. Esta ferramenta era constituída inicialmente com apenas dois pares de bobinas e era a única que permitia leituras de resistividade em poços contendo lamas resistivas, pois não havia contatos galvânicos entre os sensores e a formação.

  Posteriormente, devido à necessidade de melhorar a resolução vertical das ferramentas de indução, Doll e sua equipe técnica na Schlumberger, em 1959, construiram uma ferramenta com três pares de bobinas (Figura 1.1), de modo que estes pares adicionais permitissem uma melhor focalização das linhas de indução.

- DUESTERHOEFT (1961) analisou a propagação de ondas eletromagnéticas em meios estratificados e a solução analítica da resposta da ferramenta de indução.

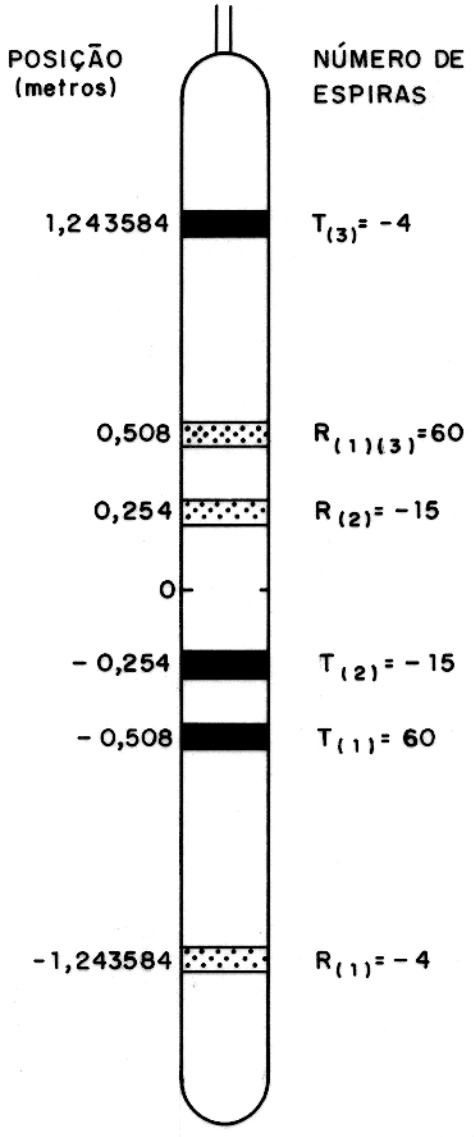


Figura 1.1 - Esquema estrutural da sonda 6FF40, onde T é transmissor, e R é receptor. Os subíndices indicam quais transmissores e receptores relacionam-se (Adaptado de VIEIRA, 1990).

- MORAN & KUNZ (1962) obtiveram a solução analítica completa para as sondas de duas bobinas em meio homogêneo.

- CHEW et al. (1984) analisaram para o ambiente de poço a difração das ondas axialmente simétricas nas interfaces de camadas horizontais. Eles estudaram o problema de espalhamento das ondas por um método sistemático de aproximação da forma contínua para a discretizada, permitindo teoricamente qualquer grau de precisão, dependendo apenas dos recursos computacionais disponíveis.

- HARBEN et al. (1987) analisaram através de modelamento digital a resposta de sistemas de duas bobinas, avaliando os efeitos de freqüência, espaçamento entre bobinas, contraste de resistividade e posição de anomalias.

- ANDERSON et al. (1988) desenvolveram filtros e técnicas de deconvolução para corrigir o *skin effect.*

- SALVADORETTI (1990) desenvolveu um sistema de modelamento analógico capaz de simular o perfil de indução de duas bobinas coaxiais em ambientes comuns à geofísica de poço. O sistema é composto de um modelo geológico que simula camadas espessas com condutividades variáveis invadidas pelo *mud filtrate*, e de um sistema elétrico formado pelo conjunto: transmissor, sonda e receptor. O objetivo deste trabalho foi montar uma base mínima necessária para futuros estudos envolvendo sondas com diferentes arranjos de bobinas, focalizadas ou não.

- MONTENEGRO (1991) através do modelamento analógico, verificou que o arranjo de duas bobinas coplanares apresenta melhor resolução vertical do que o arranjo de duas bobinas coaxiais. As respostas para os dois arranjos foram obtidas em situações de elevado contraste de resistividade entre as camadas adjacentes, como por exemplo, intercalações de arenitos portadores de hidrocarbonetos com folhelhos. Outra vantagem do arranjo coplanar sobre o coaxial, citado pelo autor, é que ele apresenta uma melhor definição de borda das camadas além de possivelmente apresentar resolução para situações assimétricas como camadas inclinadas e fraturas. A única desvantagem do arranjo coplanar em relação ao coaxial é operacional, já que no coplanar necessita-se de várias medidas angulares em uma mesma profundidade para cobrir 360°. Para resolver o problema da operacionalidade do arranjo coplanar, foi sugerida a montagem de sondas com várias bobinas coplanares, cobrindo várias posições angulares.

- HOWARD & CHEW (1992) modelaram teoricamente as sondas de indução eletromagnética em meios estratificados com camadas inclinadas, considerando os efeitos do poço e da invasão de fluidos. Este método é aproximado e é uma extensão da teoria

do fator geométrico e das aproximações de Born, tendo como vantagem a sua simplificação numérica e recursos computacionais não avançados, comparado aos métodos de elementos finitos.

Este trabalho tem uma importância bastante significativa para o nosso estudo, pois ele vem reforçar teoricamente alguns resultados obtidos em nosso modelamento experimental, principalmente no que se refere à demarcação de interfaces de camadas.

- SOUZA (1992) estudou a aplicabilidade de uma ferramenta coplanar de duas bobinas na detecção de zonas fraturadas, através de modelamento analógico reduzido em laboratório. O modelo geológico utilizado é um meio homogêneo resistivo com porções fraturadas e não fraturadas. As zonas fraturadas cruzando a perfuração com mergulhos de 0° (horizontais), 45°, 60° e 90° (verticais) a diferentes distâncias das paredes do poço. Os resultados obtidos neste trabalho, sob a forma de perfis, mostraram que a ferramenta coplanar fornece informações sobre o mergulho, espessura e distância com relação às paredes do poço, dependendo da posição relativa das bobinas e da zona fraturada. Como as ferramentas de indução coplanar não permitem um recobrimento de toda a parede do poço, perdendo informações a 90° do eixo das bobinas, foi sugerida a construção de um sistema de duplo acoplamento semi-nulo (DASN). Além do maior recobrimento, essa ferramenta fornece uma "técnica de olhada rápida" (*quick-look technique*) para estimar qualitativamente o mergulho da zona fraturada.

1.2 OBJETIVOS DESTE ESTUDO

Diante a importância de conhecer as heterogeneidades dos reservatórios, torna-se cada vez mais necessário melhorar a resolução vertical das ferramentas de perfilagem visando:

- quantificar níveis argilosos intercalados com horizontes potencialmente produtores;
- otimizar o posicionamento das ferramentas de teste a cabo e de testemunho lateral, na definição de intervalos de canhoneio;
- permitir uma melhor correlação rocha-perfil.

Procuraremos simular em laboratório modelos de seqüências sedimentares trapeadoras de hidrocarbonetos em camadas finas (*thin beds reservoir*), tais como arenitos (rochas reservatórios) sobrepostos e sotopostos por folhelhos (rochas geradoras e selantes). Mais especificamente, aquelas formadas por camadas alternadas permeáveis e não permeáveis, testando dois arranjos de bobinas das ferramentas de indução eletromagnética (arranjo coaxial e o

coplanar), visando verificar qual deles apresenta uma melhor resolução vertical. O estudo será através de modelamento analógico, onde variaremos a freqüência de transmissão para um modelo geoelétrico em escala reduzida, simulando um reservatório de camadas finas.

Para simular em laboratório um ambiente em escala natural, utilizaremos a equação de similitude (Equação 4.15), obtida a partir da linearidade das equações de Maxwell no domínio da freqüência. Ela nos permitirá a transformação de um modelo geológico em modelo analógico experimental. WARD (1967) fornece as condições para que um sistema modelo reproduza o sistema real.

2 - PERFILAGEM DE INDUÇÃO EM POÇO

A perfilagem elétrica de indução foi inventada por DOLL (1949) com o objetivo de quantificar a saturação de água da formação ($S_w = \sqrt{R_o/R_t}$) através de valores medidos pela sonda de indução das resistividades da zona virgem (R_t). Efeitos tais como o *skin effect*, o *shoulder effect* e a invasão do tipo ânulus são alguns fatores que impossibilitam uma leitura correta do valor real das condutividades da formação pela ferramenta.

2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A ferramenta de indução atual (Figura 1.1) tem um total de seis bobinas (3 pares). No entanto, torna-se bem mais simples a compreensão do princípio de funcionamento da ferramenta, considerando apenas um par de bobinas (transmissora e receptora).

Um bobina transmissora, coaxial ao eixo do poço, é energizada por uma fonte de corrente alternada, gerando um campo eletromagnético de mesma freqüência em sua volta. Este campo assim gerado penetra radialmente na lama e nas camadas a altura da bobina transmissora.

Como as rochas sedimentares são geralmente permo-porosas contendo soluções eletrolíticas, elas constituem assim bons condutores de corrente elétrica. A Figura 2.1 apresenta as rochas como se fossem formadas por infinitos "fios elétricos" coaxiais ao eixo do poço.

Baseado nas leis do eletromagnetismo (Leis de Ampère e Faraday), aparece ao redor do poço um fluxo circular de corrente (correntes de Foucault) devido aos "*loops* de rocha". Estas correntes estão defasadas de 90° em relação à corrente que circula na bobina transmissora (Figura 2.2), e sua magnitude depende da condutividade das formações circunvizinhas ao poço.

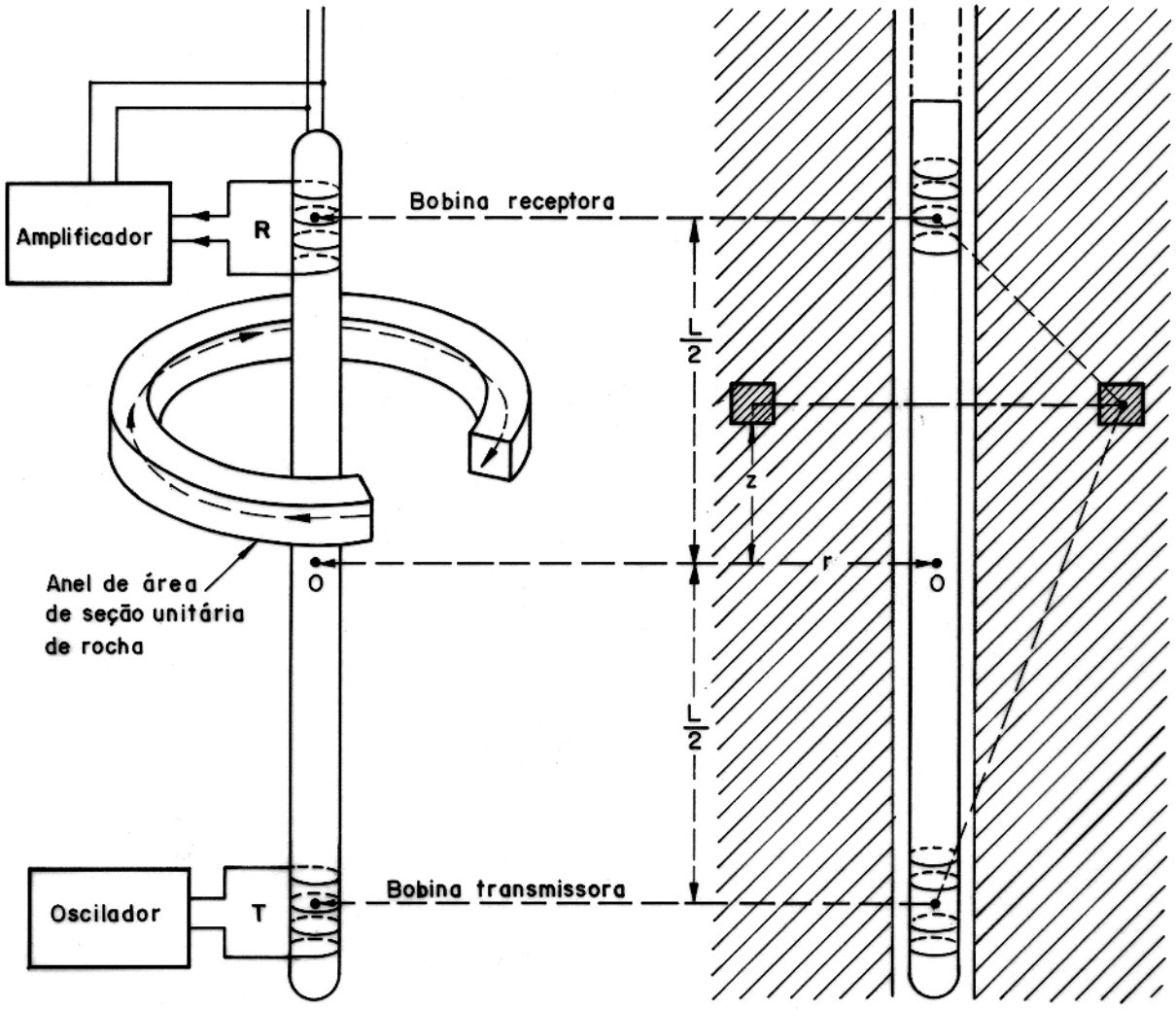


Figura 2.1 - Princípio de indução da sonda de duas bobinas (Adaptado de DOLL, 1949).

Estes *loops* de correntes criam um campo magnético secundário que induzirá na bobina receptora uma voltagem alternada (Figura 2.3). Este sinal captado (ΔV_R) será dado por:

$$\Delta V_R = Kg\sigma, \tag{2.1}$$

em que
K - é uma constante ferramental (depende das características das bobinas transmissora e receptora);
g - fator geométrico (depende da posição dos *loops* de corrente com relação ao par de bobinas);
σ - condutividade do meio.

Infelizmente, a bobina receptora não capta somente o sinal proveniente das formações de interesse. Ela também registra sinais de acoplamento direto entre a bobina transmissora e receptora (eliminado interna e eletronicamente), sinais gerados nas diveras zonas circunvizinhas (lama, zona lavada, zona de transição, zona virgem e camadas adjacentes), entre outros sinais espúrios. Para camadas muito condutivas, ocorre uma série de interferências entre os campos criados pelos diferentes "anéis de rocha", inclusive auto-indução. Estas interferências provocam diminuições no sinal resposta (ΔV_R).

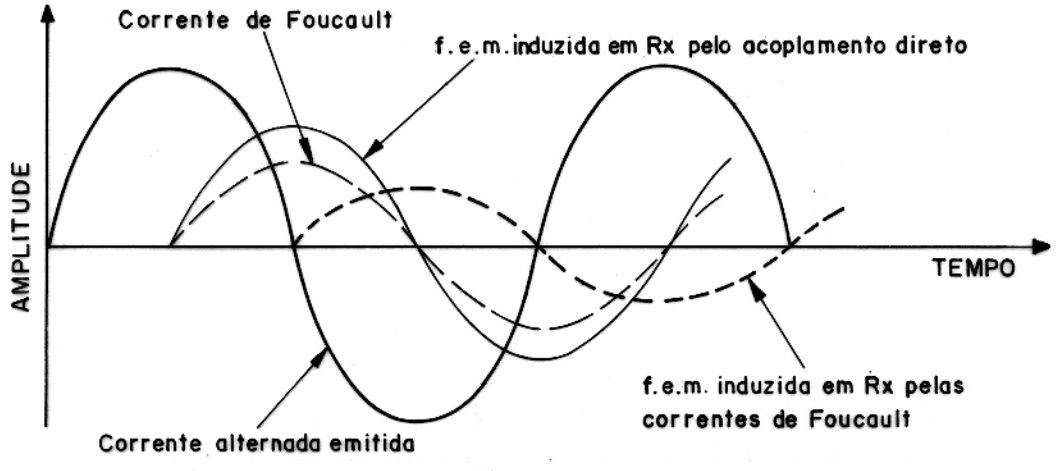


Figura 2.2 - Diferença de fase entre as correntes induzidas relativas a corrente que percorre a bobina transmissora (Modificado de SERRA, 1984).

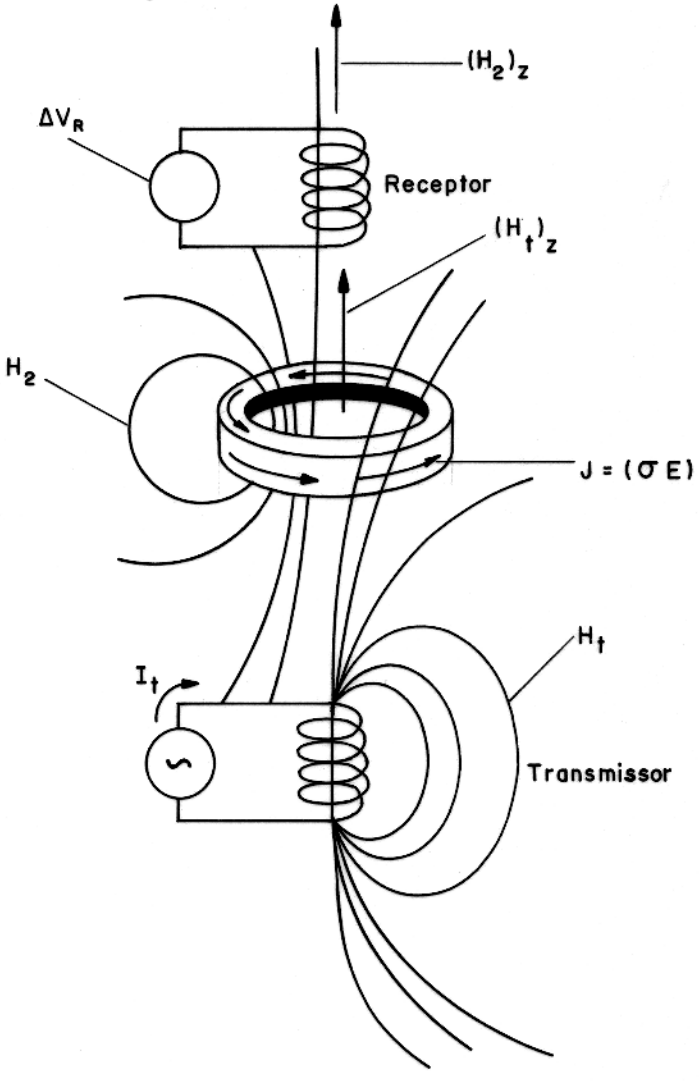


Figura 2.3 - O princípio de ferramentas de indução. Uma bobina transmissora, dentro do qual circula uma corrente I_t, gera um campo magnético H_t, o qual induz um campo elétrico (E) neste mesmo meio. Este campo elétrico acarreta numa corrente (J) de intensidade crescente com a condutividade (σ) do meio. Esta corrente no meio, por sua vez, gera o campo magnético H_2, cuja componente $(H_2)_z$ induz uma voltagem ΔV_R na bobina receptora (Adaptado de ELLIS, 1987).

2.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.2.1 Fator Geométrico

Para um único anel de rocha com secção transversal unitária de raio r, situado a uma distância z do ponto médio entre as duas bobinas (Figura 2.1), DOLL (1949) obteve através da lei de Biot-Savart a seguinte voltagem na bobina receptora:

$$V_R = \left[\frac{\mu^2\omega^2 A_T A_R I_T}{4\pi L}\right]\left[\frac{L}{2}\frac{r^3}{(r^2+(L/2-z)^2)^{3/2}(r^2+(L/2+z)^2)^{3/2}}\right]\sigma(r,z). \tag{2.2}$$

Comparando com a equação 2.1, verificamos na equação 2.2 que os parâmetros do primeiro par de colchetes descrevem a ferramenta (K) e o segundo par de colchetes contém as informações relativas a posição do anel unitário ($g(r,z)$). O último termo da equação 2.2, $\sigma(r,z)$, é a condutividade da formação dentro do anel, considerada constante.

Para um número infinito de anéis e considerando que cada anel contribua independentemente para a força eletromotriz que se desenvolve na bobina receptora, a resposta da ferramenta será:

$$V_R = K\int_{z=-\infty}^{z=+\infty}\int_{r=0}^{r=+\infty} g(r,z)\sigma(r,z)drdz. \tag{2.3}$$

Sabemos que a formações circunvizinhas ao eixo do poço não são homogêneas, subdividindo-se em zonas cilíndricas coaxiais de diferentes condutividades (lama, zona lavada, zona de transição e zona virgem). Assim a função resposta torna-se:

$$V_R = K\left[\sigma_a\int\int_a g(r,z)drdz + \sigma_b\int\int_b g(r,z)drdz + \cdots\right], \tag{2.4}$$

em que $a, b, \ldots$ são as diferentes zonas cilíndricas coaxiais.

Chamando de G as integrais duplas $\int\int g(r,z)drdz$ teremos:

$$V_R = K[\sigma_a G_a + \sigma_b G_b + \cdots], \tag{2.5}$$

em que $G_a, G_b, \ldots$ são os "fatores geométricos" das diferentes zonas a, b, ... respectivamente.

O perfil de indução é uma medida da razão $\frac{V_R}{K}$ denominada "condutividade aparente" (σ_{ap}):

$$\sigma_{ap} = \frac{V_R}{K} = \sigma_a G_a + \sigma_b G_b + \cdots, \tag{2.6}$$

em que os valores $G_a, G_b, ...$ representam a fração de contribuição de cada zona coaxial para o sinal total. Sendo assim:
$G_a + G_b + \cdots = 1$.

2.2.1.1 Fator Geométrico Radial

O fator geométrico radial $G(r)$ é obtido integrando a função $G(r,z)$ entre os limites $-\infty < z < +\infty$;

$$G(r) = \int_{z=-\infty}^{z=+\infty} G(r,z)dz. \tag{2.7}$$

Podemos verificar que a função $G(r)$ terá o seu valor máximo a uma distância aproximadamente igual a L/2 a partir do eixo da sonda (Figura 2.4). A partir da distância $r > 3L$ as contribuições do meio são praticamente negligenciáveis.

2.2.1.2 Fator Geométrico Vertical

O fator geométrico vertical $G(z)$ é obtido integrando a função $G(r,z)$ entre os limites $0 \leq r < +\infty$;

$$G(z) = \int_{r=0}^{r=+\infty} G(r,z)dr. \tag{2.8}$$

O gráfico da função $G(z)$ (Figura 2.5) representa as contribuições de discos de extensão radial infinita e é analiticamente representada por:

$$G(z) = \frac{1}{2L} \quad \text{para} \quad |z| < L/2, \tag{2.9}$$

$$G(z) = \frac{1}{8z^2} \quad \text{para} \quad |z| > L/2. \tag{2.10}$$

Para um meio homogêneo, podemos observar que os *loops* que estiverem situados entre as duas bobinas são os que apresentam uma maior contribuição para o sinal resposta. No entanto, em meios estratificados com camadas de diferentes condutividades, podemos ter camadas bem distantes do sensor ($z > 10L$) e apresentarem uma significativa contribuição no sinal devido a sua alta condutividade, embora a função $G(z)$ seja pequena. Assim uma camada altamente condutiva, mesmo a uma distância considerável, acima ou abaixo da sonda, pode contribuir mais para o sinal resposta do que uma camada de menor condutividade nas proximidades do centro da ferramenta.

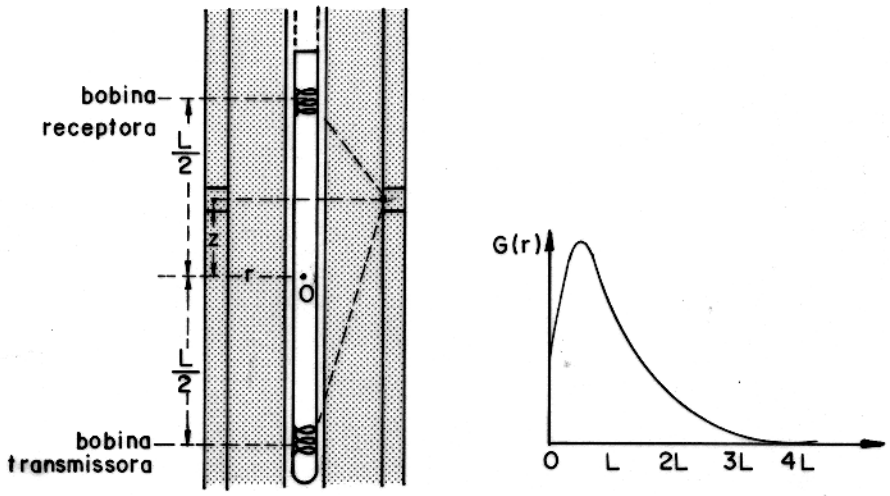


Figura 2.4 - Fator geométrico radial, $G(r)$ (Adaptado de DUESTERHOEFT, 1961).

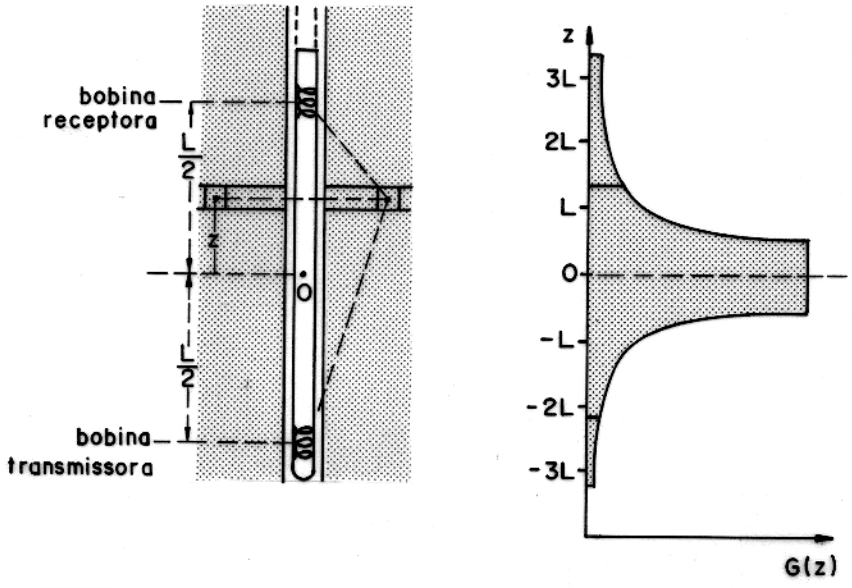


Figura 2.5 - Fator geométrico vertical, $G(z)$ (Adaptado de DUESTERHOEFT, 1961).

Como o nosso estudo é basicamente experimental, nos limitaremos a uma abordagem teórica bastante simples com relação à função resposta das sondas de indução, embora achamos que seja suficiente para a compreensão dos problemas a serem analisados neste trabalho. Podemos encontrar atualmente na literatura, uma abordagem matemática bem mais avançada e precisa, principalmente no que se refere ao fator geométrico vertical, utilizando por exemplo a deconvolução de Born. HOWARD (1986), HOWARD (1987), BARBER (1988) entre outros, determinaram a função resposta para sondas de indução com diferentes numeros de bobinas, utilizando técnicas de inversão.

2.2.2 Efeito de Propagação

A onda eletromagnética sofre uma progressiva redução na sua intensidade com a propagação devido a absorção de energia pelas rochas. Esta absorção se caracteriza de duas formas:

- uma redução na amplitude da onda, aumentando progressivamente com à distância e à condutividade do meio;
- mudanças de fase da onda gerada no volume de investigação da ferramenta, o que levará a erros de leitura, pois o sensor foi construído para captar somente sinais com 180° de defasagem daquele emitido pelo transmissor.

MORAN & KUNZ (1962) analisaram o comportamento do campo eletromagnético nas sondas de indução e obtiveram expressões analíticas exatas para o perfil de duas bobinas. Eles observaram que a voltagem calculada era menor do que a predita pela Teoria do Fator Geométrico formulada por DOLL (1949). Esta redução sofrida pelo sinal foi denominada "efeito de propagação" (*Skin effect*).

Consideremos um meio homogêneo, isotrópico e linear, onde temos uma bobina transmissora alimentada por uma corrente senoidal, e uma outra receptora. Supondo que ambas bobinas se comportem como pequenos dipolos, a voltagem medida na bobina receptora será dada pela equação (MORAN & KUNZ, 1962):

$$V = \frac{2TR(\pi a^2)^2}{4\pi} I i\omega\mu(1 - ikL)\frac{e^{ikL}}{L^3}, \tag{2.11}$$

em que

i - operador complexo ($i = \sqrt{-1}$);

k - constante de propagação ($k = \sqrt{i\omega\mu\sigma}$);

T - número de espiras da bobina transmissora;
R - número de espiras da bobina receptora;
a - raio das bobinas;
I - corrente na bobina transmissora;
ω - freqüência angular da corrente ($\omega = 2\pi f$);
μ - permeabilidade magnética do meio;
L - distância entre bobinas.

A equação 2.11 pode ser subdividida em V_R (voltagem em fase com I) e V_x (voltagem em quadratura com I).

$$-V_R = K\sigma(1 - \frac{2}{3}\frac{L}{\delta} + \frac{2}{15}\frac{L^3}{\delta^3} - \cdots), \tag{2.12}$$

$$V_x = K\sigma\frac{\delta^2}{L^2}(1 - \frac{2}{3}\frac{L^3}{\delta^3} + \cdots), \tag{2.13}$$

sendo

$$K = \frac{(\omega\mu)^2(\pi a^2)^2 TRI}{4\pi L} \tag{2.14}$$

e

$$\delta = \frac{1}{(\pi f \mu \sigma)^{1/2}}. \tag{2.15}$$

A quantidade δ é o *skin depth*, que dá a magnitude da penetração do campo eletromagnético em um meio condutor.

Na equação 2.12 o primeiro termo da série é o valor da voltagem recebida pela bobina receptora em um meio homogêneo e isotrópico, segundo a teoria do fator geométrico. Os demais termos são correções no valor predito pela teoria do fator geométrico devido à atenuação e à troca de fase sofrida pelo campo eletromagnético durante a propagação (*skin effect*) (MORAN & KUNZ, 1962).

A partir da equação 2.12 podemos escrever:

$$\frac{-V_R}{K} = \sigma_a = \sigma(1 - \frac{2}{3}\frac{L}{\delta} + \frac{2}{15}\frac{L^3}{\delta^3} - \cdots). \tag{2.16}$$

O valor $\frac{-V_R}{K}$ é a chamada condutividade aparente do meio (σ_a), e representa o valor esperado para a condutividade pela teoria de Doll.

Na prospecção geofísica de poço temos normalmente $\frac{L}{\delta} < 1$. Logo, $\sigma_a < \sigma$. Assim, definimos como *skin effect signal* (σ_s) para as sondas de duas bobinas como sendo o valor obtido pela equação 2.17, desprezando os termos de ordem mais alta nas série de potências.

$$\sigma_s = \sigma - \sigma_a \simeq \frac{2}{3}\frac{L}{\delta}\sigma, \tag{2.17}$$

Quando a condutividade do meio é muito baixa, o *skin effect* tende a zero.

Fazendo o quociente entre as equações 2.12 e 2.13 teremos:

$$\frac{-V_R}{V_x} = \frac{(1 - \frac{2}{3}\frac{L}{\delta} + \frac{2}{15}\frac{L^3}{\delta^3} - \cdots)}{(\frac{\delta^2}{L^2}(1 - \frac{2}{3}\frac{L^3}{\delta^3} + \cdots))}. \tag{2.18}$$

Supondo que $\frac{L}{\delta} << 1$, teremos $\frac{-V_R}{V_x} << 1$, dando-nos uma idéia do desafio a ser enfrentado na separação dos dois sinais.

2.3 FERRAMENTAS DE INDUÇÃO ATUAIS

A ferramenta de indução padrão utilizada na atualidade é a DIL (*Dual Induction Log*). Ela é uma combinação da 6FF40, que fornece uma leitura profunda (ILD), com uma outra de mesma resolução vertical e espaçamento menor entre os sensores que fornece uma leitura mais rasa (ILM). Existe ainda uma terceira leitura de resistividade rasa tal como as Laterolog-8, SFL, entre outras.

Mais recentemente foi criado uma versão melhorada da 6FF40 que foi denominada por *Phasor Induction* a qual pode operar nas freqüências de 10, 20 ou 40 kHz. As baixas freqüências reduzem o *Skin effect* nas formações de menor resistividade enquanto as altas freqüências permitem uma melhor leitura nas formações mais resistivas. Estas ferramentas medem as componentes em fase e em quadratura do sinal permitindo desta forma uma melhor correção para o *Skin effect* e uma melhor resolução vertical para camadas finas (*thin beds*).

A função resposta radial das ferramentas *Phasor* é basicamente linear e a função resposta vertical invariante com a condutividade da formação. Portanto, podemos efetuar uma correção quase completa para o efeito de camadas adjacentes (*shoulder effect*) e aplicar técnicas avançadas de deconvolução.

BARBER (1988) apresentou um exemplo comparativo entre os perfis obtidos pelas ferramentas de indução *Phasor* (IMPH e IDPH) e as tradicionais (ILM e ILD) para reservatórios de hidrocarbonetos intercalados com finas camadas de folhelho. Os perfis obtidos pela *Phasor*

neste tipo de formação (Figura 2.6) nos fornecem uma razoável estimativa das resistividades das camadas, apresentando um erro inferior a 0.5 mS/m.

Já para os perfis de indução tradicionais (Figura 2.7), podemos observar que as leituras nas zonas resistivas são bem inferiores às reais (R_t) devido ao *shoulder effect.* Os fortes picos presentes nas curvas são devidos aos folhelhos condutivos, sendo necessária uma melhor correção para o *skin effect.*

No caso de reservatórios interlaminados por folhelhos (*thin beds reservoir*), não há a menor dúvida que entre as ferramentas de indução atualmente disponíveis no mercado, a *Phasor* é a de melhor resolução vertical e que apresenta uma leitura mais confiável das resistividades das camadas. No entanto, gostaríamos de estudar as ferramentas de indução tradicionais por acreditarmos que ainda existe uma lacuna no que se refere à melhoria da resolução vertical, através de arranjos de bobinas diferentes do convencionalmente utilizado (coaxial).

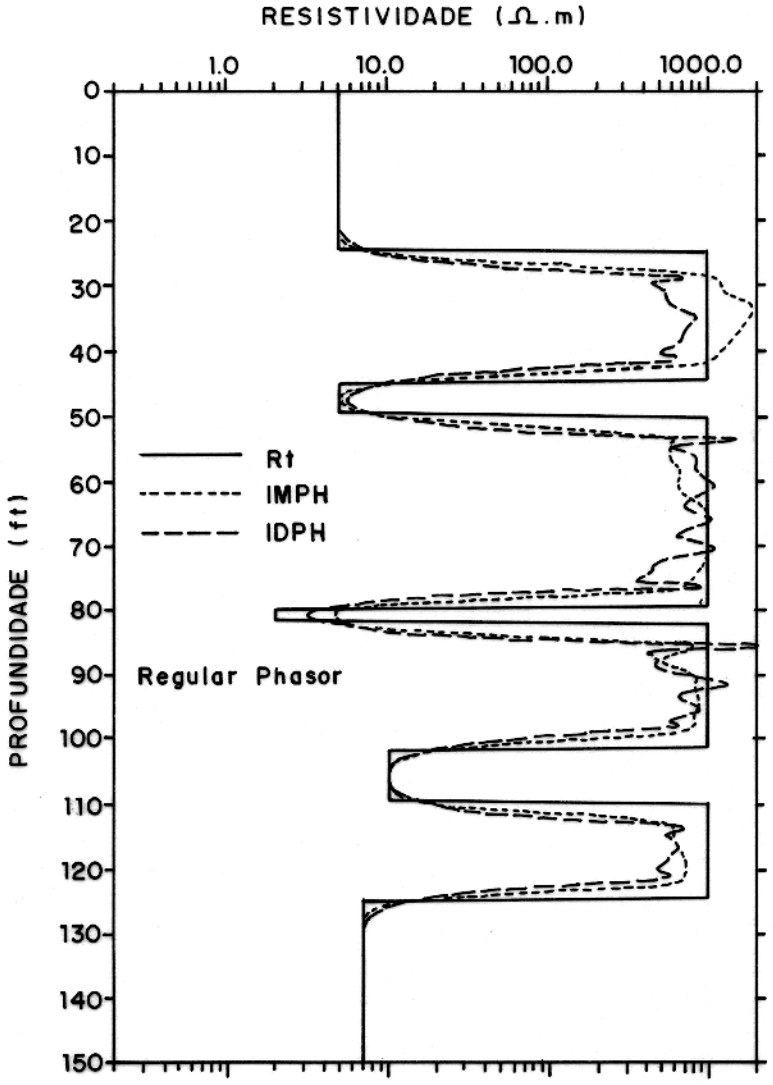


Figura 2.6 - Perfis da ferramenta de indução *Phasor* (IMPH e IDPH) para um reservatório de hidrocarboneto intercalado por camadas finas de folhelho (Adaptado de BARBER, 1988).

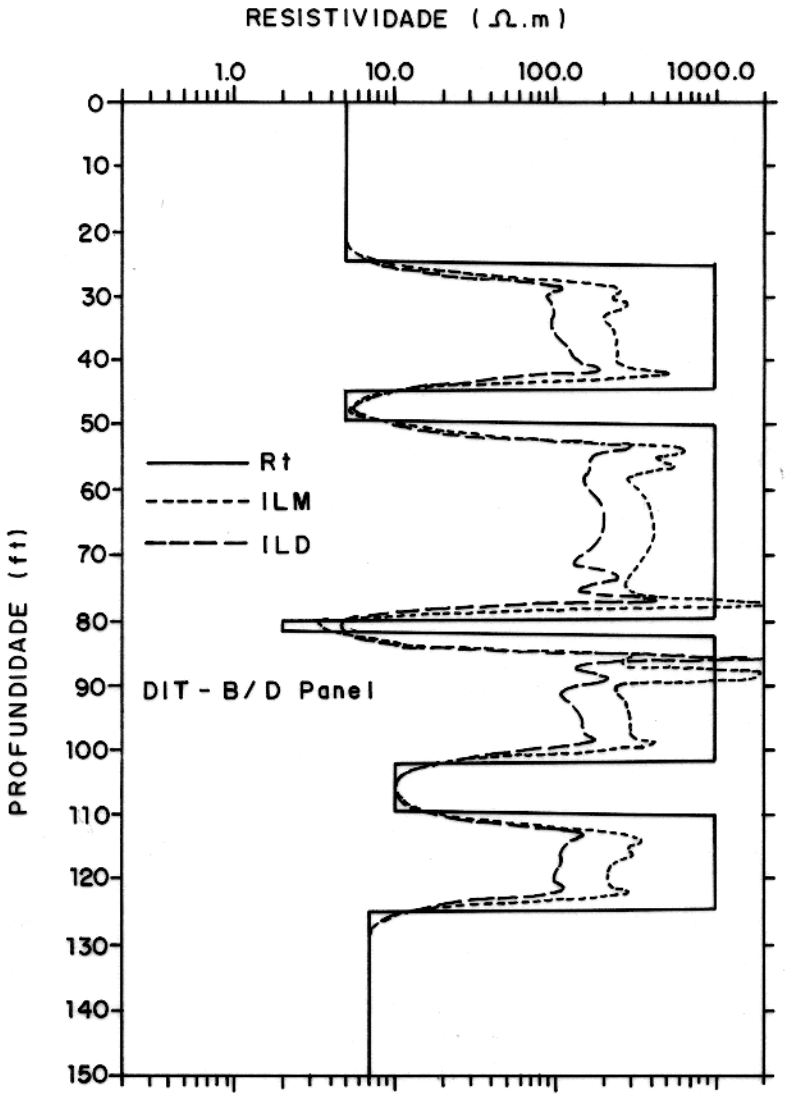


Figura 2.7 - Perfis das ferramentas de indução tradicionais (ILM e ILD) para um reservatório de hidrocarboneto intercalado por camadas finas de folhelho (Adaptado de BARBER, 1988).

3 - CAMADAS FINAS

As respostas das ferramentas de perfilagem frente a camadas com espessuras próximas ou inferiores à sua resolução vertical são bastante afetadas pelas camadas adjacentes (*shoulder effect*), dependendo também do contraste existente entre as propriedades que estão sendo medidas. Quanto menor o contraste e menor as espessuras das camadas, maior será este efeito nos perfis de indução, mesmo com as correções para o *skin effect* e deconvolução a três pontos (DOLL, 1965) utilizados para melhorar a resolução vertical.

Segundo BEER (1991), observações de campo mostraram que intervalos portadores de hidrocarbonetos, comprovados por testes de formação, podem apresentar baixas resistividades devido à presença de pequenas laminações de folhelho menos resistivo. A quantificação da espessura *net pay* e da reserva podem ser afetadas significativamente devido a determinação errônea da saturação de água por estes perfis. Podemos também observar o efeito inverso no caso de zonas de água, onde a resistividade do reservatório é aparentemente maior devido ao efeito do folhelho, agora mais resistivo que o intervalo de água.

3.1 CAMADAS FINAS

Para a geologia, camadas finas são aqueles estratos cujas espessuras se encontram no intervalo de 5 - 60 cm, enquanto que as estratificações inferiores a 1 cm são denominadas laminações (Figura 3.1).

Para a geofísica de poço, camadas finas (*thin beds*) são aquelas cujas espessuras estão abaixo da resolução vertical das ferramentas de perfilagem convencionais, sendo geralmente aquelas camadas de espessuras inferiores a 30 cm. A Figura 3.1 apresenta de forma esquemática um pacote estratigráfico com a resolução vertical de algumas ferramentas de perfilagem mais comuns.

Segundo MEDAGLIA & SUGIO (1991), a resolução vertical de uma ferramenta pode ser definida como a menor camada em que se pode obter uma leitura verdadeira; resolução vertical intrínseca é parcialmente determinada pela geometria da sonda, sendo na maioria das ferramentas de perfilagem a distância entre a fonte e o detector. Na verdade, não existe um conceito preciso e universalmente aceito para resolução vertical. ROMEU et al. (1991)

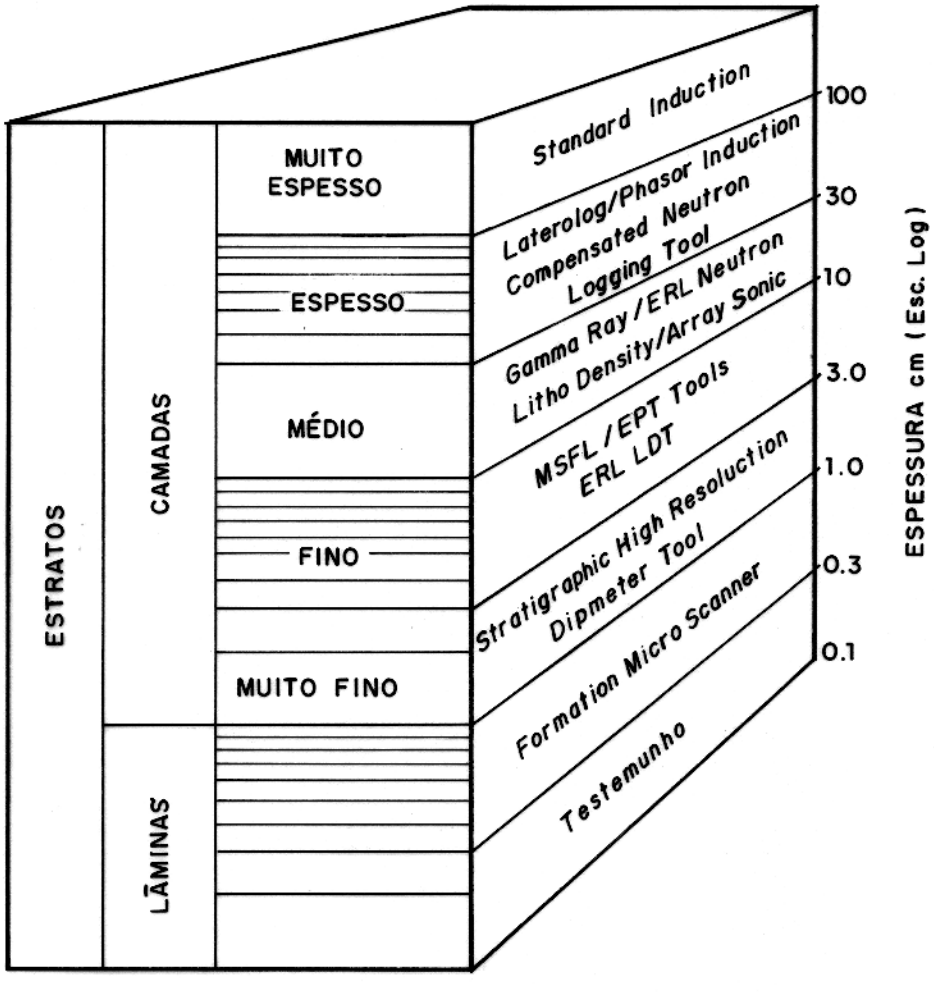


Figura 3.1 - Subdvisão estratigráfica e resolução vertical de algumas ferramentas de perfilagem (Adaptado de SERRA & ANDREANI, 1991).

afirmam que ela é uma espécie de norma, insuficiente para resumir toda a informação da função resposta da ferramenta.

3.2 IMPORTÂNCIA ECONÔMICA E AMBIENTES DE OCORRÊNCIA

Com a explotação progressiva dos principais reservatórios de hidrocarbonetos das bacias, torna-se uma necessidade voltar a atenção para os reservatórios menores e mais complexos, que são normalmente constituídos de camadas finas e que podem apresentar boas características permo-porosas. Tais depósitos apresentam às vezes um bom potencial econômico por terem simultaneamente rochas geradoras e reservatórios, além de apresentarem uma extensão lateral suficiente para acumular um considerável volume de hidrocarbonetos.

A maior parte das bacias sedimentares marginais brasileiras nas suas porções emersas apresentam reservatórios formados por *thin beds*, principalmente nas seqüências marinhas de ambientes deposionais de sopé de talude (Figura 3.2). Com o esgotamento dos principais depósitos, estão cada vez mais freqüentes trabalhos referentes aos reservatórios de camadas finas: ANDERSON et al (1988) na bacia Potiguar; BEER (1991) na bacia de Campos; MARANHÃO (1988) na bacia de Sergipe-Alagoas; MEDAGLIA & SUGIO (1991) e SARZENSKI & TOLEDO (1988) na bacia do Espírito Santo; entre outros.

Thin Beds Formations são bastante comuns em ambientes deposicionais do tipo:

- turbidíticos marinhos e lacustrinos (lobos mais distais);
- depósitos deltaicos (barras distais);
- varvitos do tipo glaciolacustrino;
- depósitos fluviais.

Os modelos geológicos mais freqüentes de reservatórios de hidrocarbonetos em *thin beds* são os de folhelhos alternados com arenitos (*thinly laminated shale-sandstone reservoir*), embora possamos encontrar na literatura (SERRA & ANDREANI, 1991) depósitos de camadas finas formado por intercalações de zonas porosas com não porosas (cimentadas), como é o caso de algumas formações carbonáticas e arenitos eólicos.

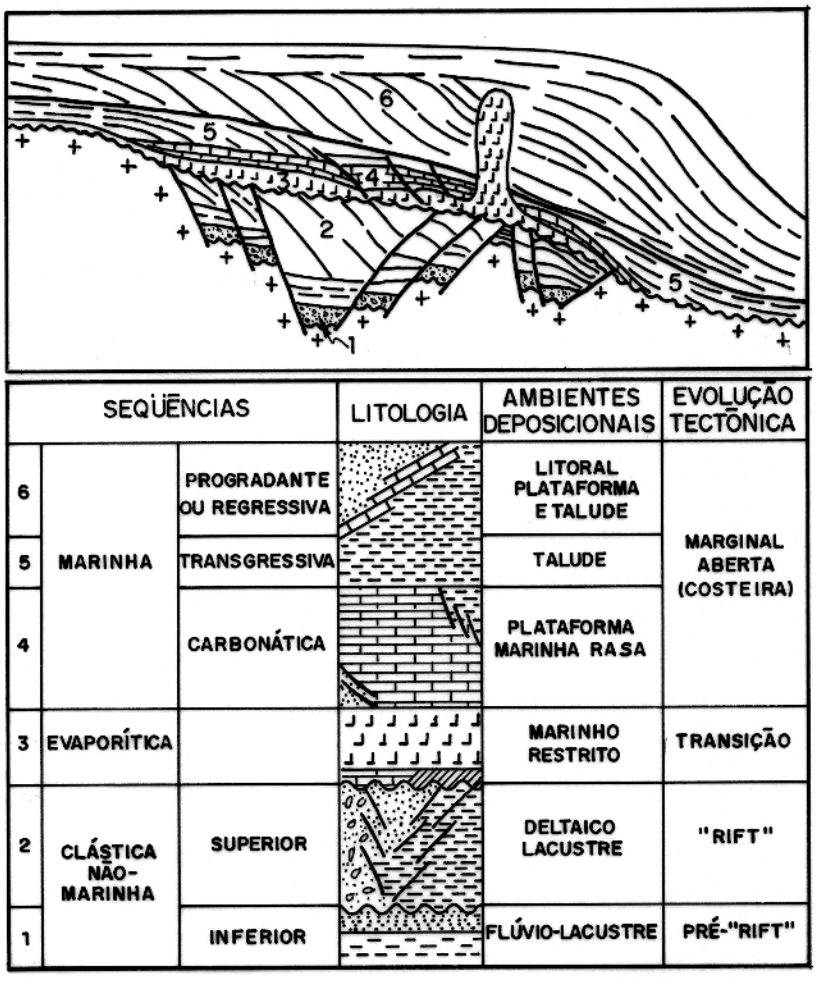


Figura 3.2 - Seqüências sedimentares das bacias marginais brasileiras (Adaptado de FIGUEIREDO, 1985).

3.3 TÉCNICAS APLICÁVEIS

Devido à necessidade cada vez maior de recursos energéticos, novas tecnologias vêm se desenvolvendo nas áreas de avaliação de formação, perfuração e complementação de poços. No caso da perfilagem de poço, tem havido uma ênfase cada vez maior à pesquisa de perfis com alta resolução vertical, objetivando detectar as camadas finas das formações de difícil identificação e avaliação por meio de perfis convencionais.

As ferramentas de alta resolução são geralmente utilizadas em estudos geológicos na definição de camadas e estruturas de pequeno porte. Já as ferramentas convencionais são utilizadas na obtenção de parâmetros petrofísicos (resistividade, porosidade, argilosidade, etc) para avaliação de formação.

As ferramentas de perfilagem de alta resolução (01 a 05) e convencionais (06 a 13) de uso mais freqüente na atualidade são:

(01) FMS - *Formation Microscanner Service*
(02) SHDT - *Stratigraphic High Resolution Dipmeter Tool*
(03) HDT - *High Resolution Dipmeter Tool*
(04) EPT - *Eletromagnetic Propagation Tool*
(05) MSFL - *Micro Spherical Focused Log*
(06) PHASOR - *Induction Tool*
(07) SFL - *Spherically Focused Log*
(08) LLD - *Laterolog Deep*
(09) SP - *Spontaneous Potencial*
(10) LDT - *Litho-Density Tool*
(11) CNL - *Compensated Neutron Log*
(12) GR - *Gamma Ray*
(13) BHC - *Borehole-compensated Tool*

A resolução vertical e a profundidade de investigação estão inversamente relacionadas: quanto menor o espaçamento entre as bobinas (ou fonte e detector) melhor resolução vertical e menor a profundidade de investigação e vice-versa. Para melhorar a resolução vertical das ferramentas tem-se aumentado a taxa de amostragem e reduzido a velocidade de perfilagem, conseguindo desta forma uma medida profunda e efetiva (MEDAGLIA & SUGIO, 1991).

Tabela 3.1 - **Resolução Vertical de Algumas Ferramentas de Perfilagem.**

	Ferramenta	Resolução Vertical Intrínseca (*cm*)	Intervalo de Amostragem (*cm*)	Resolução Vertical do Perfil (*cm*)
(01)	FMS	0.5	0.3	0.5
(02)	SHDT	1.0	0.3	1.0
(03)	HDT	1.3	0.5	1.3
(04)	EPT	5.0	5.0	5.0
(05)	MSFL	5.0	15.0	10.0
(06)	PHASOR	150.0	15.0	150.0
(07)	SFL	76.0	15.0	76.0
(08)	LLD	61.0	15.0	61.0
(09)	SP	240.0	15.0	150.0
(10)	LDT	38.0	15.0	46.0
(11)	CNL	38.0	15.0	46.0
(12)	GR	31.0	15.0	46.0
(13)	BHC	61.0	15.0	61.0

Modificado de ALLEN et al. (1988).

A melhoria da resolução pode ser obtida também através de processamento matemático dos sinais medidos (deconvolução de perfis). Embora não seja este o caminho adotado neste trabalho, temos à disposição uma literatura técnica bastante variada, apesar de ser um assunto relativamente recente. Os métodos de deconvolução podem ser agrupados em cinco classes:

- métodos no domínio da profundidade;
- métodos no domínio da freqüência;
- métodos que combinam respostas de dois ou mais sensores;
- métodos de inversão;
- métodos de inteligência artificial (redes neurais).

Nenhum método de deconvolução isoladamente é satisfatório, sendo necessária a combinação de dois ou mais métodos de forma a somar as diferentes faixas de aplicação de cada um deles.

3.3.1 Perfilagem de indução

Apesar da grande utilização das ferramentas de indução na prospecção geofísica de poço, as sondas mais utilizadas (6FF40) não estão entre as melhores no que se refere a camadas finas (Tabela 3.1) devido à sua baixa resolução vertical, falseando os valores de condutividade.

Para melhorar a resolução vertical foram feitas variações nas distâncias entre os sensores, embora tenha ocorrido perda na profundidade de investigação. Com isto a leitura da resistividade fica cada vez mais distante do valor real da zona virgem (R_t) levando a uma estimativa errônea da saturação água/óleo do reservatório.

No Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará (UFPA), estão sendo testadas novas ferramentas de indução que detectam os sinais em fase e em quadratura. O processamento destas duas informações permite eliminar os efeitos da zona cega, definida como sendo a interface das camadas que têm espessura próxima ao limite de resolução da ferramenta, na qual não há geração de sinal devido a variações nas propriedades da formação (ROMEU et al., 1991).

MONTENEGRO (1991) verificou a importância de se registrar separadamente as componentes em fase e quadratura do sinal. Em camadas finas de alta resistividade (rocha reservatório) somente a componente em fase apresenta um registro visível, ao passo que para camadas finas de baixa resistividade (níveis sulfetados) as duas componentes do sinal são afetadas, sendo a componente em quadratura a mais sensível neste caso.

Além das modificações ferramentais, podemos encontrar diversos métodos empíricos para tentar eliminar a influência das camadas de folhelho, a partir da distinção entre os diferentes modos de ocorrência das argilas na rocha. Para reservatórios de hidrocarbonetos, geralmente resistivos, estas intercalações de folhelho influenciam no sentido de baixar a resistividade da rocha, chegando até mascarar o fluido nela contido.

4 - CONJUNTO EXPERIMENTAL

Com o objetivo de verificar o poder de resolução vertical dos diferentes arranjos de bobinas nas ferramentas de indução eletromagnéticas, construímos um modelo geoelétrico e sondas com duas bobinas utilizando um fator de redução de escala de valor p = 20. O sistema elétrico para execução das medidas foi a parte mais trabalhosa devido à elevada sensibilidade necessária neste estudo, pois os sinais enviados pelas sondas são da ordem de micro (10^{-6}) volts, sendo necessário amplifica-los milhares de vezes para que possam ser registrados.

4.1 MODELAMENTO ANALÓGICO

A técnica de modelamento em escala reduzida é freqüentemente utilizada nos estudos de problemas da prospecção eletromagnética devido às dificuldades em gerar modelos matemáticos adequados, elevado tempo de processamento e respostas aproximadas no caso das soluções numéricas.

O modelamento analógico é bastante conhecido e de larga aplicabilidade em estudos de problemas da prospecção de minérios e ultimamente, o Centro de Geociências da UFPA vem aplicando-o com bons resultados na geofísica de poço.

A posssibilidade de construção de um modelo em escala reduzida é devido à linearidade das equações de Maxwell que descrevem os campos eletromagnéticos. A redução nas dimensões lineares é compensada por um aumento na freqüência da fonte e/ou aumento na condutividade dos modelos geológicos empregados. Desta forma, os resultados obtidos nos modelos reduzidos podem ser diretamente aplicados aos sistemas em escala original.

No caso específico da Geofísica de Poço, os modelos em escala reduzida são uma técnica bastante eficiente para estudar a resposta das sondas de perfilagem devido à inviabilidade de simular em escala real as situações de campo.

4.2 RELAÇÕES DE SIMILITUDE

SINCLAIR (1948) desenvolveu as condições em que um modelo na escala real pode ser representado por outro em escala reduzida e posteriormente esta teoria foi amplamente estudada por FRISCHKNECHT (1971), GRANT & WEST (1965), HOOD & WARD (1969), WARD (1967), entre outros. Estas relações de similitude garantem a utilização dos modelos em escala reduzida, de forma que um sistema-modelo possa reproduzir com fidelidade a configuração geométrica das linhas de força do sistema real. Podemos assim variar a escala de acordo com nossa conveniência, mantendo as devidas proporções e obdecendo aos parâmetros da equação de similitude.

4.2.1 Equação de Similitude

Partindo da linearidade das equações de Maxwell no domínio da freqüência que permitem a utilização de escalas de modelamento lineares, teremos as seguintes equações do campo eletromagnético para o sistema real:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} - K^2\vec{E} = 0, \tag{4.1}$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} - K^2\vec{H} = 0, \tag{4.2}$$

em que $\vec{E}$, $\vec{H}$ e K são respectivamente o campo elétrico, o campo magnético e a constante de propagação do modelo na escala real. E para o sistema modelo:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E'} - K'^2\vec{E'} = 0, \tag{4.3}$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H'} - K'^2\vec{H'} = 0, \tag{4.4}$$

em que $\vec{E'}$, $\vec{H'}$ e K' são respectivamente o campo elétrico, o campo magnético e a constante de propagação do modelo na escala reduzida.

Sejam os pontos P(x,y,z) do sistema real e P'(x',y',z') do sistema-modelo, cujas coordenadas podem ser relacionadas como:

$$\begin{aligned} x &= px', \\ y &= py', \\ z &= pz', \end{aligned} \tag{4.5}$$

sendo p um fator linear de escala.

Além das dimensões lineares, é preciso relacionar $\vec{E}$, $\vec{H}$ e t de ambos os sistemas:

$$\vec{E}(x,y,z) \;=\; a\vec{E'}(x',y',z'), \tag{4.6}$$

$$\vec{H}(x,y,z) = b\vec{H}'(x',y',z'), \tag{4.7}$$
$$t = gt', \tag{4.8}$$
$$\omega' = g\omega, \tag{4.9}$$

sendo a,b e g os fatores de escala para a intensidade do campo elétrico, magnético e o tempo respectivamente.

Manipulando com as equações do campo elétrico dos dois sistemas (Equações 4.1 e 4.3) obteremos a relação abaixo:

$$\frac{\nabla \times \nabla \times \vec{E}'}{\nabla \times \nabla \times \vec{E}} = \frac{K'^2\vec{E}'}{K^2\vec{E}}. \tag{4.10}$$

Substituindo a equação 4.6 em 4.10 obteremos:

$$K^2 = \frac{K'^2}{p^2}, \tag{4.11}$$

e sabendo de antemão que as constantes de propagação para cada modelo valem respectivamente:

$$\begin{aligned} K^2 &= i\omega\mu\sigma, \\ K'^2 &= i\omega'\mu'\sigma'. \end{aligned} \tag{4.12}$$

Substituindo as equações 4.12 em 4.11 obteremos a relação de similitude dos dois sistemas:

$$\omega'\mu'\sigma' = p^2\omega\mu\sigma. \tag{4.13}$$

Como vimos nas equações 4.5, o fator linear de escala $p = \frac{l}{l'}$ em que:
l = dimensão linear do sistema real;
l' = dimensão linear do sistema-modelo.

Assim, a equação de similitude 4.13 pode ser escrita como:

$$\omega\mu\sigma l^2 = \omega'\mu'\sigma' l'^2. \tag{4.14}$$

O primeiro e o segundo membro da equação 4.14 são conhecidos respectivamente como número de indução (ou parâmetro resposta) do sistema real (α) e do sistema modelo (α'). Desde que mantenha a igualdade dos números de indução (α e α'), qualquer sistema real pode ser simulado em laboratório devido à relativa facilidade de variarmos a freqüência, a condutividade e as dimensões lineares do modelo.

Como no modelamento analógico excluímos os meios não lineares, como os ferromagnéticos, a permeabilidade magnética dos materiais escolhidos será aproximadamente igual a do vácuo ($\mu = \mu' = \mu_o$), ficando a equação 4.14 reduzida em:

$$\omega\sigma l^2 = \omega'\sigma' l'^2. \tag{4.15}$$

4.3 APROXIMAÇÕES FÍSICAS

Trabalharemos com um modelo geoelétrico que simulará camadas horizontais plano-paralelas de dimensão lateral infinita, homogêneas e isotrópicas. O empilhamento estratigráfico simulado será formado por camadas finas (*thin beds reservoir*) de diferentes espessuras (2L, 1.5L, L e 0.5L), espaçadas uma da outra de 4L, onde L é a distância entre as bobinas na sonda. De acordo com a Figura 2.5, o fator geométrico vertical G(z) deverá ser tão pequeno para z = 4L que o efeito de camadas adjacentes não afetará significativamente os resultados.

As diferentes zonas criadas pela invasão do fluido de perfuração na formação (zona lavada, zona invadida e zona virgem) serão consideradas com uma zona de geometria cilíndrica coaxial ao eixo do poço (Figura 4.1).

Devido à necessidade de que as bobinas se comportem como pequenos dipolos magnéticos e a distância que as separa ser relativamente pequena (L = 5 cm), SALVADORETTI (1990) executou alguns testes para comprovar o esperado decaimento da amplitude do campo primário com o inverso do espaçamento entre as bobinas. Os resultados foram satisfatórios, chegando em média a erros de 2%.

4.4 MODELO GEOELÉTRICO

O modelo geoelétrico construído em laboratório em escala reduzida (p = 20) para simular as condições de poço e as formações geológicas, foi feito em um tanque de fibra de vidro de dimensões internas iguais a 2.6 m de comprimento, 1.0 m de largura e 0.6 m de altura. Seu interior foi dividido em quatro compartimentos no sentido perpendicular ao comprimento, representados por algarismos romanos (Figura 4.2). O compartimento I tem dimensão de 0.30 m, o compartimento II tem 1.30 m, o III tem 0.65 m e o IV tem dimensão igual a 0.35 m. Os compartimentos I e IV ficarão vazios para alojar as roldanas que direcionarão a sonda durante a coleta dos dados.

O compartimento II foi subdividido por placas de fibra de vidro de forma a simular uma seqüência de camadas finas de diferentes espessuras (10 cm = 2L; 7.5 cm = 1.5L; 5 cm =

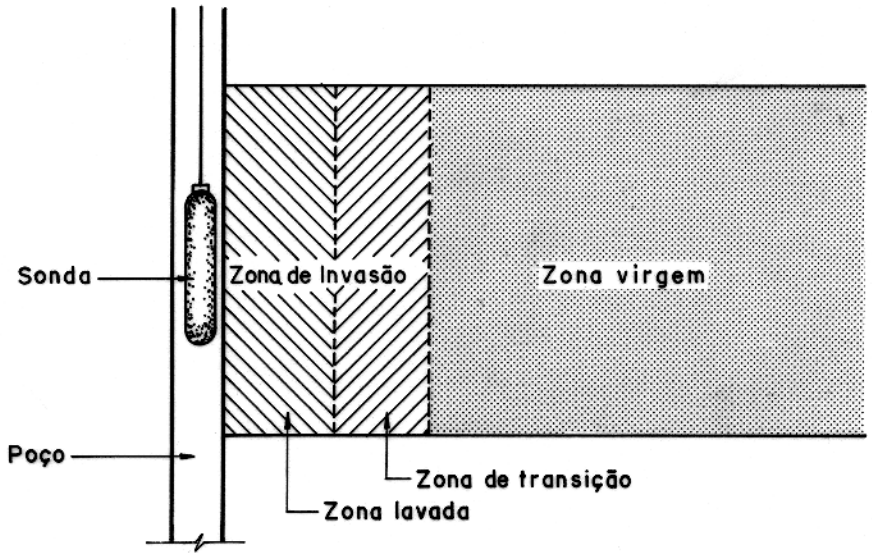


Figura 4.1 - Diferentes zonas criadas pela invasão dos fluidos de perfuração de poço na formação

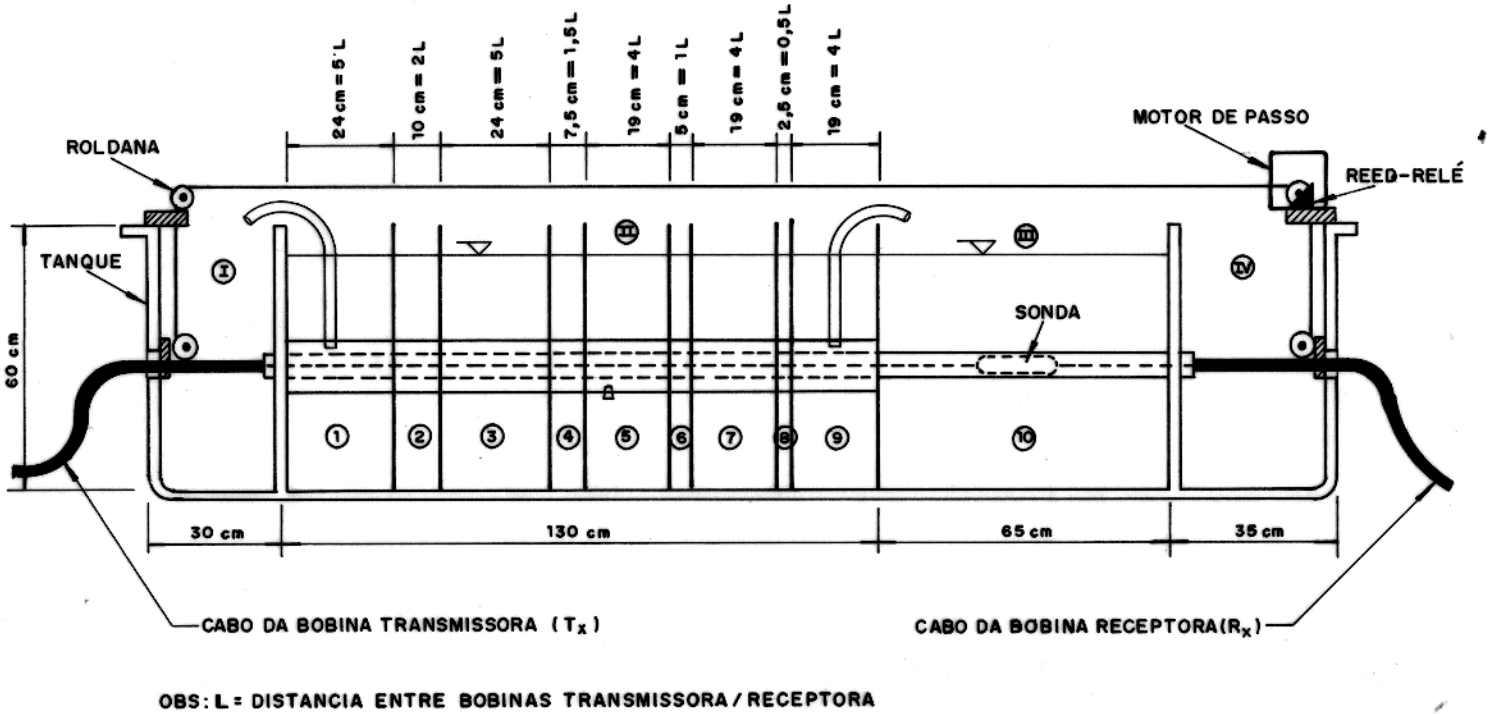


Figura 4.2 - Tanque compartimentado para montagem de modelos experimentais em escala reduzida de modelos geológicos com camadas finas.

L e 2.5 cm = 0.5L), espaçadas uma da outra de 21 cm ≈ 4L. Este compartimento II possui duas tubulações de PVC coaxiais, perpendiculares às placas de fibra de vidro. A primeira tubulação, mais interna, simula o poço, onde a sonda se move efetuando as medidas. Seu diâmetro é de 1.4 cm = 0.28L. A região entre a primeira e a segunda tubulação é preenchida com água da torneira do laboratório ($\sigma = 0.03S/m$),através de finas mangueiras (Figura 4.3 e Figura 4.4), de forma a simular a zona de invasão (zonas lavada e de transição) de diâmetro igual a $10cm = 2L$.

Devido a grande dificuldade encontrada em simular através de modelamento analógico em escala reduzida a invasão de fluidos de perfuração na formação composta por *thin beds*, adotamos um modelo não-ideal onde acreditamos que seja bastante satisfatório para os estudos em questão. O modelo geológico simulado de *thin beds reservoir* em escala reduzida construído no compartimento II do tanque, considera o mesmo diâmetro de invasão de *mud filtrate* para litologias de permeabilidade bastante distintas (folhelhos e arenitos). Felizmente, neste nosso estudo de reservatórios em *thin beds*, as zonas de folhelho não são o principal alvo de investigação, não sendo de grande importância o erro de leitura ocorrido nestas litologias. É oportuno também lembrarmos que apesar de praticamente não ocorrer invasão de *mud filtrate* nos folhelhos, é freqüente a presença de cavidades preenchidas pela lama de perfuração devido a ação do fluxo de lama (*wash out*) nestas zonas de maior fissilidade.

O compartimento III será utilizado para simular uma camada espessa de folhelho onde não há a inconveniente invasão de *mud filtrate* que ocorre no compartimento II. Assim, compararemos as curvas obtidas e poderemos ter uma idéia do erro cometido no modelo do compartimento II, verificando o efeito no perfil de indução ao considerarmos a invasão de fluidos na formação.

As condutividades elétricas das soluções eletrolíticas que irão simular os diferentes meios condutivos no modelamento em escala reduzida, serão obtidas através das relações de similitude (equação 4.15) da seguinte forma:

$$\alpha_m = \alpha_r, \tag{4.16}$$

onde α_m e α_r são os números de indução (parâmetros resposta) do modelo e da situação real respectivamente.

$$(f\sigma l^2)_m = (f\sigma l^2)_r. \tag{4.17}$$

Mudando somente as posições dos parâmetros obteremos

$$\frac{f_m}{f_r}\left(\frac{l_m}{l_r}\right)^2 = \frac{\sigma_r}{\sigma_m}, \tag{4.18}$$

onde consideraremos:

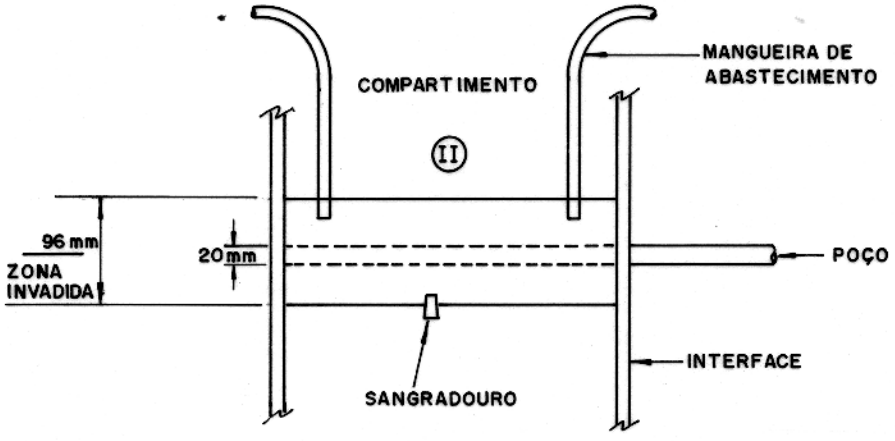


Figura 4.3 - Seção longitudinal do poço apresentando o sistema de abastecimento das zonas lavada e de transição.

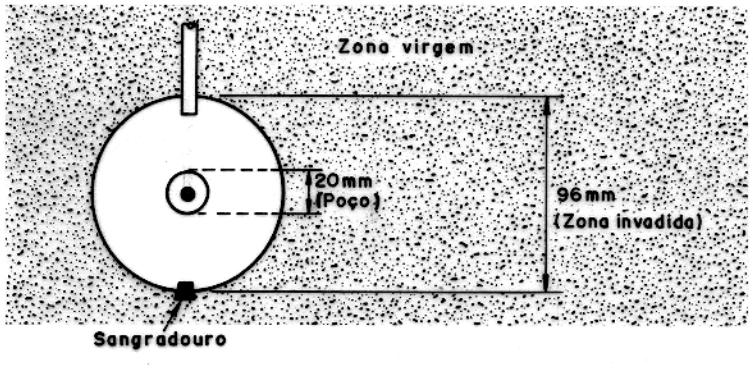


Figura 4.4 - Seção transversal do modelo em escala reduzida do poço com suas diferentes zonas de invasão.

- Uma escala de redução $p = 20$, de modo que $l_m/l_r = 1/20$.
- A freqüência de uso mais rotineiro na indústria do petróleo para as ferramentas de indução, $f_r = 20$ kHz.
- A freqüência de laboratório $f_m = 100$ kHz.

Substituindo os respectivos valores destes parâmetros na equação 4.18 obteremos a relação:

$$\sigma_m = 80\sigma_r. \tag{4.19}$$

Adaptamos uma Tabela (ELLIS, 1987) com os intervalos de condutividade elétrica de alguns materiais mais comuns em reservatórios de hidrocarbonetos (Tabela 4.1). Tomando valores intermediários a estes intervalos e usando a relação 4.19, obteremos as condutividades das soluções eletrolíticas que simulam em laboratório os folhelhos ($\sigma = 24S/m$) e os arenitos com hidrocarbonetos ($\sigma = 0.03S/m$).

Tabela 4.1 - **Condutividades elétricas de alguns materiais mais comuns em reservatórios de hidrocarbonetos**

MATERIAL	*CONDUTIVIDADE (S/m)*
Água destilada	0.2×10^{-3}
Petróleo	5×10^{-15}
Quartzo	$3 \times 10^{-15} \rightarrow 10^{-12}$
Arenito com água	$0.1 \rightarrow 2$
Arenito com óleo	$10^{-3} \rightarrow 0.2$
Argila/Folhelho	$0.1 \rightarrow 0.5$
Calcáreo compacto	10^{-3}
Mármore	$10^{-9} \rightarrow 2 \times 10^{-8}$

Modificado de ELLIS (1987).

Estas soluções eletrolíticas serão preparadas com o sal cloreto de amônio (NH_4Cl) dissolvido em água, mais 2% em peso de ácido clorídrico (HCl). A escolha destes dois solutos foram devido as suas excelentes solubilidades, capacidades de dissociação, elevados pontos de saturação (Figura 4.5) e desprendimento de vapores tóxicos em níveis aceitáveis com o ambiente de trabalho.

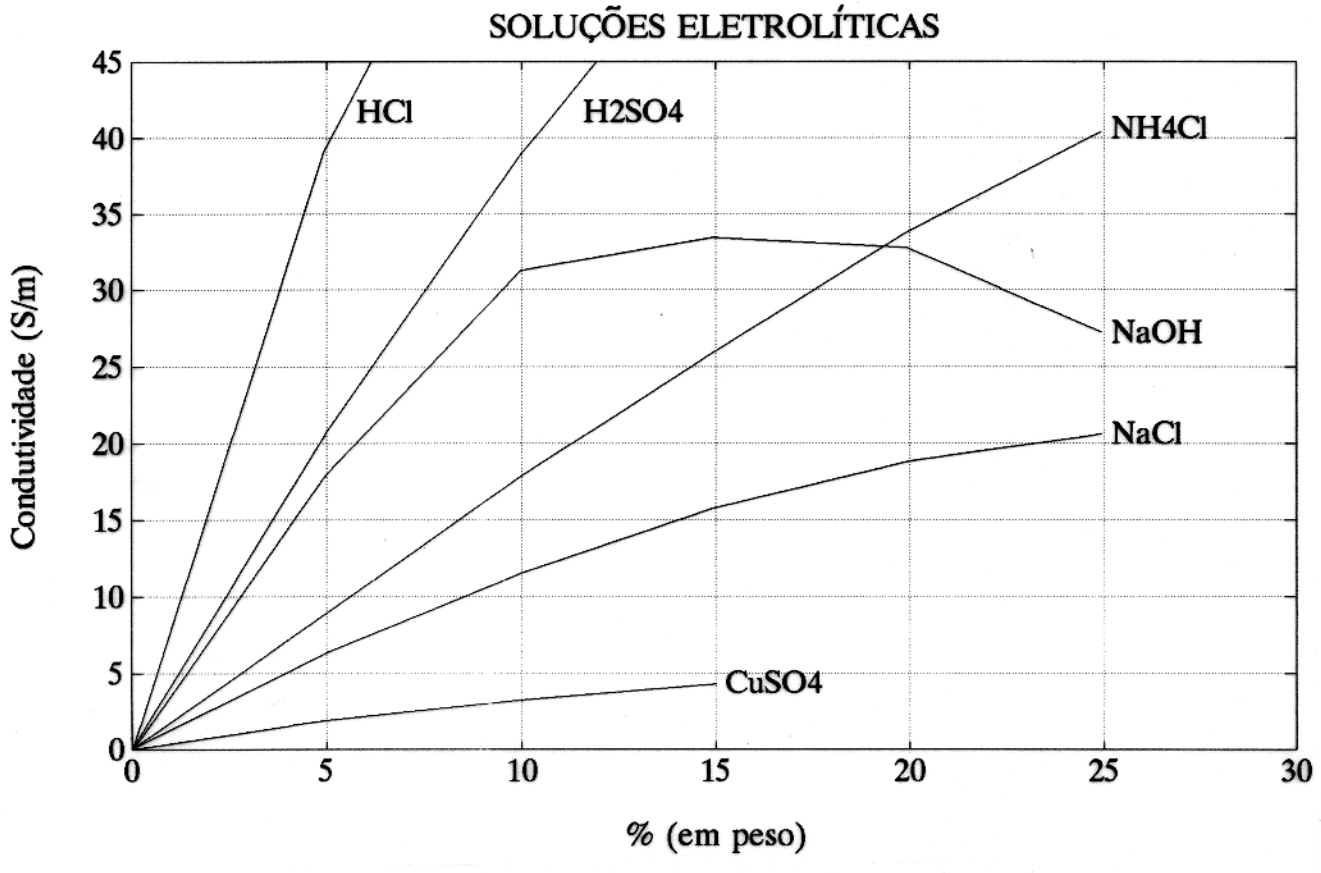


Figura 4.5 - Curvas de condutividades elétricas de algumas soluções eletrolíticas

4.5 INSTRUMENTAÇÃO

O sistema elétrico pode ser dividido basicamente em três partes: sistema de transmissão, a sonda e o sistema de recepção (Figura 4.6). Todos os equipamentos, exceto as sondas, foram colocados em um ambiente isolado e climatizado (sala de instrumentação), evitando que a umidade do ar e os vapores corrosivos desprendidos do tanque danificassem os componentes eletrônicos.

4.5.1 Sistema de Transmissão

O sistema de transmissão é formado por um oscilador e a bobina transmissora. O oscilador envia uma corrente alternada para a bobina transmissora ao mesmo tempo que envia dois sinais (componentes em fase e quadratura) para o detector de fase. Isto é feito com a finalidade de criar um sistema de referência para que o sinal captado pela bobina receptora, S, possa ser normalizado e a resposta seja expressa em termos de percentagem do campo primário, P (razão S/P). O oscilador também alimenta um sistema de cancelamento do acoplamento direto devido ao campo primário. Esse cancelamento é obtido gerando um sinal de mesma magnitude e defasado de 180° daquele induzido pelo acoplamento direto, de forma que ao serem correlacionados no amplificador diferencial, eles se cancelarão (Figura 4.6).

O sinal que chega à bobina transmissora gera um campo eletromagnético alternado que induzirá uma f.e.m. nos meios condutores.

O oscilador utilizado é de fabricação da General Radio (USA), modelo GR-1316, e trabalha numa faixa de freqüência de 10 Hz a 110 kHz. A potência máxima de saída do equipamento é igual a 1.6 watts. A faixa de voltagem de saída varia na ordem de 0 a 150 volts.

4.5.2 Sondas

4.5.2.1 Arranjos de Bobinas

Na perfilagem de indução as bobinas transmissora e receptora devem manter uma orientação e espaçamento fixos, uma em relação a outra, durante o levantamento. Escolhemos para o nosso estudo três tipos de arrranjo de bobinas (Figura 4.7):

- O arranjo de bobinas coaxial (Figura 4.7a) é aquele em que os eixos das bobinas transmissora e receptora coincidem com o eixo do poço. A vantagem deste arranjo está na

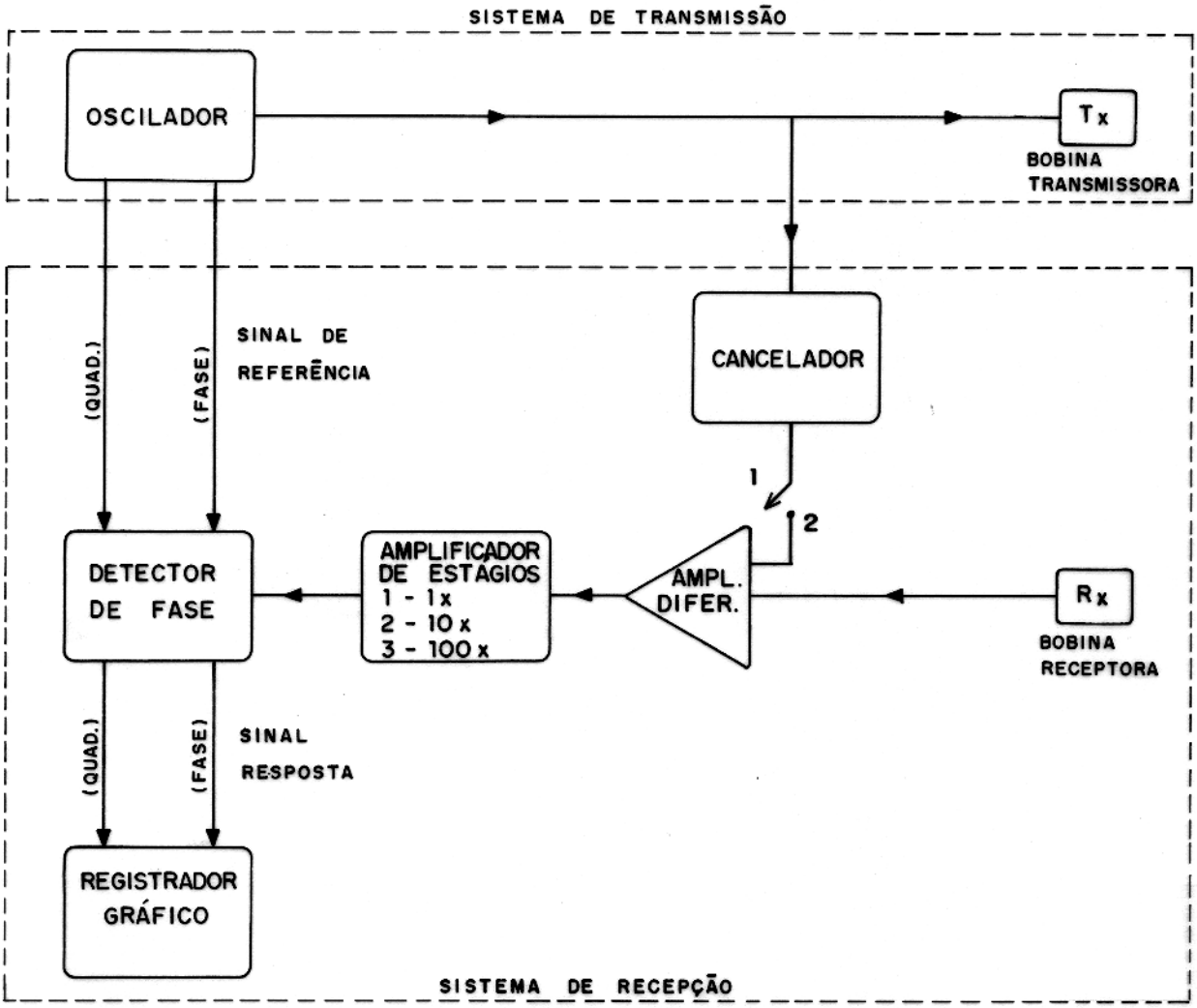


Figura 4.6 - Diagrama de blocos do sistema elétrico

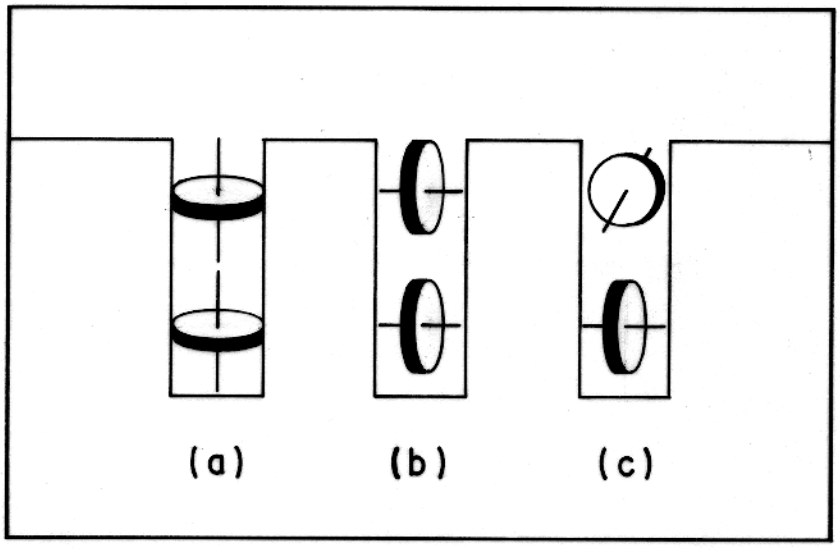


Figura 4.7 - Arranjos de bobinas testados:
a) Coaxial;
b) Coplanar;
c) Acoplamento mínimo.

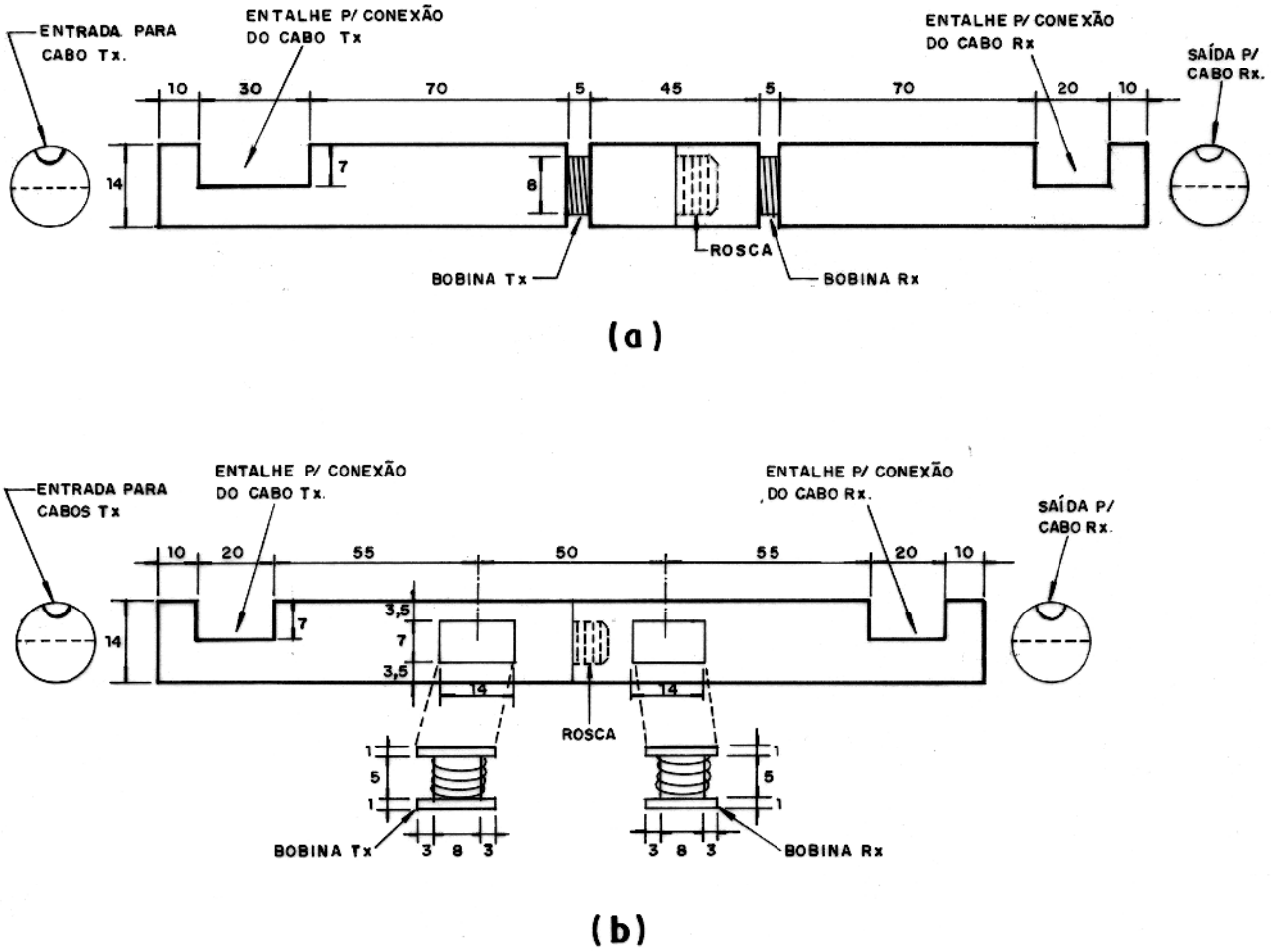
simplicidade da orientação e independência da resposta das duas bobinas para qualquer posição angular ou rotação dentro do poço devido à simetria do campo eletromagnético. Por estes motivos, o arranjo de bobinas coaxial é o utilizado nas atuais ferramentas de indução eletromagnética de perfilagem de poço.

- O arranjo coplanar (Figura 4.7b) é aquele em que as bobinas estão dispostas em um mesmo plano e com seus eixos perpendiculares ao eixo do poço. Contudo, quando a anomalia está localizada em um lado das bobinas, como fraturas por exemplo, muito pouco campo secundário é detectado, sendo necessário uma monitorização da orientação das bobinas dentro do poço. Leituras devem ser feitas em diversas posições angulares de modo a garantir um rastreamento sobre os 360°. No nosso caso em particular, não teremos este tipo de problema pois iremos rastrear camadas plano-paralelas normais ao eixo do poço, de forma que a posição angular da ferramenta não afetará a resposta do arranjo.

- O arranjo de bobinas de acoplamento mínimo (Figura 4.7c) é aquele onde os eixos das bobinas estão dispostos perpendicularmente. Este arranjo tem a vantagem de reduzir consideravelmente o acoplamento direto devido o fluxo do campo primário se propagar paralelo ao plano da bobina receptora. O campo secundário, devido às 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. A princípio, o arranjo de acoplamento nulo aparenta ser a melhor opção de orientação das bobinas, mas na verdade ele tem alguns problemas. A principal dificuldade é manter os eixos das bobinas perfeitamente perpendiculares. Pequenos erros de 10° na orientação permite que 17% do fluxo de campo primário atravesse a bobina receptora, provocando um erro considerável no campo secundário anômalo (HARBEN et al., 1987). Poderá também ocorrer acoplamento do campo primário através do cabo da bobina receptora, levando novamente a erros na presença do campo secundário.

4.5.2.2 Confecção das Sondas

As sondas foram feitas de acrílico com 1.4 cm de diâmetro e comprimento de 27 cm. Há uma rosca central (Figura 4.8) que permite separá-las em duas partes independentes, facilitando assim a colocação da ferramenta no tanque e possibilitando o afastamento entre bobinas (mudanças no valor de L). Esta rotação de uma parte da ferramenta com relação a outra nos permite obter o arranjo de acoplamento mínimo, bastando rotacionar o eixo de uma bobina com relação a outra de 90°. Podemos ainda obter com esta rotação, qualquer



OBS: DIMENSÕES EM MILÍMETROS.

Figura 4.8 - a) Ferramenta com arranjo coaxial.
b) Ferramenta com arranjo coplanar.

posição intermediária entre os arranjos de acoplamento máximo (0°) e mínimo (90°) (Figura 4.9).

As bobinas no arranjo coaxial são enroladas no próprio mandril (Figura 4.8a), enquanto que as bobinas do arranjo coplanar e conseqüentemente as do acoplamento mínimo, são enroladas em peças separadas, também de acrílico, e depois colocadas no mandril como indica a Figura 4.8b. Todas as bobinas foram enroladas com 70 espiras de fio esmaltado bitola A.W.G. número 29, e elas possuem um raio médio de 0.7 cm e indutância de 34 μH.

Como o sensor é a parte mais crítica no funcionamento do sistema como um todo, cuidados foram tomados com a blindagem eletrostática das bobinas (Figura 4.10). Tentamos assim evitar o acoplamento capacitivo entre as bobinas transmissora e receptora e também entre bobinas e a solução salina, quando o mandril penetra no tanque. Para blindar as bobinas, foi colocado uma fita de papel alumínio antes da bobina ser enrolada, formando um anel. Esta fita deve ser posicionada 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 Figura 4.10b.

4.5.2.3 Sistema de movimentação das sondas

A movimentação das sondas para a perfilagem é feita através de um motor de passos (*stepper motor*) de velocidade variável, localizado numa das extremidades do tanque (Figura 4.2).

A polia do motor de passo contém um pequeno ímã que aciona um relé de leitura (*read-relay*) a cada volta da polia. Este relé está acoplado ao marcador de eventos do registrador gráfico, permitindo desta forma conhecer a posição das bobinas no modelo geoelétrico.

4.5.3 Sistema de Recepção

O sistema de recepção é constituído de: bobina receptora (R_x), amplificador diferencial, cancelador, amplificador de estágios, detector de fase e registrador gráfico. O sinal-resposta é obtido através da seguinte seqüência:

a) a bobina receptora sofre induções eletromagnéticas dos campos primário (acoplamento direto) e campo secundário (campo anômalo), prosseguindo estes sinais para o amplificador diferencial;

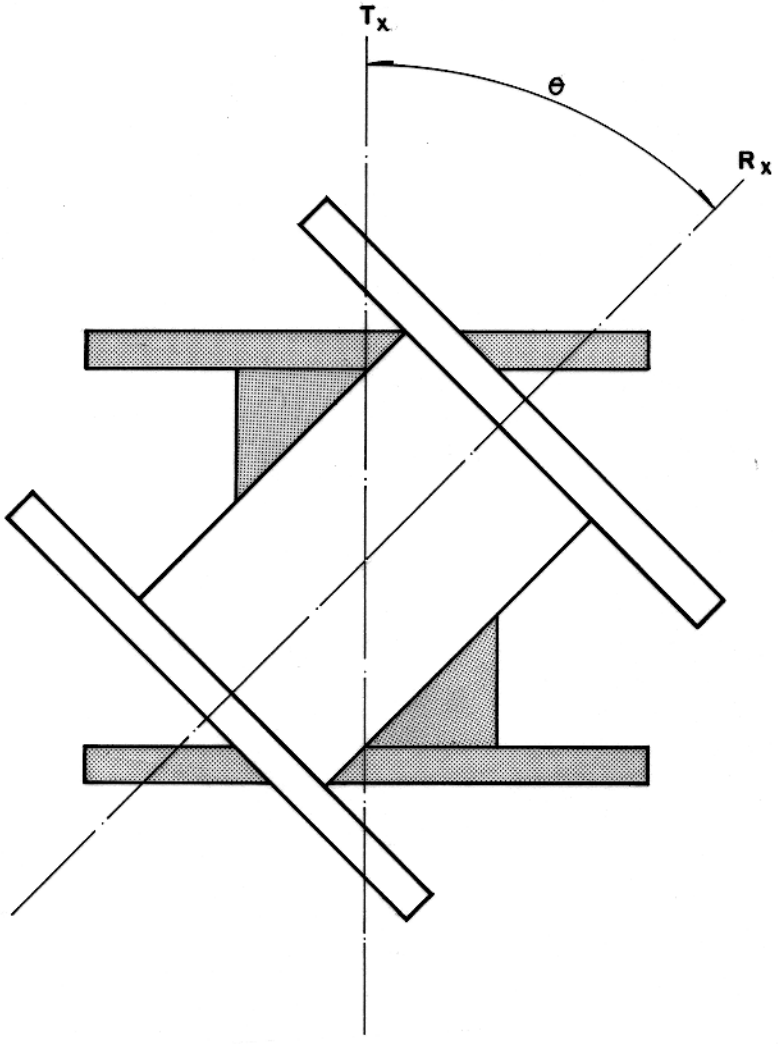
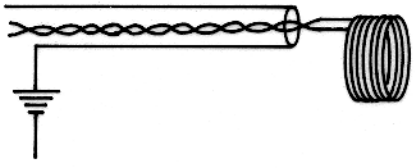
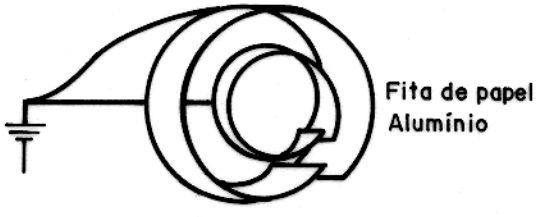


Figura 4.9 - Ângulo (θ) formado pelos eixos normais aos planos das bobinas transmissora (T_x) e receptora ($R_(x)$) com o objetivo de obter posições intermediárias entre o arranjo de acoplamento máximo ($\theta = 0°$) e mínimo ($\theta = 90°$).



(a)



(b)

Figura 4.10 - a) Blindagem eletrostática dos cabos.
b) Blindagem eletrostática das bobinas.

b) por ser o campo primário bem maior que o campo secundário (aproximadamente três ordens de grandeza), é necessário eliminar a sua interferência. Por isso, foi necessário construir um circuito compensador para cancelamento do acoplamento direto. O cancelador recebe o sinal senoidal proveniente do oscilador e ajusta as magnitudes das componentes de fase e quadratura. Então, o cancelador produz um sinal de mesma amplitude e defasado de 180° do sinal de acoplamento direto, para que a soma destes sinais resulte num cancelamento no amplificador diferencial;

c) o amplificador diferencial (ganho de 1x) tem como única função realizar o cancelamento do sinal de acoplamento direto transmissor/receptor, utilizando o sinal enviado pelo cancelador;

d) o detector de fase, modelo GR-1238, fabricado pela General Radio (USA), recebe os sinais de referência do oscilador (componentes em fase e em quadratura). Estas componentes são calibradas de modo a serem iguais à f.e.m. produzida pelo campo primário e respondem a qualquer variação devido à presença de sinais desconhecidos. As leituras são feitas numa escala que é uma medida do campo secundário anômalo com relação ao campo primário, ou seja, a razão S/P;

e) os resultados obtidos no detector de fase seguem para um registrador gráfico de dois canais, modelo RB 102, da ECB do Brasil. O registro dos resultados pode ser realizado em 24 velocidades diferentes num papel de largura igual a 25 cm. O registrador conta ainda com um marcador de eventos que permite posicionar o sistema de bobinas com relação às leituras obtidas.

5 - MEDIÇÕES E ANÁLISE DOS DADOS

5.1 PROCEDIMENTOS PARA MEDIÇÃO

5.1.1 Calibração do Detetor de Fase e Registrador Gráfico

Com a sonda afastada do modelo geoelétrico de forma que a bobina receptora receba somente o sinal de acoplamento direto devido ao campo campo primário (H_p), iremos calibrar o detetor de fase e o registrador gráfico.

Deixando a chave do diagrama de blocos (Figura 4.6) na posição 1 (aberta), de modo que o sistema de cancelamento esteja desligado, alimenta-se a bobina transmissora com um determinado valor de corrente elétrica, monitorando no dial de magnitude do detetor de fase. O sinal induzido na bobina receptora (R_x) devido ao campo primário (H_p) criado pela bobina transmissora (T_x), passará pelo amplificador diferencial (ganho de 1x) e pelo amplificador de estágios (posição 1 $\rightarrow$ $1x$), chegando ao detector de fase como sinal de referência ($R = H_p$) que será utlizado para normalizar as respostas na fase de medição. Nos visores das componentes em fase e em quadratura do sinal, iremos ajustar o fundo de escala de forma que as componentes fiquem perfeitamente ortogonais para os diferentes quadrantes.

O registrador gráfico vai ser calibrado de forma a obtermos uma escala adequada no papel, ajustando as penas referentes as componentes em fase e quadratura com o zero e o fundo de escala adotado.

5.1.2 Cancelamento do Campo Primário

Por causa da baixa magnitude do campo secundário (H_s), foi necessário construir um sistema de cancelamento do campo primário de modo que chegue ao detetor somente o sinal referente ao meio geológico. O sinal devido ao acoplamento direto (H_p) é milhares de vezes maior que o sinal secundário (H_s), mascarando o sinal que realmente nos interessa.

Com a sonda ainda afastada do modelo geoelétrico, captando somente o sinal de acoplamento direto, passamos a chave do diagrama de blocos (Figura 4.6) para a posição 2 (fechada), de forma que o sinal captado pela bobina receptora passe pelo amplificador diferencial e seja cancelado. Este cancelamento é obtido através de dois potenciômetros que

controlam o nível e a fase de um sinal gerado no cancelador, sendo este sinal defasado de 180° e de mesma magnitude do que está sendo recebido. Monitorando através do detector de fase, o cancelamento ocorrerá quando nenhum sinal chegar ao aparelho, podendo ser feito em três etapas (amplificador de estágios), sendo o ganho em função do nível de sinal a ser medido. (1 → 1x; 2 → 10x e 3 → 100x).

5.1.3 Medição dos Campos Secundários

Com o acoplamento direto cancelado, qualquer sinal que chegar ao detetor de fase será devido a campos secundários (H_s). Assim, a sonda já estará em condições de atravessar o modelo geoelétrico. As respostas obtidas no registrador gráfico poderão estar normalizadas com relação a 100%, 10% ou 1% do campo primário, dependendo do nível de amplificação respectivamente utilizado: 1, 10 ou 100 vezes.

5.2 TESTES COM O SISTEMA ELÉTRICO

Foi construído um dispositivo para verificação do comportamento das sondas (Figura 5.1) com um tanque de fibra de vidro, de dimensões internas 45 cm x 55 cm x 100 cm (altura, largura e comprimento respectivamente), atravessado centralmente e ao longo de seu comprimento por um tubo de PVC de 1" de diâmetro e 150 cm de extensão, simulando o poço sem zona de invasão. O objetivo deste dispositivo é de simular uma situação ideal onde temos um meio homogêneo e infinito de condutividade conhecida, sem apresentar invasão dos fluidos de perfuração.

Preenchemos o tanque de testes com uma solução de 24 S/m de condutividade e corremos as sondas com três tipos de arranjos de bobinas: coaxial, coplanar e acoplamento mínimo. Os sistemas de arranjo de bobinas coaxial e coplanar apresentaram um padrão bem definido de curvas nas freqüências de 100kHz, 75kHz e 50kHz (Figuras 5.2 e 5.3). Como observaram SALVADORETTI (1990) e MONTENEGRO (1991), a freqüência de 100 kHz foi a que apresentou uma maior amplitude e melhor resolução das curvas, sendo provavelmente a melhor freqüência de trabalho para o nosso sistema de modelamento.

O arranjo coplanar de bobinas apresentou uma boa definção de bordas, tendo suas curvas umas ligeiras oscilações no sinal (Figura 5.3), que correspondem às interfaces entre camadas. HOWARD & CHEW (1992) observaram estas mesmas oscilações nos sinais, ao simularem teoricamente as sondas de indução com o arranjo coaxial, em meios estratificados com camadas inclinadas. Segundo estes autores, o fenômeno ocorre quando o campo elétrico apresenta

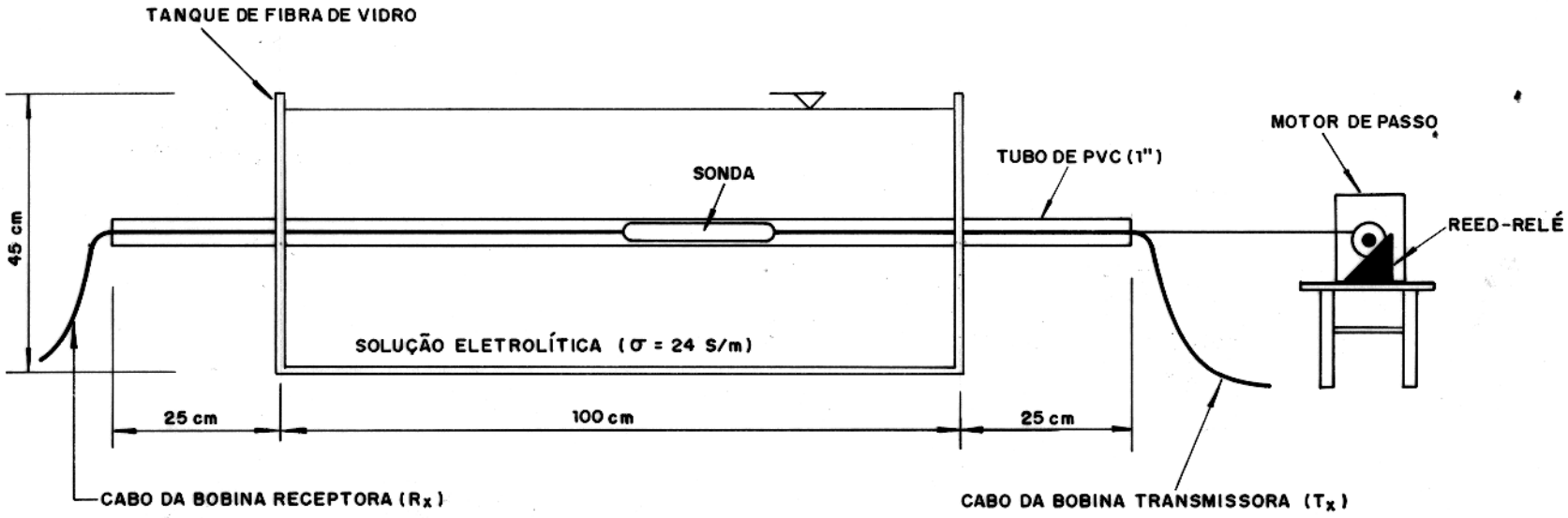


Figura 5.1 - Tanque de testes do sistema elétrico.

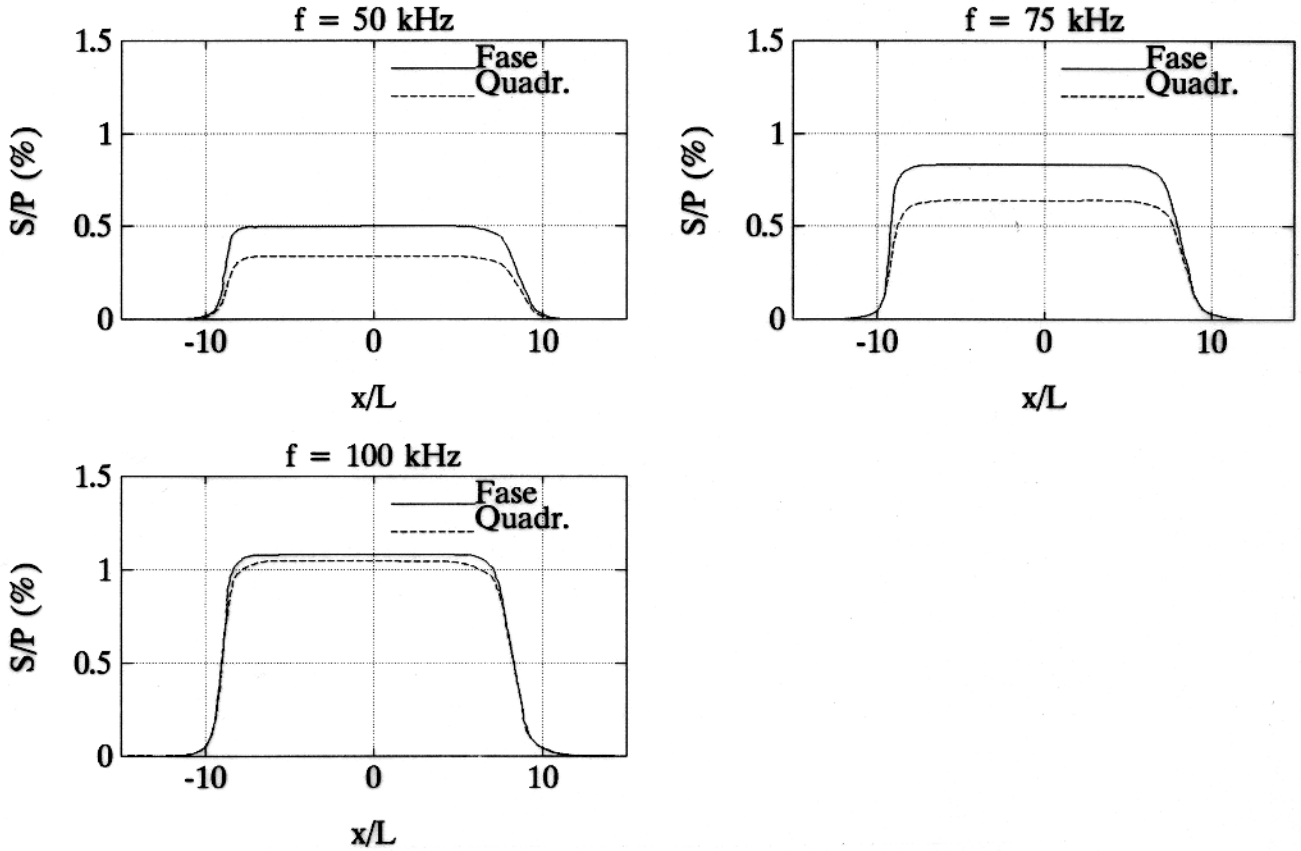


Figura 5.2 - Respostas do arranjo coaxial no tanque de testes nas freqüências de 50, 75 e 100 kHz. As bordas laterais do tanque estão situadas em x/L = -10 e x/L = 10.

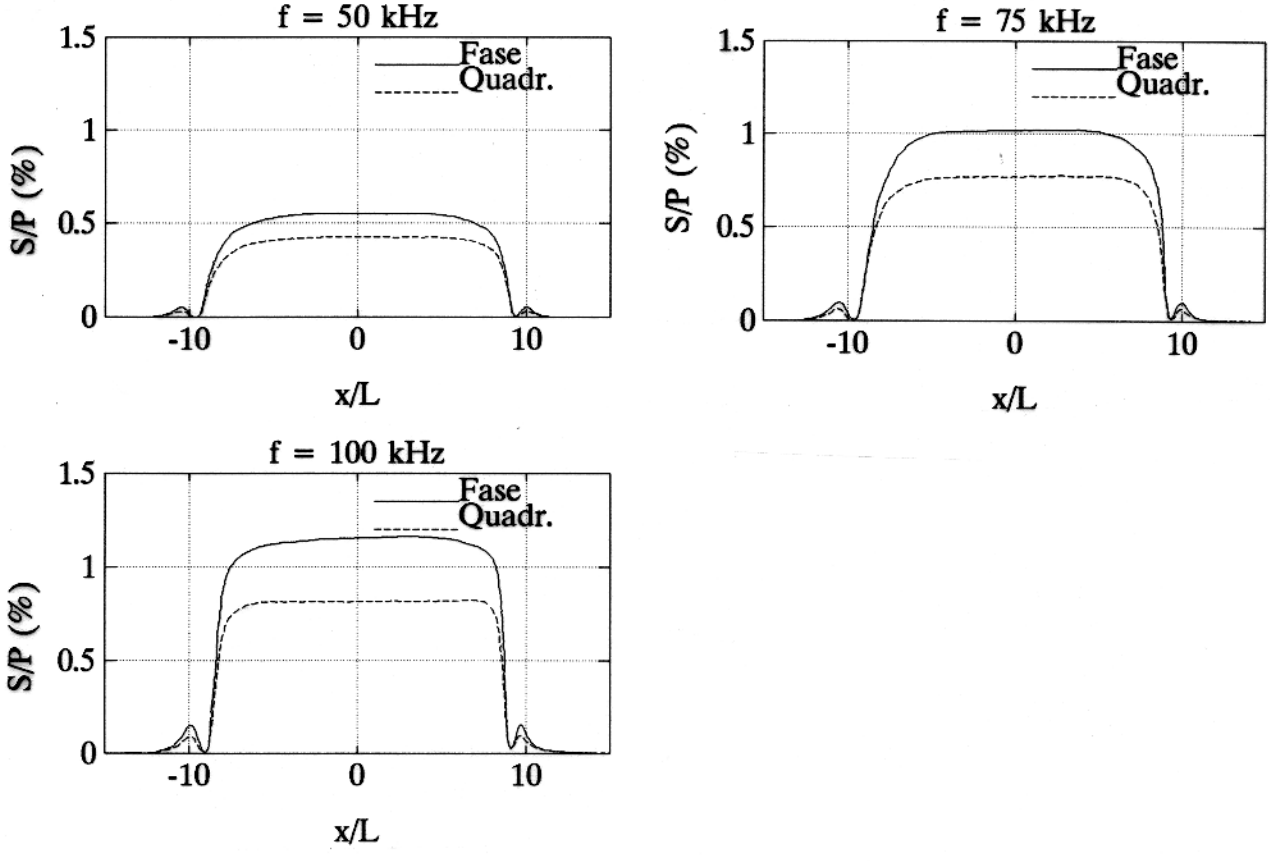


Figura 5.3 - Respostas do arranjo coplanar no tanque de testes nas freqüências de 50, 75 e 100 kHz. As bordas laterais do tanque estão situadas em x/L = -10 e x/L = 10.

uma de suas componentes normal às interfaces das camadas, ocorrendo nestas superfícies um acúmulo de cargas devido à descontinuidade do campo. Na situação geológica simulada em nosso trabalho, camadas plano-paralelas normais ao eixo do poço, o arranjo coaxial de bobinas apresenta suas linhas de indução distribuidas predominantemente normais às interfaces das camadas, consequentemente o vetor campo elétrico fica paralelo a estas superfícies, não ocorrendo as referidas oscilações no sinal citadas anteriormente, que demarcavam relativamente bem as interfaces entre camadas.

Com o objetivo de verificar a estabilidade do nosso sistema elétrico em termos de repetibilidade dos experimentos, fizemos a mesma medida quatro vezes (m_1 a m_4) com as sondas de arranjo coaxial e coplanar (Tabelas 5.1 e 5.2), nas freqüências de 50, 75 e 100 kHz, de forma a podermos observar uma variação máxima (v) de 3.9 % com relação a média aritmética das medidas (m_m).

Tabela 5.1 - Magnitudes máximas (S/P (%)) obtidas nos testes de repetibilidade das medidas com o **arranjo coaxial**.

Freq. (kHz)	Componentes	m_1	m_2	m_3	m_4	m_m	v (%)
50	Fase	0.500	0.510	0.500	0.520	0.507	3.9
	Quad.	0.350	0.360	0.350	0.350	0.352	2.8
75	Fase	0.840	0.830	0.830	0.840	0.835	1.2
	Quad.	0.640	0.640	0.650	0.640	0.642	1.6
100	Fase	1.090	1.070	1.070	1.070	1.075	1.9
	Quad.	1.040	1.050	1.050	1.050	1.047	0.9

Tabela 5.2 - Magnitudes máximas (S/P (%)) obtidas nos testes de repetibilidade das medidas com o **arranjo coplanar**.

Freq. (kHz)	Componentes	m_1	m_2	m_3	m_4	m_m	v (%)
50	Fase	0.490	0.490	0.480	0.490	0.487	2.0
	Quad.	0.390	0.390	0.400	0.400	0.395	2.5
75	Fase	0.900	0.930	0.930	0.910	0.917	3.3
	Quad.	0.740	0.740	0.740	0.750	0.742	1.3
100	Fase	1.230	1.200	1.220	1.230	1.220	2.4
	Quad.	0.870	0.860	0.870	0.860	0.865	1.2

Devido ao tipo de respostas do nosso sistema elétrico que é normalizado com relação ao campo de acoplamento direto (campo primário), tivemos uma série de problemas com

o arranjo de bobinas de acoplamento mínimo. A princípio, o maior empecilho de utilizar este tipo de arranjo era a falta do sinal de referência para normalizar as respostas pois, o acoplamento direto neste caso é praticamente zero. Para contornar este problema utilizamos a sonda de arranjo coplanar (Figura 4.8b) para obter o arranjo de acoplamento mínimo, bastando dar um giro de 90° em uma de suas partes. Assim, podíamos obter o sinal de referência com o arranjo de acoplamento máximo (coplanar) e em seguida, passaríamos para o arranjo de acoplamento mínimo, estando assim aparentemente em condições de utilizarmos este arranjo. Após corrermos a sonda no tanque de testes por diversas vezes, obtivemos curvas que não tinham um comportamento bem definido, variando sua forma e amplitude a cada corrida. Não sabíamos se o problema estava na sonda ou no sistema de instrumentação, de modo que era inviável adotar um arranjo de bobinas que nós ainda não tínhamos um padrão definido de respostas, pois ao passá-lo no modelo geoelétrico não saberíamos determinar as deflexões correspondentes às anomalias.

Devido a incompatibilidade do nosso sistema de instrumentação com o arranjo de acoplamento mínimo, resolvemos testar arranjos intermediários entre o acoplamento máximo e mínimo. Através da sonda de arranjo coplanar, temos a possibilidade de girarmos o plano de uma bobina com relação a outra em diferentes ângulos (de 0° a 90°). O interesse principal que tínhamos em trabalhar com o arranjo de acoplamento mínimo era devido a quase ausência do campo de acoplamento direto na bobina receptora, onde teríamos somente o registro do sinal referente ao campo secundário.

O sistema de instrumentação nos permite obter as posições angulares de 0° (acoplamento máximo) e 90° (acoplamento mínimo), bastando monitorar nos visores relativos às componentes em fase e em quadratura no detector de fase. Para obter as posições angulares intermediárias entre 0° e 90°, basta marcar no corpo da ferramenta (Figura 4.8) as frações relativas a 1/6, 1/3, 1/2, 3/2 e 5/6 do deslocamento linear em sua superfície devido ao giro de 1/4 de volta, correspondendo respectivamente a 15°, 30°, 45°, 60° e 75°.

Ao girarmos uma parte da sonda com relação a outra com o objetivo de obter as posições angulares referidas anteriormente, estamos inevitavelmente alterando o valor inicial do espaçamento entre bobinas ($L = 50$ mm), o que poderia afetar as respostas a serem comparadas para as diferentes posições angulares. Com esta preocupação, decidimos efetuar medições no tanque de testes (Figura 5.1) com a ferramenta coplanar (Figura 4.8b) para dois valores de espaçamento entre bobinas. A primeira é para $L = 50$ mm, que corresponde à posição anterior a qualquer giro, e a segunda posição é para $L = 51$ mm, que corresponde a um giro de uma volta completa (360°). A Tabela 5.3 nos apresenta as magnitudes obtidas para as componentes em fase e quadratura nas duas situações, onde podemos verificar que uma

variação de 2% no espaçamento entre bobinas ($L = 50$ mm para $L = 51$ mm) acarretará num incremento de no máximo 6.9 % na componente em quadratura a 100 kHz. Desta forma, não existe motivos de preocupação quanto as mudanças no valor de L ao efetuarmos nosso estudo de posições angulares intermediárias entre o acoplamento máximo e mínimo pois, o maior giro a ser efetuado será de 1/4 de volta (90°), acarrentando numa variação de L de no máximo 0.25 mm, bem inferior a que foi utilizada no estudo.

Tabela 5.3 - Respostas do arranjo coplanar (S/P (%)) ao variarmos o espaçamento entre bobinas (L).

Frequência kHz	Componentes S/P (%)	Giro (graus) 0° $L = 50$ mm	360° $L = 51$ mm	Incremento (%)
50	Fase	0.485	0.512	5.55
	Quad.	0.392	0.395	0.80
75	Fase	0.915	0.929	1.50
	Quad.	0.740	0.774	4.54
100	Fase	1.221	1.228	0.61
	Quad.	0.863	0.922	6.90

Foram traçadas curvas para seis posições angulares (0°, 15°, 30°, 45°, 60° e 75°) nas freqüências de 50 kHz (Figura 5.4) e 75 kHz (Figura 5.5). Na freqüência de 100 kHz não foi possível traçar as curvas referentes a posição angular de 75° (Figura 5.6), devido às limitações instrumentais no sistema de cancelamento do acoplamento direto. Podemos observar a sensível queda na amplitude do sinal (principalmente na componente em quadratura nas freqüências de 50 e 75 kHz), a medida que o ângulo entre os eixos normais aos planos das bobinas(Figura 4.9) vai aumentando, e conseqüentemente se aproximando do arranjo de acoplamento mínimo (eixos a 90°). Além disso, em termos de resolução de bordas de camadas, não se observa nenhum incremento com relação ao arranjo coplanar que nos encorage a prosseguir na tentativa de uso deste arranjo de acoplamento mínimo.

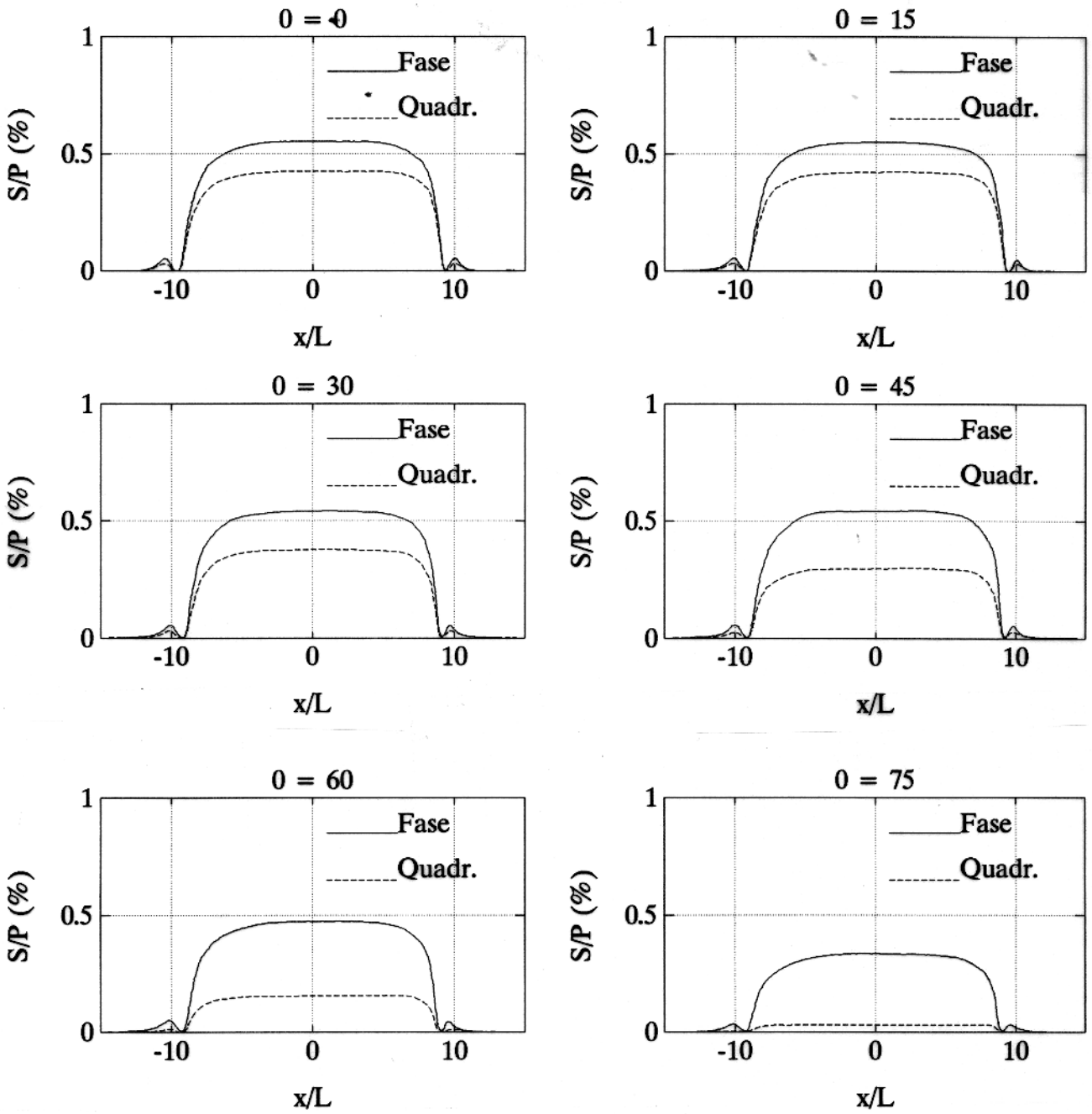


Figura 5.4 - Respostas obtidas no tanque de testes para seis posições angulares intermediárias entre os arranjos de acoplamento máximo ($\theta = 0°$) e mínimo ($\theta = 90°$) na freqüência de 50 kHz. As bordas laterais do tanque estão situadas em x/L = -10 e x/L = 10.

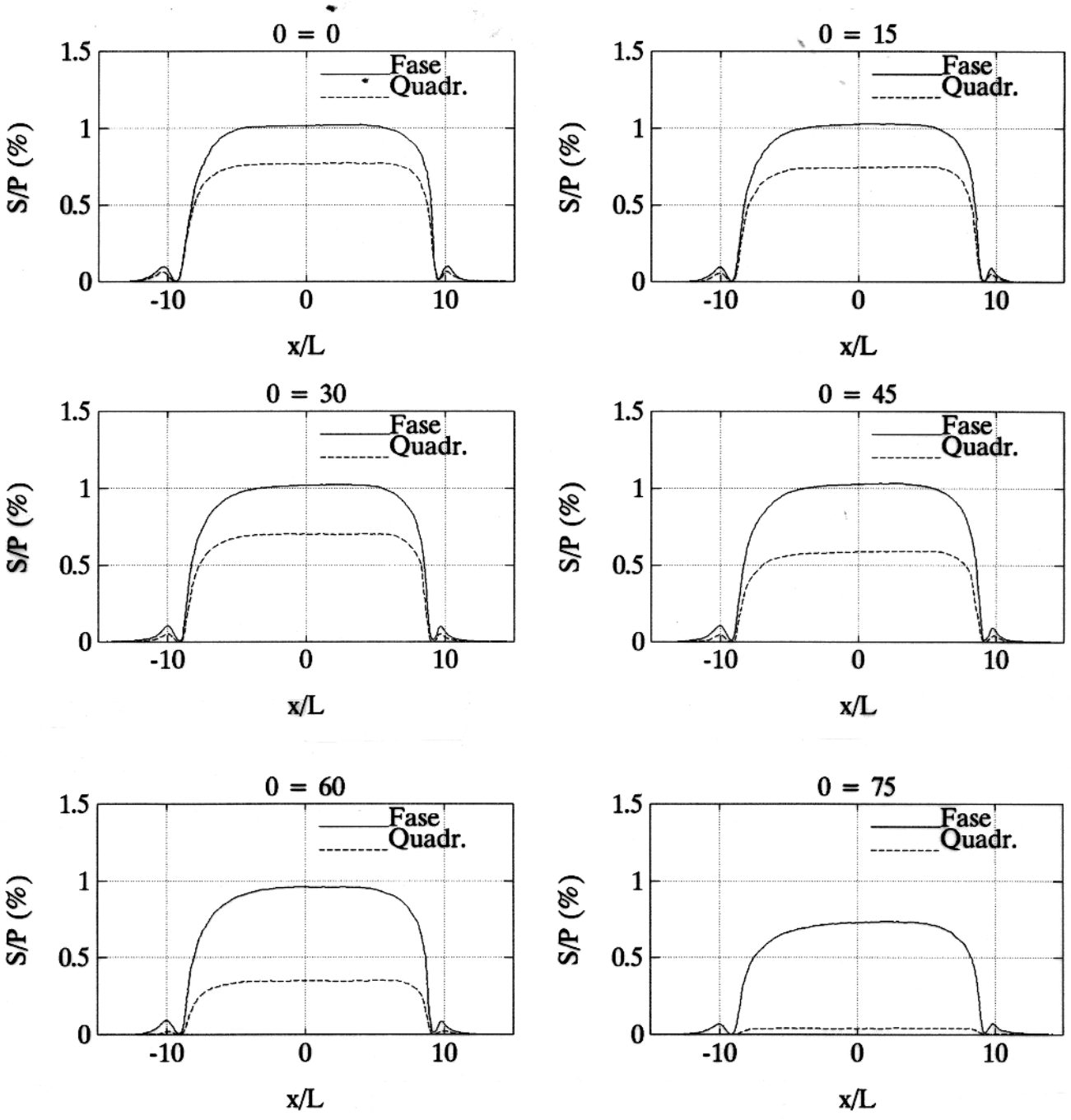


Figura 5.5 - Respostas obtidas no tanque de testes para seis posições angulares intermediárias entre os arranjos de acoplamento máximo ($\theta = 0°$) e mínimo ($\theta = 90°$) na freqüência de 75 kHz. As bordas laterais do tanque estão situadas em x/L = -10 e x/L = 10.

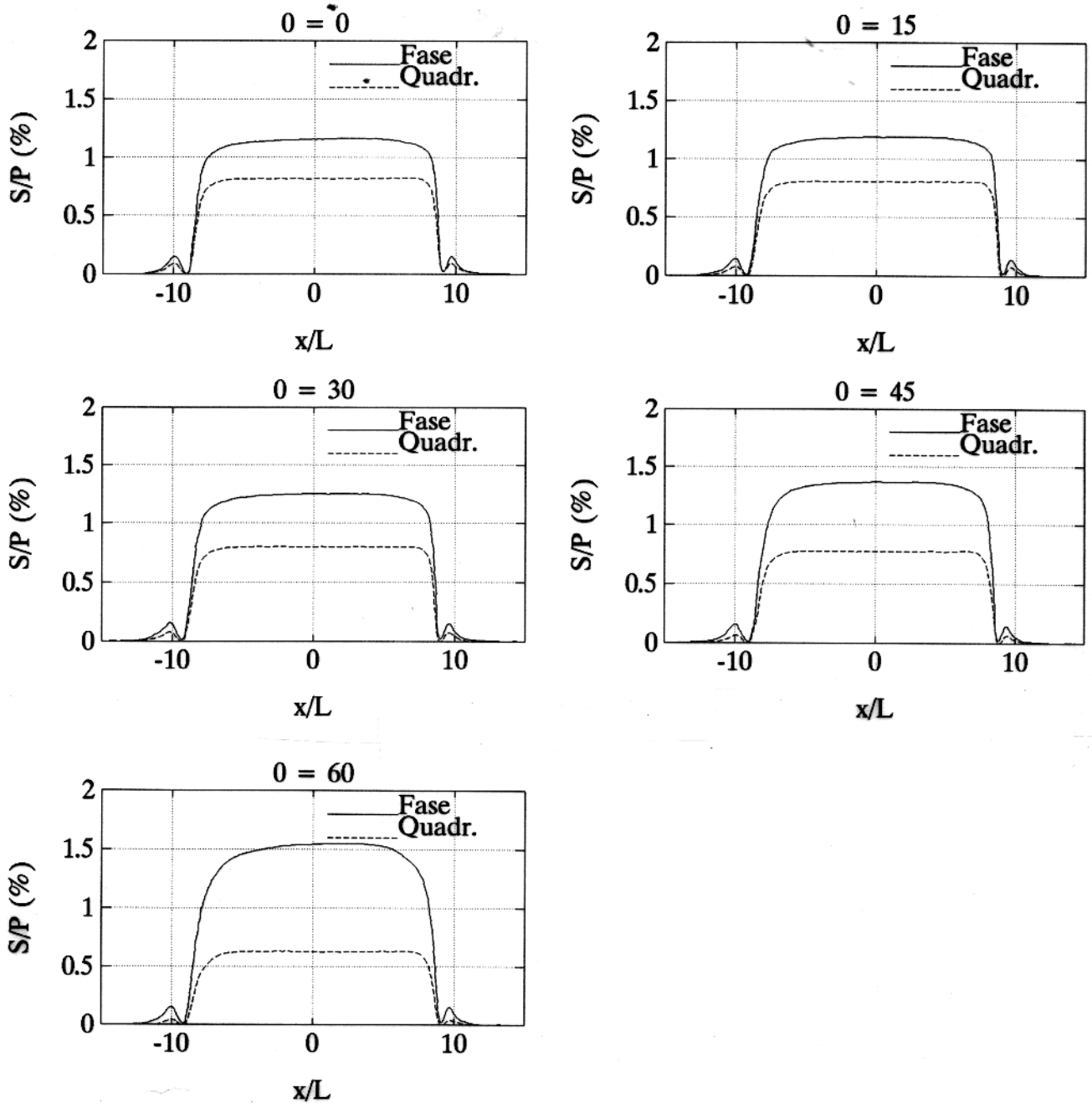


Figura 5.6 - Respostas obtidas no tanque de testes para cinco posições angulares intermediárias entre os arranjos de acoplamento máximo ($\theta = 0°$) e mínimo ($\theta = 90°$) na freqüência de 100 kHz. As bordas laterais do tanque estão situadas em x/L = -10 e x/L = 10.

5.3 EFEITOS DA ZONA DE INVASÃO DE FLUIDOS

Como já foi exposto no capítulo anterior (ítem 4.4) sobre as dificuldades enfrentadas em simular a zona de invasão de fluidos na formação, tentaremos fazer uma breve avaliação dos efeitos provocados em nosso modelo geoelétrico de *thin beds reservoir*, ao tratarmos de forma bastante simplificada este complexo fenômeno, onde fomos forçados a considerar um determinado diâmetro de invasão nos folhelhos.

Preenchendo com a mesma solução eletrolítica que simula a condutividade dos folhelhos (σ = 24 S/m) o compartimento III (Figura 4.2) e as subdivisões do compartimento II de 1 a 4, deixando as de 5 a 9 vazias, montaremos um modelo geoelétrico (Figuras 5.7 e 5.8) que simulará duas camadas de mesma litologia e espessura, onde na primeira camada não ocorre a invasão de fluidos enquanto que a segunda já apresenta este inconveniente fenômeno. Podemos verificar nos perfis de indução que o sinal é bem menor frente a camada com zona de invasão devido ao afastamento da zona de maior condutividade (zona virgem) pelo *mud filtrate.*

A Tabela 5.4 nos apresenta os valores das componentes em fase e quadratura dos sinais registrados pelas sondas com arranjo de bobinas coaxial e coplanar, medidos numa freqüência de 100 kHz, além de fornecer o valor percentual de atenuação sofrido pelo sinal quando a sonda passa da camada sem invasão de fluidos para uma camada similar (mesma litologia e espessura) com invasão de fluidos. Podemos observar que ambos os arranjos de bobinas sofrem uma forte atenuação no sinal ao considerarmos a zona de invasão, onde o arranjo coplanar é ligeiramente mais afetado.

Tabela 5.4 - Redução na magnitude dos sinais devido a zona de invasão.

	Coaxial		Coplanar	
	Fase	Quadr.	Fase	Quadr.
Sem Invasão S/P (%)	1.05	1.03	1.25	0.95
Com Invasão S/P (%)	0.48	0.42	0.40	0.30
Redução (%)	54	60	68	68

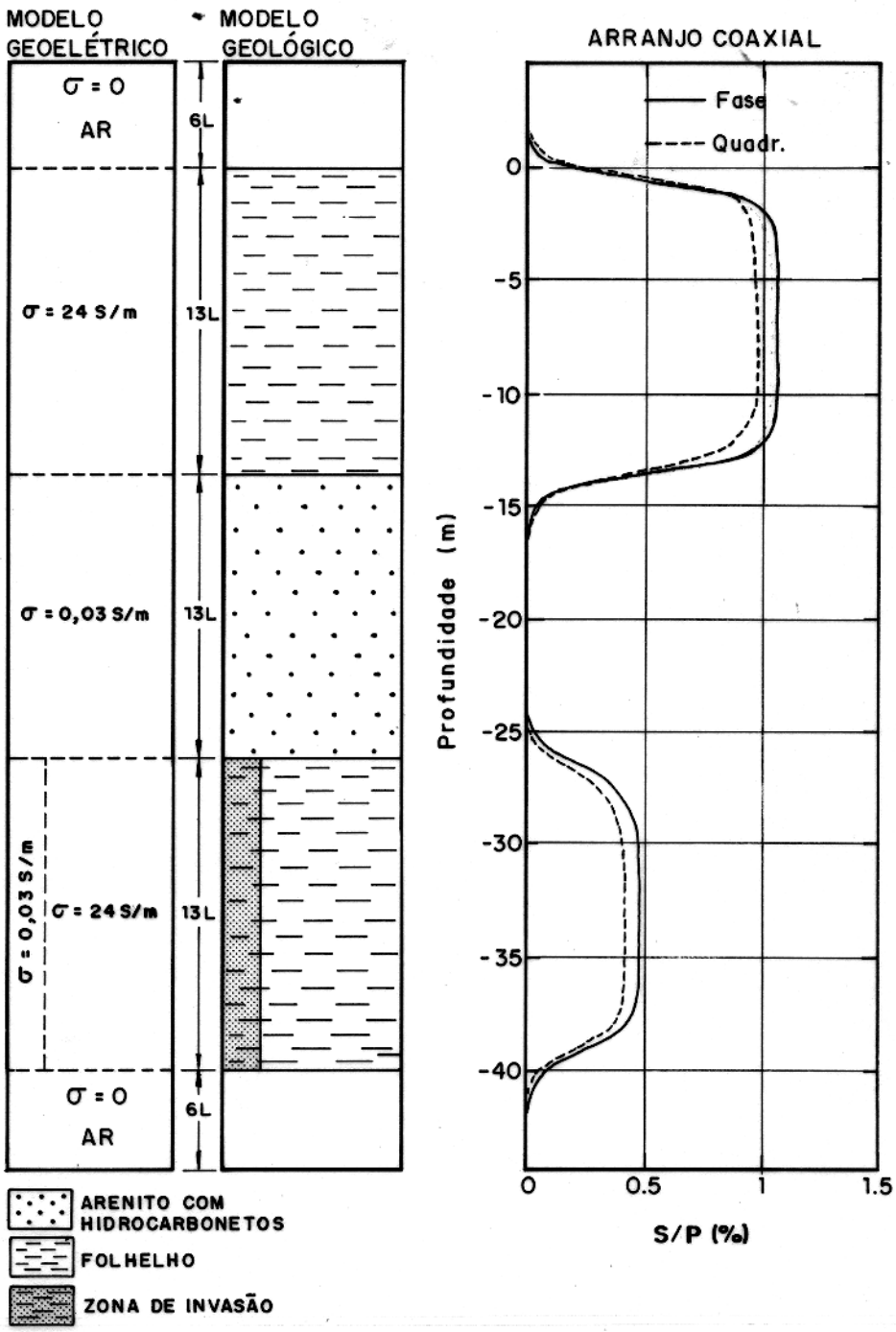


Figura 5.7 - Redução provocada pela invasão de fluidos na resposta do arranjo coaxial a 100 kHz.

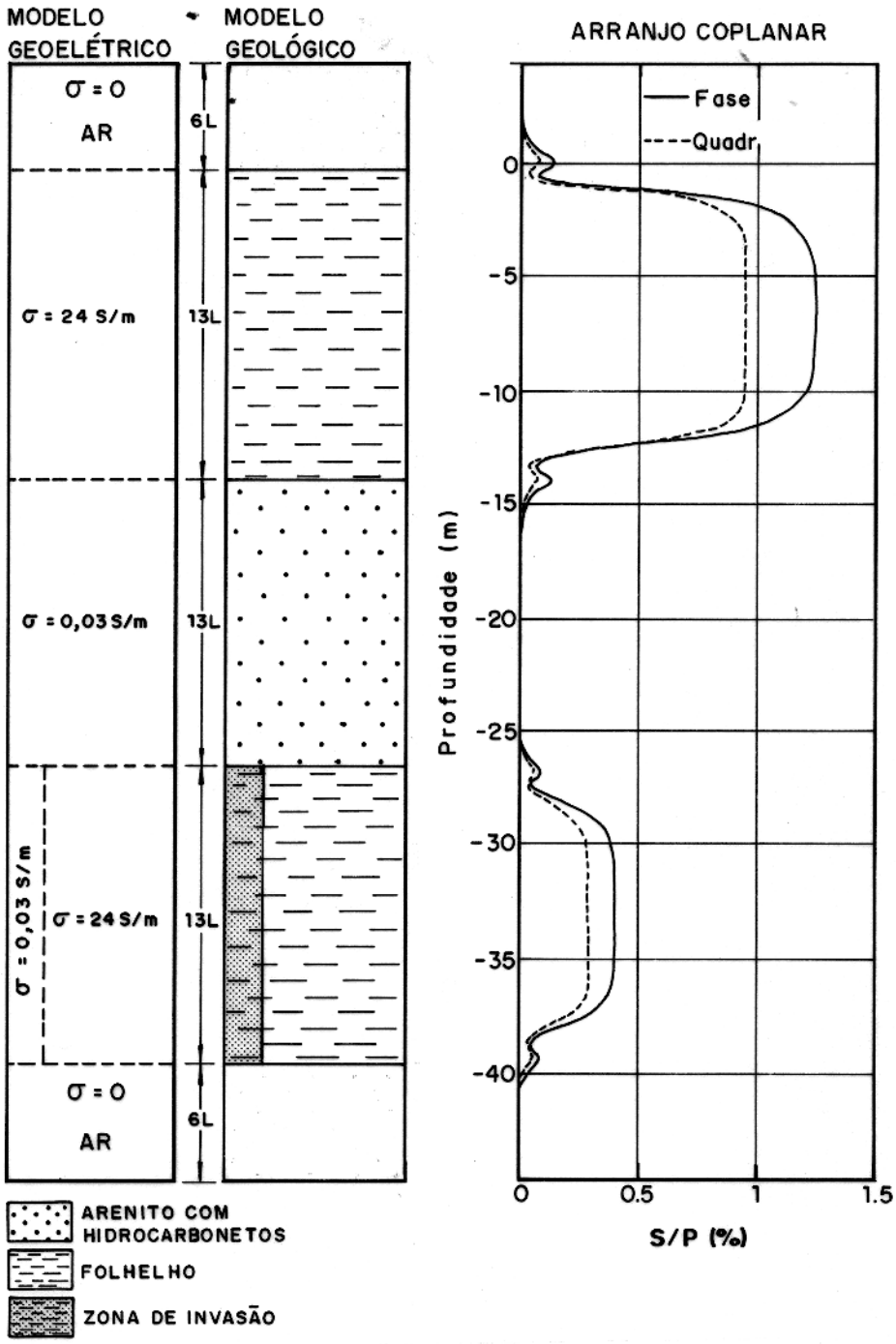


Figura 5.8 - Redução provocada pela invasão de fluidos na resposta do arranjo coplanar a 100 kHz.

5.4 MODELOS GEOLÓGICOS SIMULADOS

De posse do tanque (Figura 4.2) compartimentado em divisões de diferentes espaçamentos, montaremos modelos geoelétricos que simulam dois modelos geológicos bastante freqüentes em reservatórios de hidrocarbonetos, onde teremos a presença de camadas finas de espessuras variáveis, relativas ao espaçamento das bobinas. A mudança de um modelo geoelétrico para outro será feita pela simples permutação das soluções eletrolíticas entre os compartimentos.

5.4.1 **Pacote Psamítico com Níveis Pelíticos**

Este é um modelo litoestratigráfico bastante freqüente em reservatórios de hidrocarbonetos (Figuras 5.9 e 5.10), podendo ser formados por lobos turbidíticos proximais, onde temos lentes pelíticas de diferentes espessuras num pacote psamítico. É de grande importância a localização destas finas camadas de pelitos pois elas contribuem na resposta obtida pelas ferramentas de indução eletromagnética, levando a uma leitura de resistividade elétrica ligeiramente menor no caso de reservatórios de hidrocarbonetos, podendo às vezes mascarar a presença das rochas reservatórios.

5.4.1.1 Perfis de Indução

Foram corridas as ferramentas de arranjo de bobinas coaxial e coplanar (Figura 4.8), na freqüência de 100 kHz, com o objetivo de compararmos as respostas dos dois arranjos frente às camadas condutivas de pequena espessura, que neste caso são representadas pelos níveis pelíticos de espessuras, relativas ao espaçamento das bobinas, progressivamente decrescentes.

a) Arranjo de Bobinas Coaxial

O perfil de indução obtido com a sonda de arranjo coaxial (Figura 5.9) apresenta uma boa correlação com o modelo geológico simulado. Ele apresenta um bom posicionamento dos cinco níveis pelíticos além de nos dar uma idéia com relação às suas espessuras pois, os pontos de inflexão dos picos das curvas se apresentam progressivamente decrescentes em magnitude, refletindo a respectiva redução em espessura das camadas.

Os pontos de inflexão dos vales das curvas, correspondentes ao centro das camadas psamíticas saturadas em hidrocarbonetos, deveriam apresentar uma condutividade praticamente nula. Más, podemos observar que eles se encontram com valores não correspondentes ao real, devido provavelmente ao efeito de camadas adjacentes (*shouder effect*) produzido pelos níveis pelíticos, que embora sejam de pequenas espessuras, apresentam uma condutividade

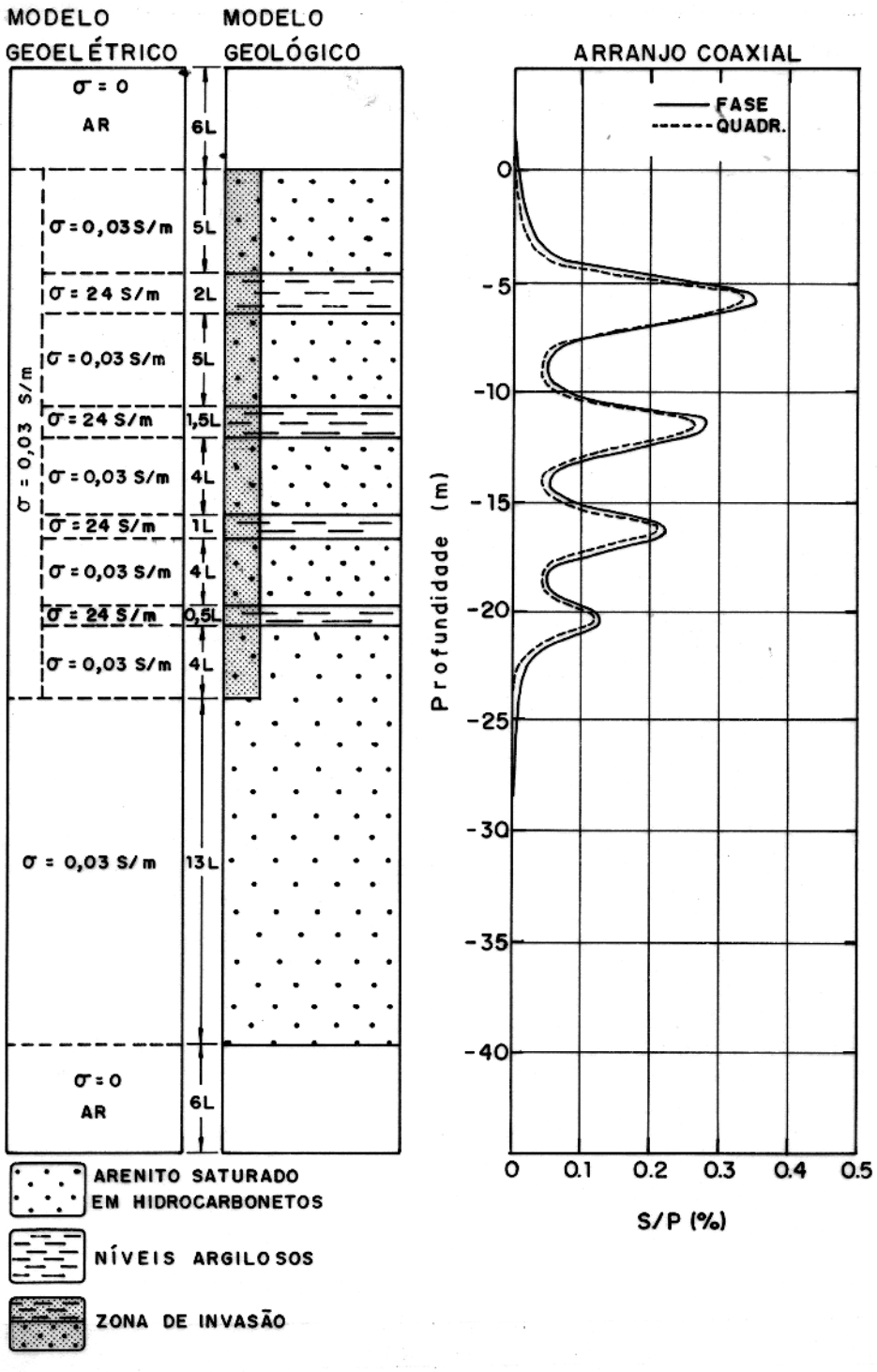


Figura 5.9 - Modelos geoelétrico e geológico de um pacote sedimentar psamítico com níves pelíticos, com o perfil de indução obtido com o arranjo coaxial na freqüência de 100 kHz.

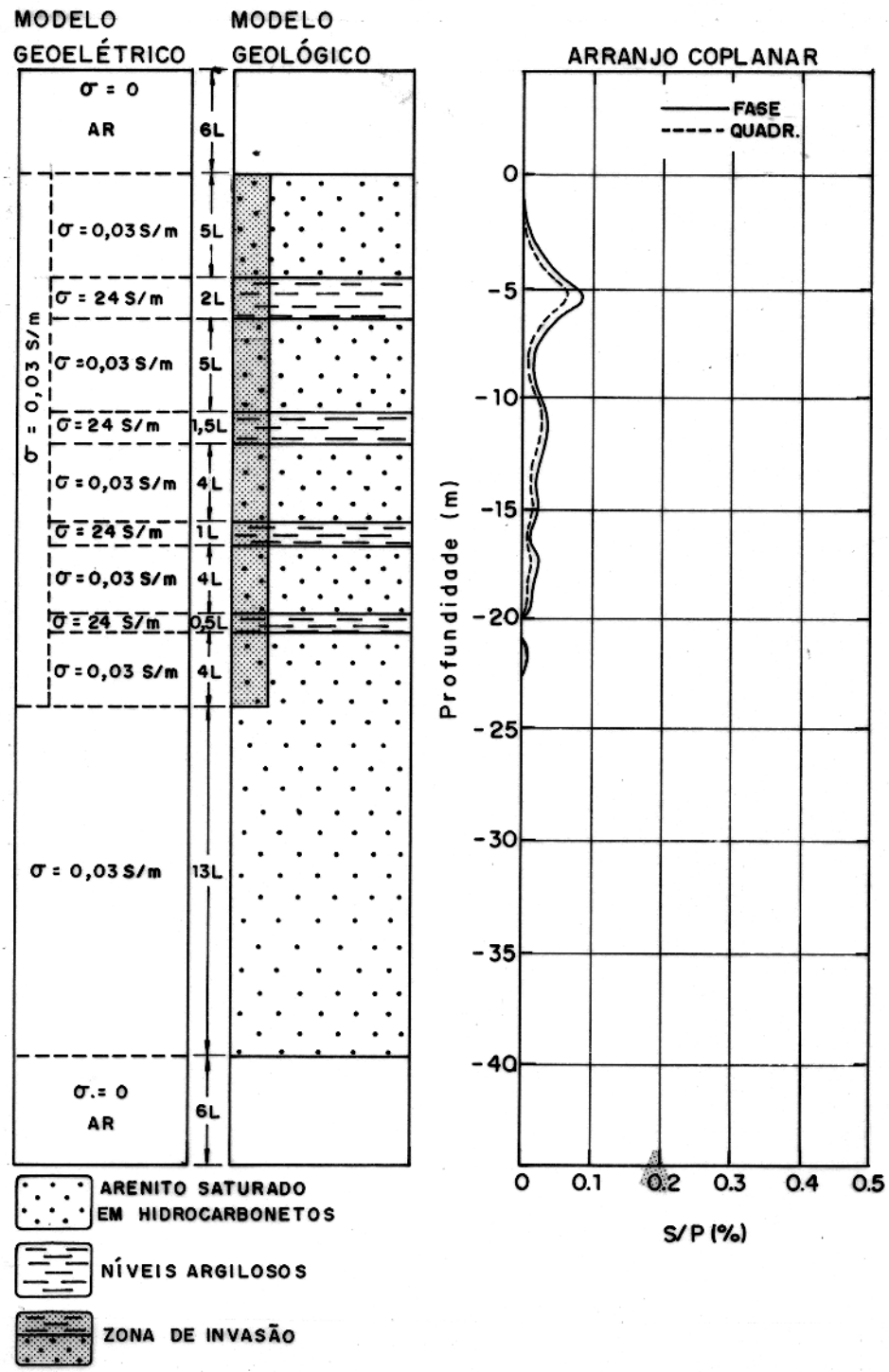


Figura 5.10 - Modelos geoelétrico e geológico de um pacote sedimentar psamítico com níves pelíticos, com o perfil de indução obtido com o arranjo coplanar na freqüência de 100 kHz.

relativamente elevada.

b) Arranjo de Bobinas Coplanar

O perfil de indução obtido com a sonda de arranjo coplanar (Figura 5.10) se apresenta bastante deficiente para este modelo geológico simulado, comparado ao perfil obtido com a sonda de arranjo coaxial (Figura 5.9). Apresentando uma magnitude do sinal relativamente baixa, somente a camada condutiva superior (espessura 2L) pode ser realmente posicionada, enquanto para as demais (1.5L; 1L e 0.5L) não houve uma correlação que permitisse as suas localizações.

Acreditamos que a boa resposta obtida neste modelo geológico com o arranjo coaxial, se deve a distribuição geométrica das suas linhas de indução, que são predominantemente paralelas às interfaces das camadas, ficando os *loops* de corrente completamente desenvolvidos. Por outro lado, as linhas de indução do campo primário para o arranjo coplanar, induzem *loops* de corrente restritos a uma limitada seção transversal das finas camadas condutivas, acarretando num sinal resposta relativamente fraco.

5.4.2 Pacote Pelítico com Lentes Psamíticas

Este é um segundo modelo litoestratigráfico bastante freqüente nos reservatórios de hidrocarbonetos na parte emersa das bacias sedimentares litorâneas brasileiras (Figuras 5.11 e 5.12). Ele é característico de lobos turbidíticos distais onde são freqüentes lentes psamíticas num pacote de sedimentos predominantemente pelítico. Embora estas lentes ocorram com espessuras relativamente pequenas, não podemos negligenciá-las pois podem apresentar extensão lateral considerável e ter características permo-porosas razoáveis, podendo formar reservatórios economicamente produtivos.

5.4.2.1 Perfis de Indução

Foram corridas as ferramentas de arranjo de bobinas coaxial e coplanar, (Figura 4.8) com o objetivo de compararmos as respostas destes dois arranjos frente as camadas de pequenas espessuras e baixas condutividades, que estão representadas no modelo geológico (Figuras 5.11 e 5.12) pelos cinco níveis psamíticos saturados em hidrocarbonetos, de espessuras relativas ao espaçamento das bobinas progressivamente decrescentes. Neste modelo geológico poderemos também fazer um estudo comparativo das respostas de ambos os arranjos para camadas de maiores espessuras ($L \geq$ 4L) e condutividades relativamente elevadas, representadas pelas camadas de folhelhos.

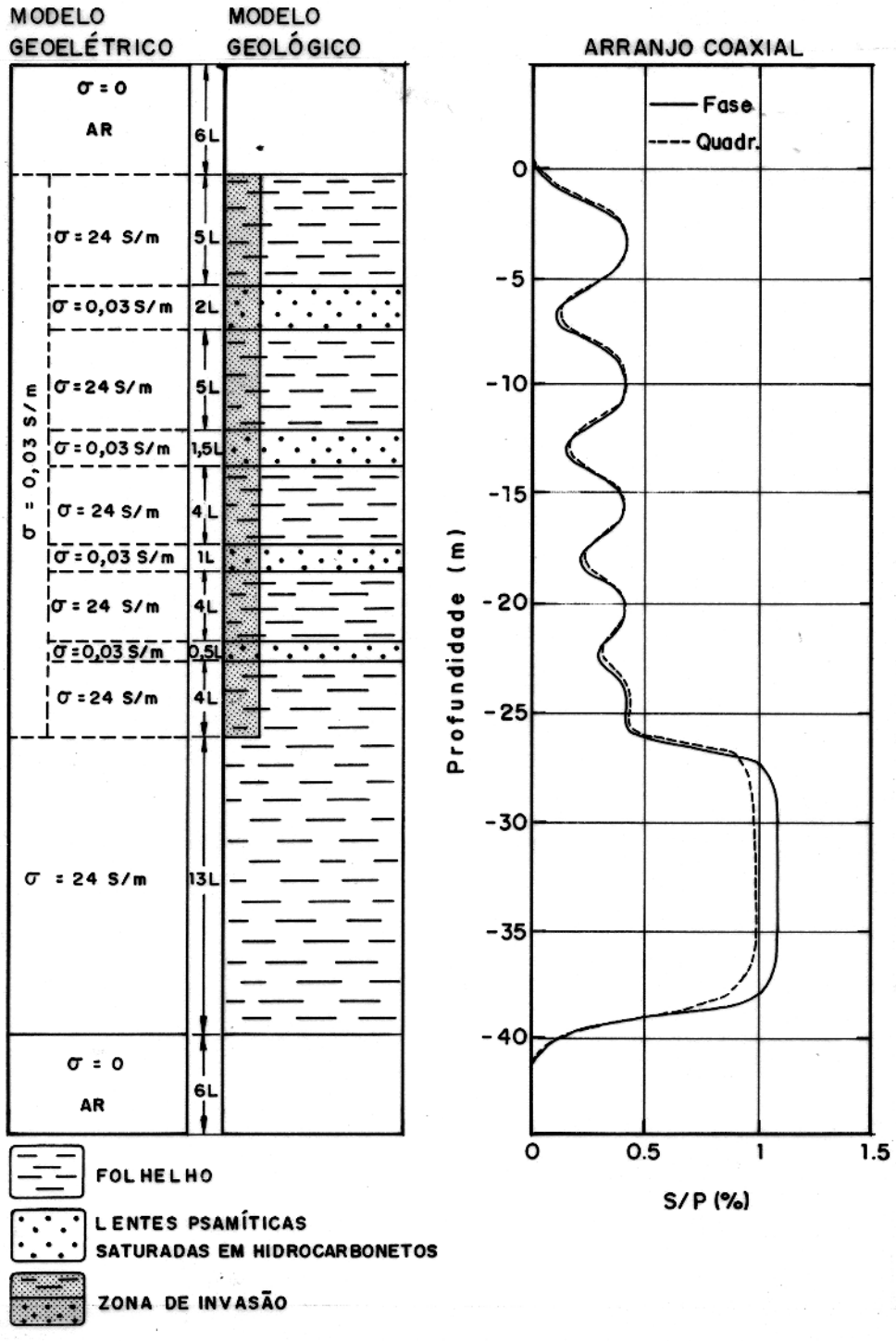


Figura 5.11 - Modelos geoelétrico e geológico de um pacote sedimentar pelítico com lentes psamíticas, com o perfil de indução obtido com o arranjo coaxial na freqüência de 100 kHz.

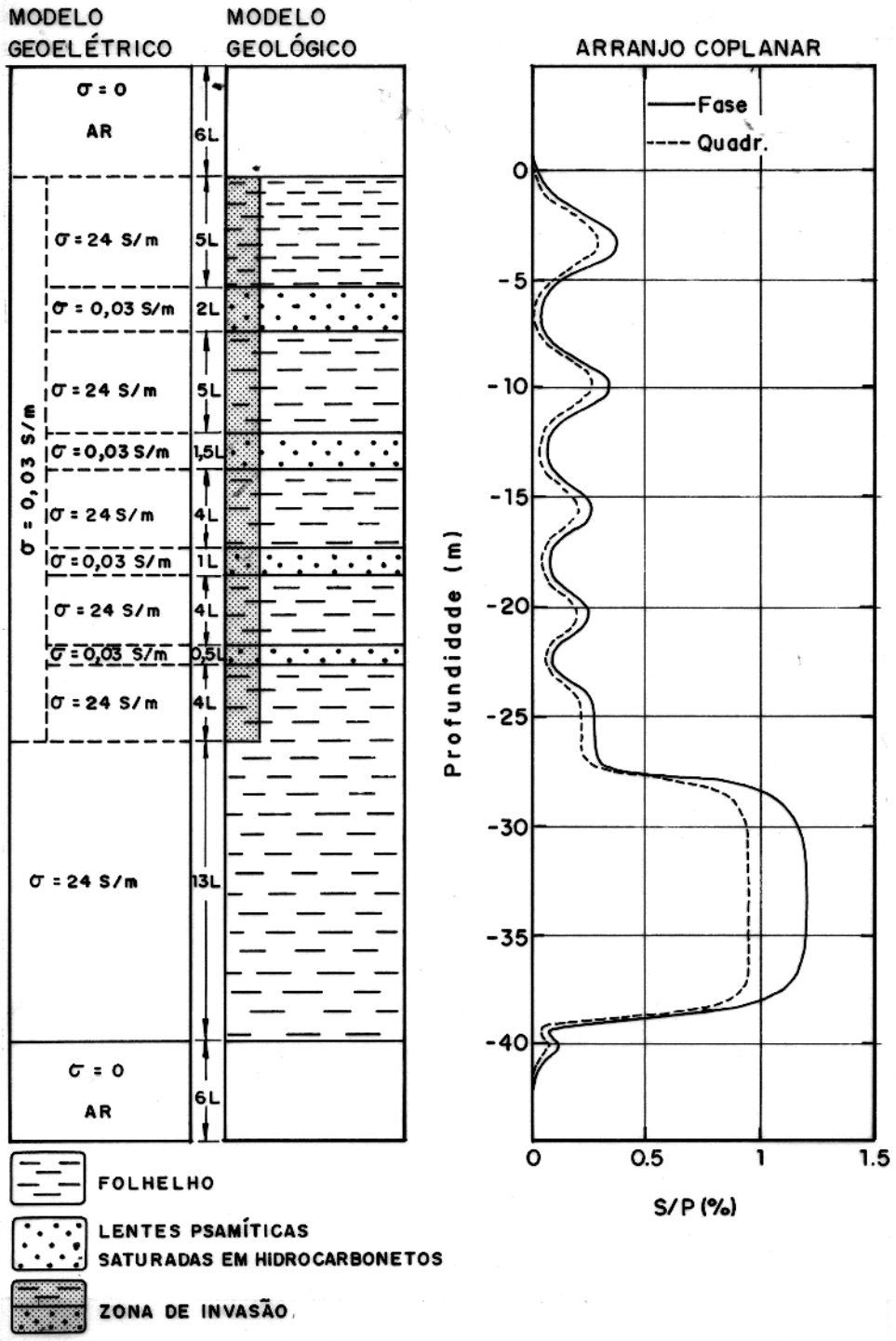


Figura 5.12 - Modelos geoelétrico e geológico de um pacote sedimentar pelítico com lentes psamíticas, com o perfil de indução obtido com o arranjo coplanar na freqüência de 100 kHz.

a) Arranjo de Bobinas Coaxial

O perfil de indução obtido com a sonda de arranjo coaxial (Figura 5.11) apresenta uma boa correlação com o modelo geológico simulado, apresentando um bom posicionamento das camadas de baixa condutividade, que correspondem aos vales das curvas, e também com relação as camadas de maior condutividade, que correspondem aos picos.

Embora sirva para localizar individualmente cada camada, este perfil não nos permite ter uma idéia das espessuras dos diferentes estratos. Os pontos de inflexão dos picos das curvas, correspondentes às camadas de folhelho, apresentam praticamente a mesma magnitude de sinal, não distingüindo as diferenças de espessuras entre as duas primeiras camadas superiores (5L) das duas imediatamente abaixo (4L).

Como já foi observado no perfil de indução do arranjo coaxial do modelo geológico anterior (ítem 5.4.1.1 a), aqui também é bastante visível o efeito de camadas adjacentes (*shouder effect*). Os pontos de inflexão dos vales das curvas se apresentam com valores de condutividade bem acima do real, devido a presença de camadas de maior espessura e condutividade em suas vizinhanças. É notável como este fenômeno é crescente à medida que se aproxima da última e maior camada de folhelho, os vales das curvas vão progressivamente se afastando do eixo de referência e conseqüentemente, assumindo condutividades cada vez mais elevadas e distantes do seu valor real, que são na verdade praticamente nulas por se tratarem de camadas psamíticas saturadas em hidrocarbonetos.

Podemos verificar de uma forma bastante clara neste perfil o que já foi exposto no ítem 5.3, com relação ao efeito de redução sofrido pelo sinal ao considerarmos a zona de invasão de fluidos. Uma forte mudança na magnitude do sinal ocorre quando a sonda chega à última camada de folhelho pois, este é o limite de onde foi simulado a zona de invasão.

É interessante ainda observarmos que as componentes em fase e quadratura do sinal se apresentam bem distintas para a última e mais espessa camada de folhelho, enquanto para as demais camadas elas praticamente se sobrepõem.

b) Arranjo de Bobinas Coplanar

O perfil de indução obtido com o arranjo coplanar (Figura 5.12) também apresenta uma boa correlação com o modelo geológico simulado, apresentando um bom posicionamento das camadas finas de baixa condutividade, que correspondem aos vales das curvas, e também com relação às camadas de maior espessura e condutividade, que correspondem aos picos.

Este perfil se apresenta com uma resolução vertical sensivelmente superior ao obtido com o arranjo de bobinas coaxial nesse segundo modelo. É visível a diferença entre as magnitudes

dos pontos de inflexão dos dois primeiros picos (camadas de espessura 5L) com relação as duas últimas (espessuras 4L). É também perceptível o progressivo estreitamento dos vales das curvas, à medida que as camadas de baixa condutividade vão diminuindo em espessura.

O efeito de camadas adjacentes (*shouder effect*) neste perfil é bem inferior ao que ocorre com o obtido com o arranjo de bobinas coaxial, não observando de forma tão acentuada aquele progressivo aumento na condutividade dos pontos de inflexão dos vales, à medida que se aproxima da última e mais espessa camada de folhelho.

Podemos também observar aqui o forte efeito provocado na magnitude do sinal ao passarmos da região com invasão de fluidos para aquela sem zona de invasão.

Nos testes que foram feitos no ítem 5.2, com o objetivo de verificar o comportamento das sondas e a estabilidade do sistema elétrico, observamos que o arranjo coplanar de bobinas apresentava uma boa definição de bordas de camadas (Figura 5.3) com relação ao arranjo coaxial (Figura 5.2). Neste perfil podemos verificar que esta vantagem só é verdadeira para camadas bastante espessas, como é o caso da última camada de folhelho, onde temos a interface inferior delimitada pela ligeira oscilação do sinal. Nas demais interfaces, não se observa esta demarcação devido as espessuras das camadas serem relativamente menores.

Acreditamos que o arranjo coplanar apresenta uma resolução vertical relativamente melhor que o coaxial, por ser as camadas finas resistivas uma barreira para o desenvolvimento dos *loops* de corrente nas seções transversais das camadas espessas condutivas. Por outro lado, este efeito de interrupção já não é tão acentuado para o arranjo coaxial, onde temos um perfeito desenvolvimento dos *loops* de corrente nos planos das camadas espessas condutivas.

6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com o objetivo de desenvolver um sistema de modelamento analógico capaz de simular a perfilagem de indução em ambientes geológicos comuns à geofísica de poço, foi montado um tanque compartimentado (Figura 4.2) com um fator de redução de escala igual a 20, que pode simular diferentes sequências litoestratigráficas formadas por camadas tanto espessas como delgadas, de espessuras relativas ao espaçamento entre bobinas da sonda de indução, além de haver duas regiões deste tanque que permitem fazer um estudo comparativo considerando ou não a invasão de fluidos.

O sistema elétrico utilizado nas medições (Figura 4.6) foi produto do aperfeiçoamento de uma série de trabalhos anteriores realizados no Departamento de Geofísica da UFPA, sendo os de SALVADORETTI (1990); MONTENEGRO (1991) e SOUZA (1992) os que mais contribuiram, permitindo medições da razão entre o campo secundário com relação ao primário (H_s/H_p) na ordem de 0,01 %. Este sistema chegou atualmente à sua maior simplificação e eficiência até então obtidas, graças à construção de um novo sistema de cancelamento de campo primário, dando-nos uma flexibilidade de trabalho com relação ao sinal de referência, que pode ser de 100, 10 ou 1% do campo primário (H_p), dependendo do nível dos sinais a serem registrados.

Com o objetivo de verificar a estabilidade do sistema elétrico, bem como o padrão de respostas das sondas com diferentes arranjos de bobinas (coaxial, coplanar e acoplamento mínimo) para uma situação geológica mais simples possível, foi montado um tanque de testes (Figura 5.1) que simula uma única camada espessa e condutiva, sem invasão de fluidos, imersa em um meio de baixa condutividade. As curvas obtidas com os arranjo coaxial (Figura 5.2) e coplanar (Figura 5.3) nos permitem confirmar a afirmação de MONTENEGRO (1991), no que se trata a melhor definição de bordas de camadas do arranjo coplanar com relação ao coaxial, além de verificarmos que a melhor freqüência de trabalho, após realizarmos testes a 50, 75 e 100 kHz, seria no nosso caso a de 100 kHz, devido a maior amplitude e melhor resolução das suas curvas (Tabelas 5.1 e 5.2).

Montamos um modelo geoelétrico que simula duas camadas similares, de mesma espessura e condutividade, diferindo entre se somente pela presença da zona de invasão em uma delas, enquanto a outra não há esta inconveniente pertubação (Figuras 5.7 e 5.8). Podemos observar que ambos os arranjos em estudo, coaxial e coplanar, sofrem uma forte atenuação do sinal

ao considerarmos a zona de invasão, onde o arranjo coplanar é ligeiramente mais afetado (Tabela 5.4).

Montamos dois modelos geoelétricos bastante freqüentes em reservatóriòs de hidrocarbonetos, com perfis litoestratigráficos bastante variados com relação às espessuras das camadas. Estes modelos nos permitem fazer um estudo comparativo das respostas dos arranjos de bobinas coaxial e coplanar, tanto frente às camadas delgadas como às de maiores espessuras, com ou sem invasão de fluidos.

Analisando os perfis obtidos com ambos os arranjos, coaxial e coplanar, para o modelo que simula um pacote psamítico com níveis pelíticos (Figuras 5.9 e 5.10), chegamos a conclusão que quando se trata de camadas delgadas de condutividade elétrica relativamente elevadas, como é o caso de níveis argilosos num pacote arenítico, o arranjo de bobinas coaxial é visivelmente superior ao coplanar, no que se trata ao posicionamento e estimativa das espessuras destas finas camadas.

Analisando os perfis obtidos com ambos os arranjos, coaxial e coplanar, para o modelo que simula um pacote pelítico com níveis psamíticos (Figuras 5.11 e 5.12), observamos uma situação bem diferente da obtida no modelo geológico anterior. Quando se trata de camadas delgadas de condutividade relativamente baixa, como é o caso de lentes arenosas saturadas em hidrocarbonetos num pacote de folhelho, ambos os arranjos apresentam uma boa correlação com o perfil litoestratigráfico, onde podemos verificar uma sensível vantagem do arranjo de bobinas coplanar com relação ao coaxial, no que se trata à resolução vertical das camadas, tanto finas como para as de maior espessura. Um outro ponto bastante marcante com relação a estes perfis, é com relação ao efeito de camadas adjacentes (*shoulder effect*), onde podemos notar este fenômeno de forma bem mais acentuada com o arranjo de bobinas coaxial.

MONTENEGRO (1991) verificou a melhor definição de bordas de camadas obtidas com o arranjo coplanar com relação ao coaxial, como também confirmamos esta observação nos testes com o nosso sistema de modelamento (Figuras 5.2 e 5.3). Más, é importante alertarmos que isto só é verdadeiro para camadas bastante espessas pois, analisando o perfil da Figura 5.12, esta vantagem somente ocorre para a interface inferior da última e mais espessa camada de folhelho, não ocorrendo para as demais camadas aquela ligeira oscilação do sinal que posiciona os bordos, devido provavelmente as suas menores espessuras.

6.1 SUGESTÕES

Acreditando que em breve o laboratório de modelamento analógico em escala reduzida sofrerá profundas mudanças, no que se toca a aquisição de equipamentos modernos e mais precisos, aumentando a confiabilidade dos dados, poderemos avançar no estudo de sondas de indução com arranjos de bobinas não convencionais, investindo esforços principalmente com o arranjo coplanar, devido ao efeito de camadas adjacentes (*shoulder effect*) ser relativamente baixo e, consequentemente, uma significativa vantagem em termos de resolução vertical em determinadas situações geológicas de grande interesse para a prospecção de hidrocarbonetos.

Futuros trabalhos poderão estudar comparativamente as respostas do arranjo coplanar para diferentes espaçamentos de bobinas, onde acreditamos na possibilidade de melhorar ainda mais a resolução vertical deste arranjo, otimizando este importante parâmetro.

Um desafio ainda maior, será a construção de sondas com vários pares de bobinas com o arranjo coplanar, objetivando focalizar as linhas de indução para obter resoluções verticais bem maiores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, D.; ANDERSON, B.; BARBER, T. D.; FLAUM, C.; HEMINGWAY, J.; LIGNERIS, S. 1988. Advances in high-resolution logging. **The Technical Review**, 36(2): 04-14.

ANDERSON, B.; BARBER, T.; SCHAEFER, R. 1988. Induction log: evolution of a technique. **The Technical Review**, 35(1): 35-41.

BARBER, T.D. 1988. Indution vertical resolution enhancement - Phisics and limitations. In: ANNUAL LOGGING SYMPOSIUM, 29., San Antonio, 1988. **Anais**. Houston, SPWA. v.1, p. 1-18.

BEER, R. 1991. O papel da resolução vertical dos perfis de indução nos chamados arenitos de baixa resistividade. In: SEMINÁRIO TÉCNICO DE OPERAÇÕES GEOLÓGICAS, 3., Cabo Frio, 1991. **Anais**. Rio de Janeiro, PETROBRÁS. v.1, p. 359-362.

CHEW, W. C.; BARONE, S.; ANDERSON, B.; HENNESSY, C. 1984. Difraction of axisymetric waves in a borehole by bed boundary discontinuities. **Geophysics**, 49 (10): 1586 - 1595.

DOLL, H.G. 1949. Introdution to induction logging end application to logging of wells drilled with oil mase mud. **Journal of petroleum technology**, 1: 148-162.

DOLL, H.G. 1965. **Method and apparatus for providing improved vertical resolution in induction well logging including electrical storage and delay means.** U.S. Patent nº 3,166,709.

DUESTERHOEFT, W.C. 1961. Propagation effects in induction logging. **Geophysics**, 26 (2): 192-204.

ELLIS, D.V. 1987. **Well Logging for Earth Scientists.** Amsterdam, Elsevier. 532p.

FIGUEIREDO, A. M. F. 1985. Geologia das bacias brasileiras. In: CONFERÊNCIA DE AVALIAÇÃO DE FORMAÇÕES NO BRASIL, 1., Rio de Janeiro, 1985. **Anais**. Rio de Janeiro, WEC BRASIL. v.1, p. 1-38.

FRISCHKNECHT, F.C. 1971. Electromagnetic scale modeling. In: WAIT, J. R., ed., Electromagnetic probing in geophysics. Boulder, Golem Press. p. 265-320.

GRANT, F.S. & WEST, G.F. 1965. **Interpretation theory in applied geophysics.** New York, Mc Graw-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.

HOOD, P. & WARD, S.H. 1969. Airbone geophysical methods. In: — . **Advances in geophysics.** New York, Academic Press. p. 2 - 111.

HOWARD, A. Q. Jr. 1986. A Fourier method for borehole electromagnetic problems. **Geophisics**, 51 (6): 1181 - 1190.

HOWARD, A. Q. Jr. 1987. A spectral method for the inverse electromagnetic logging problem. **Geophisics**, 52 (2): 186 - 193.

HOWARD, A. Q. Jr. & CHEW, W. C. 1992. Electromagnetic borehole fields in a layered, dipping-bed environment with invasion. **Geophysics**, 57 (3): 451 - 465.

MARANHÃO, C.U.C. 1988. Dificuldades na caracterização de zonas de interesse no membro Calumbi da formação Piaçabuçu na porção emersa da bacia Sergipe-Alagoas. In: SEMINÁRIO TÉCNICO DE OPERAÇÕES GEOLÓGICAS, 2., Salvador, 1988. **Anais.** Salvador, PETROBRÁS. v.1, p. 31-39.

MEDAGLIA, J.A.F. & SUGIO, A.H. 1991. Utilização de pefis radioativos com alta resolução vertical na bacia do Espírito Santo. In: SEMINÁRIO TÉCNICO DE OPERAÇÕES GEOLÓGICAS, 3., Cabo Frio, 1991. **Anais.** Rio de Janeiro, PETROBRÁS. v.1, p. 259-271.

MONTENEGRO, J.F.B. 1991. **Estudo da resposta de diferentes arranjos de bobinas na perfilagem de indução de poço: modelamento analógico.** Belém, Universidade Federal do Pará. 64p. Tese(Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPA, 1991.

MORAN, J. H. & KUNZ, K. S. 1962. Basic theory of induction logging and application to study of two coil sonds. **Geophysics**, 27 (6): 829-858.

ROMEU, R.K.; RODRIGUES, F. da S.; ROSSI FILHO, J.; SARZENSKI, D.J. 1991. **Deconvolução de perfis - Estudo do estado da arte.** Rio de Janeiro, CENPES-PETROBRÁS. 82 p. (1° relatório técnico parcial).

SALVADORETTI, P. 1990. **Construção de um modelo experimental simulando condições de perfilagem de indução.** Belém, Universidade Federal do Pará. 54p. Tese(Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPA, 1990.

SARZENSKI, D.C. & TOLEDO, J.B. de. 1988. Correlação rocha-perfil em reservatórios heterogêneos. In: SEMINÁRIO TÉCNICO DE OPERAÇÕES GEOLÓGICAS, 2., Salvador, 1988. **Anais.** PETROBRÁS. v.1, p. 59-70.

SERRA, O. 1984. **Fundamentals of well-log interpretation.** Amsterdam, Elsevier. 432 p. (Developments in Petroleum Science, 15 A).

SERRA, O. & ANDREANI, M. 1991. **Thin beds - A guide to interpretation of thinly layred reservoirs.** Houston, SCHLUMBERGER. 82 p.

SINCLAIR, G. - 1948 . Theory of models of electromagnetic systems. **Proc. Inst. of radio eng.**, 36: 1364-1370.

SOUZA, N. P. R. de. 1992. **Detecção de fraturas no poço usando ferramenta de indução coplanar: modelamento analógico.** Belém, Universidade Federal do Pará. 67p. Tese(Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPA, 1992.

VIEIRA, A. L. da C. 1990 . **Modelamento de perfis de indução.** Belém, Universidade Federal do Pará. 55 p. Tese (Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós-graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPA, 1990.

WARD, S. H. 1967. The eletromagnetic methods. In: HANSEN, D. A.; HEINRICHS, W. E.; HOLMER, R. C.; MacDOUGALL, R. E.; RODGERS, G. R.; SUMNER, J. S.; WARD, S. H. **Mining Geophysics.** Tulsa, SEG. v.2, part. c, p. 224-368.