

# CONSTRUÇÃO DE UM MODELO EXPERIMENTAL SIMULANDO CONDIÇÕES DE PERFILAGEM DE INDUÇÃO

por

**PAULO SALVADORETTI**

Engenheiro de Minas (Universidade Federal do Rio Grande do Sul – 1987)

Tese submetida como requisito parcial ao grau de

**MESTRE EM CIÊNCIAS**

em

**GEOFÍSICA**

ao

Colegiado do Curso de Pós-Graduação em

Geofísica

da

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**

Banca Examinadora :

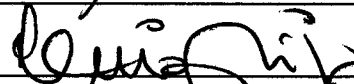
Dr. Om Prakash Verma(Orientador)



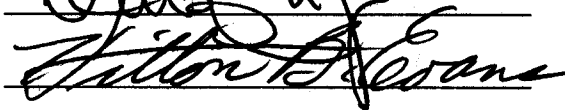
M.C. Nélio R. M. da Fonseca(Co-Orientador)



Dr. Luiz Rijo



Dr. Hilton B. Evans



Data da Homologação : 28/12/1990

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

- 1. MODELAMENTO ANALÓGICO EM GEOFÍSICA.**
- 2. PERFILAGEM DE INDUÇÃO DE POÇO. 3. DESENVOLVIMENTO INSTRUMENTAL.**

## ÍNDICE

Índice .....	i
Tabelas .....	iii
Lista de Ilustrações .....	iv
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vi
CAPÍTULO 1. Introdução .....	01
CAPÍTULO 2. Perfilagem Eletromagnética de Poços .....	03
2.1. Princípio de Medida e Equipamento .....	03
2.2. Condições de Aplicabilidade .....	04
2.3. Cálculo da Condutividade Elétrica do Meio a Partir da Voltagem Lida na Bobina Receptora .....	04
2.3.1. Teoria do Fator Geométrico .....	04
2.3.2. Soluções Analíticas Exatas .....	08
CAPÍTULO 3. Modelamento Analógico Eletromagnético .....	12
3.1. Fundamentos Teóricos .....	12
3.1.1. Aproximação para Grandes Comprimentos de Onda .....	14
3.1.2. Relações de Similitude .....	16
CAPÍTULO 4. Desenvolvimento do Conjunto Experimental .....	18
4.1. Aproximações Físicas .....	18
4.2. Descrição do Modelo Geológico .....	19
4.3. Instrumentação .....	20
4.3.1. Sistema de Transmissão .....	21

4.3.2. Sonda .....	22
4.3.3. Sistema de Recepção .....	23
4.3.4. Posicionamento da Sonda .....	25
CAPÍTULO 5. Processo de Medida .....	27
5.1. Calibrações .....	27
5.2. Medições .....	28
5.3. Testes de Funcionamento do Sistema de Modelamento .....	28
5.4. Perfis Demonstrativos .....	29
5.5. Erros na Simulação .....	29
CAPÍTULO 6. Análise de Resultados .....	32
6.1. Desempenho do Conjunto de Modelamento .....	33
CAPÍTULO 7. Conclusões e Sugestões .....	35
AGRADECIMENTOS .....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	38
APÊNDICE A .....	40
APÊNDICE B .....	43

## **TABELAS**

Tab.1 – Verificação do comportamento dipolar das bobinas transmissora e receptora .....	19
Tab.2 – Distribuição de condutividades no modelo geológico .....	29
Tab.3 – Condutividades aparentes medidas e calculadas .....	33
Tab.4 – Condutividades aparentes para o sistema real e modelo .....	33

## LISTA DE FIGURAS

Fig.1 – Bobina transmissora e receptora em meio homogêneo isotrópico .....	45
Fig.2 – Fator geométrico radial $G(r)$ da sonda de 2 bobinas ( $L$ =espaçamento entre bobinas) .....	46
Fig.3 – Fator geométrico vertical $G(z)$ da sonda de 2 bobinas .....	46
Fig.4a – Modelo experimental simulando situação geológica de poço .....	47
Fig.4b – Sistema de abastecimento das zonas lavada e de transição .....	47
Fig.4c – Seção transversal do modelo geológico de poço .....	47
Fig.4d – Situação equivalente ao modelo geológico de poço .....	48
Fig.5 – Diagrama de blocos do sistema elétrico .....	49
Fig.6 – Circuitos ressonantes de transmissão e recepção .....	50
Fig.7a – Vista lateral da sonda.(Dimensões em milímetros) .....	50
Fig.7b – Vista superior da sonda.(Dimensões em milímetros) .....	50
Fig.8a – Blindagem eletrostática dos cabos .....	51
Fig.8b – Blindagem eletrostática das bobinas .....	51
Fig.9 – Circuito compensador para cancelamento do campo primário .....	51
Fig.10 – Circuito do pré-amplificador .....	52
Fig.11 – Dispositivo para verificação do comportamento da sonda .....	53
Fig.12 – Perfis de $\sigma_a$ para 50,2 kHz, 70,2 kHz, 85,2 kHz e 100,2 kHz .....	54

# CONSTRUÇÃO DE UM MODELO EXPERIMENTAL SIMULANDO CONDIÇÕES DE PERFILAGEM DE INDUÇÃO

(TESE DE MESTRADO : Dez./90)

PAULO SALVADORETTI

Orientador : Dr. Om Prakash Verma

Co-Orientador : M.Sc. Nélío R. Medeiros da Fonseca

*Departamento de Geofísica – Centro de Geociências/UFPa*

*Caixa Postal 309 – Belém, PA, Brasil*

## RESUMO

A ferramenta de indução tem sido, desde 1949, largamente utilizada na prospecção de petróleo pois auxilia na localização de formações que contém hidrocarbonetos.

Ainda existem, porém, várias restrições quanto ao uso deste equipamento. Camadas excessivamente finas, poços preenchidos com lamas muito condutivas e grandes diâmetros de invasão são exemplos de situações onde seu desempenho não é bom.

Para que se possa minimizar estas limitações é necessário o conhecimento da resposta da sonda diante de condições conhecidas. Isto pode ser feito via modelamento analógico e/ou através de modelamento numérico.

O presente trabalho consiste na montagem de um sistema de modelamento analógico capaz de simular o perfil de duas bobinas coaxiais frente a meios infinitos e camadas espessas invadidas.

O meio geológico é representado através de solução salina de diferentes condutividades. O fator de escala linear é igual a 20 e o equipamento executa medidas na faixa dos 50 kHz aos 100 kHz.

Este sistema será utilizado em futuros estudos envolvendo disposições de bobinas diferentes das normalmente utilizadas e em estudos de outros problemas encontrados na perfilagem de indução.

# CONSTRUCTION OF AN EXPERIMENTAL SET-UP SIMULATING INDUCTION LOGGING CONDITIONS

(MASTER THESIS : Dec./90)

PAULO SALVADORETTI

Adviser : Dr. Om Prakash Verma

Co-Adviser : M.Sc. Nélío R. Medeiros da Fonseca

*Departamento de Geofísica – Centro de Geociências/UFPa*

*Caixa Postal 309 – Belém, PA, Brazil*

## ABSTRACT

The induction well-logging tool has been widely used since 1949 in petroleum exploration because it helps in determining water saturation in potential hydrocarbon zones.

There are many restrictions in using this tool. Excessively thin beds, boreholes filled with conductive muds, high resistivity formations, and large invasion diameters are situations where induction log response is poor.

To minimize these limitations, it is necessary to know tool response in given conditions. This can be partially accomplished by scale modeling and/or digital modeling.

The present thesis describes the construction of an experimental analog model system designed to simulate the two coaxial coils induction tool in three different geological situations.

The geological medium is simulated by brine solution of different conductivities. The linear scale factor is twenty and the frequency range of the measuring system is 50 kHz to 100 kHz.

This system can be utilized in future research work with different coil arrangements from the ones currently being used by the service companies and also to study other problems encountered in induction logging.



## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Atualmente uma gama muito grande de ferramentas pode ser corrida em poços, medindo uma dezena de propriedades físicas como condutividade elétrica, vagarosidade de ondas mecânicas, radioatividade, etc.

Entre todas, a mais utilizada é a ferramenta de indução eletromagnética, através da qual pode-se inferir a condutividade elétrica( $\sigma$ ) das formações distribuídas radialmente ao poço. As primeiras sondas baseadas neste princípio foram desenvolvidas por volta de 1949 como meio de auxílio à prospecção de petróleo. Com a descoberta das relações de Archie (Archie, 1942), o perfil de indução pode ser usado na definição entre formações que contém ou não hidrocarbonetos.

A acuidade da estimativa de uma reserva de óleo depende em muito da precisão com que se obtém o parâmetro  $\sigma$ . Embora já se tenha evoluído bastante com relação aos primeiros perfis eletromagnéticos, ainda existem várias restrições ao seu uso, como quando se quer determinar a condutividade da zona virgem em camadas excessivamente finas, poços com lamas muito condutivas, ou grandes diâmetros de invasão (Serra, 1984). O desenvolvimento de sondas que minimizem estas restrições ocupa grande número de pesquisadores em muitas companhias do ramo. A resposta do perfil frente à situações geológicas complexas também é alvo de atenção de muitos especialistas. Desta forma, é necessário estudar a resposta de diferentes configurações de bobinas diante de condições conhecidas ou controladas, aprofundando o conhecimento e fornecendo subsídios à interpretação. Isto pode ser feito analiticamente, por modelamento digital, ou por modelamento analógico em escala reduzida.

Doll(1949) desenvolveu a Teoria do Fator Geométrico e, através de simplificações, calculou a resposta aproximada do perfil de indução de duas bobinas coaxiais em meios homogêneos infinitos, camadas infinitamente espessas invadidas e meios estratificados de grande extensão lateral, considerando sempre simetria radial das formações em torno do poço, meios isotrópicos, e baixas frequências. Esta teoria permitiu conhecer as condições ideais de funcionamento da ferramenta (Pirson, 1963; Schlumberger, 1972; Doll, 1949).

O avanço dos computadores possibilitou soluções numéricas completas das situações geo-

lógicas acima descritas a partir das equações de Maxwell (Moran & Kunz, 1962; Duesterhoeft, 1961). Além disso, com o passar dos anos, as ferramentas de poço foram sendo sofisticadas, acrescentando-se bobinas transmissoras e receptoras de forma a obter respostas focalizadas.

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

A aplicação de modelos em escala para poço é relativamente escassa. Um trabalho específico (Simpson et al, 1983) relata a simulação de um sistema de 6 bobinas para estudar a resposta de camadas inclinadas (*dipping beds*). O experimento foi desenvolvido dentro de tanques preenchidos com solução salina. A frequência de operação era de 1 MHz e o fator de escala 7,07. A unidade receptora estava acoplada a um sistema de aquisição e tratamento da dados, de forma a se obter a condutividade do meio, com correção de *skin-effect*.

O objetivo do presente trabalho é desenvolver um sistema de modelamento analógico para estudar a resposta do perfil de indução de duas bobinas coaxiais frente a geologias simples. Sua maior importância está em proporcionar condições para futuros estudos envolvendo arranjos de bobina não utilizados comercialmente. O conjunto está inicialmente preparado para operar nas frequências de 50 kHz a 100 kHz. O modelo geológico representa meios isotrópicos infinitos e camadas espessas com zonas lavada e invadida de condutividades variáveis.

O texto, após a introdução, apresenta no capítulo 2 os aspectos básicos de funcionamento e aplicabilidade do perfil de indução, juntamente com a teoria básica necessária ao cálculo da condutividade elétrica do meio (Teoria do Fator Geométrico e Soluções Analíticas Exatas). O capítulo 3 aborda sucintamente os fundamentos teóricos do modelamento em escala. No capítulo 4 é feito o detalhamento do conjunto experimental, dando ênfase à construção do sistema de modelamento. O capítulo 5 trata dos procedimentos de medida, além da apresentação de alguns perfis obtidos pelo conjunto. No capítulo 6 faz-se uma apreciação dos dados colhidos no modelo e uma avaliação do desempenho do sistema. As conclusões e sugestões aparecem no capítulo 7.

## CAPÍTULO 2

### PERFILAGEM ELETROMAGNÉTICA DE POÇOS

A utilização de ferramentas eletromagnéticas em poços destinados à prospecção de hidrocarbonetos é indicada quando a lama de perfuração é a base de óleo ou água doce, o que dificulta o contato galvânico entre eletrodos e formação. Como no perfil de indução este contato inexistente, o problema fica eliminado.

A base do funcionamento da sonda é a produção artificial de campos eletromagnéticos que induzem nos condutores das proximidades forças eletromotrizes. Essas forças eletromotrizes geram *eddy currents* (correntes secundárias) dando origem a campos eletromagnéticos secundários, que dependem da  $\sigma$  do meio, e se superpõe ao campo primário. Os campos resultantes são medidos e utilizados para se obter a condutividade das formações. Todo o fenômeno pode ser descrito a partir das equações de Maxwell.

A grande importância de se obter a condutividade da formação é que, correlacionando-a com informações de outros perfis, pode-se estimar a saturação em hidrocarbonetos de determinada litologia.

O perfil de indução é também aplicável no delineamento da geologia local, pois pode ser utilizado em correlações poço-a-poço com base nos contrastes de resistividade das formações.

A seguir, é dada uma visão global da ferramenta de indução, ressaltando seu princípio básico de funcionamento, as condições de aplicabilidade e o modo pela qual ela permite determinar a condutividade elétrica de um meio.

#### 2.1. Princípio de Medida e Equipamento

Os primeiros perfis de indução compreendiam duas bobinas coaxiais, uma transmissora e outra receptora, enroladas em torno de um mandril isolante e separadas por uma distância de aproximadamente 1 metro (40"). Uma corrente senoidal de frequência e amplitude constante é feita passar pela bobina transmissora, criando um campo magnético variável no meio que envolve a ferramenta originando correntes secundárias (*eddy currents*) que percorrem *loops* coaxiais ao eixo do poço. As correntes secundárias estão aproximadamente 90° fora de fase com a corrente do

transmissor, e induzem uma voltagem em torno de  $180^\circ$  fora de fase com a corrente do transmissor. Sua magnitude depende, também de forma aproximada, da condutividade elétrica da formação.

Posteriormente, arranjos com várias bobinas transmissoras e receptoras foram implementados de modo a minimizar os efeitos do poço, das camadas adjacentes, e da invasão pelo filtrado de lama.

## 2.2. Condições de Aplicabilidade

A finalidade do perfil de indução é a medida da condutividade da zona virgem. Conforme Landt et al(1977), esta ferramenta responde de modo satisfatório na faixa de condutividade que vai de 10 S/m a 0,001 S/m.

## 2.3. Cálculo da Condutividade Elétrica do Meio a Partir da Voltagem Lida na Bobina Receptora

A resposta do perfil de indução pode ser explicada, em primeira aproximação, pela Teoria do Fator Geométrico, desenvolvida por Doll(1949). A partir da década de 60, uma abordagem mais completa, levando em conta a propagação de ondas eletromagnéticas, surge por parte de vários pesquisadores (Duesterhoeft, 1961; Moran & Kunz, 1962; entre outros).

### 2.3.1. Teoria do Fator Geométrico

A Teoria do Fator Geométrico relaciona a voltagem induzida na bobina receptora, no caso do perfil de duas bobinas coaxiais, com a condutividade elétrica do meio. Os pressupostos básicos da teoria são: tempo de propagação e atenuação do campo magnético nulos, formações possuindo simetria radial em relação ao poço, bobinas comportando-se como pequenos dipolos magnéticos.

Seja uma bobina transmissora, possuindo corrente  $I = I_0 \sin wt$ , e outra receptora, imersas em um meio homogêneo isotrópico, possuindo momento de dipolo magnético  $M_t$  e  $M_r$ , respectivamente. Adotando o sistema de coordenadas cilíndricas, tem-se

$$M_t = In_t A_t \quad e \quad (1)$$

$$M_r = In_r A_r \quad , \quad (2)$$

onde

$n_t$ =número de espiras da bobina transmissora,

$n_r$ =número de espiras da bobina receptora,

$A_t$ =área da bobina transmissora e

$A_r$ =área da bobina receptora.

A componente em  $z$  (ver Fig. 1) do campo do dipolo é

$$H_z = \frac{2M_t}{r_t^3} (\cos^2 \psi_t - \frac{1}{2} \sin^2 \psi_t) . \quad (3)$$

A voltagem induzida em um *loop* elementar, pertencente ao meio, devido à variação temporal do fluxo magnético é

$$e = -\frac{d}{dt} \int \mu H_z dA . \quad (4)$$

Substituindo (3) em (4), obtém-se

$$e = \frac{-2w\mu\pi r^3 n_t A_t I_0 \cos wt}{(r^2 + (\frac{L}{2} - z)^2)^{\frac{3}{2}}} . \quad (5)$$

A corrente fluindo no *loop* elementar é

$$dI = \frac{\sigma dA}{2\pi r} e$$

ou

$$dI = \frac{-\sigma w \mu r^2 n_t A_t I_0 \cos wtdA}{(r^2 + (\frac{L}{2} - z)^2)^{\frac{3}{2}}} . \quad (6)$$

Usando a lei de Ampère, pode-se encontrar o campo magnético devido a esta corrente

$$dH_r = \frac{2\pi r dI}{r_r^2} \sin \psi_r = \frac{-2\pi w \mu r n_t A_t I_0 \cos wtdA}{(r^2 + (\frac{L}{2} - z)^2)^{\frac{3}{2}} (r^2 + (\frac{L}{2} + z)^2)^{\frac{3}{2}}} . \quad (7)$$

A voltagem na bobina receptora ocasionada por este campo magnético é

$$de_r = -\mu n_r A_r \frac{dH_r}{dt} = \frac{-2\pi\sigma w^2 \mu^2 r^3 n_t n_r A_t A_r I_0 \sin wtdA}{(r^2 + (\frac{L}{2} - z)^2)^{\frac{3}{2}} (r^2 + (\frac{L}{2} + z)^2)^{\frac{3}{2}}} . \quad (8)$$

A voltagem total lida na bobina receptora devido a estas correntes secundárias é encontrada integrando a contribuição de cada *loop* em todo o espaço. Ou seja

$$-V_R = \int de_r = \int_A \frac{2\pi\sigma w^2 \mu^2 r^3 n_t n_r A_t A_r I_0 \sin wtdA}{(r^2 + (\frac{L}{2} - z)^2)^{\frac{3}{2}} (r^2 + (\frac{L}{2} + z)^2)^{\frac{3}{2}}} . \quad (9)$$

A integral acima pode ser rearranjada da seguinte forma

$$-V_R = K \left( \int_A g dA \right) \sigma , \quad (10)$$

onde

$$K = \frac{4\pi w^2 \mu^2 n_t n_r A_t A_r I}{L} , \quad (11)$$

$$g = \frac{L}{2} \frac{r^3}{(r^2 + (\frac{L}{2} - z)^2)^{\frac{3}{2}} (r^2 + (\frac{L}{2} + z)^2)^{\frac{3}{2}}} \quad e \quad (12)$$

$$dA = dr dz . \quad (13)$$

A variável  $r$  varia de 0 a  $+\infty$  e a variável  $z$  de  $-\infty$  a  $+\infty$ , sempre que desejar-se obter a contribuição de todo o espaço.

$K$  é chamada constante da sonda, e  $g$  é o fator geométrico, que pondera a contribuição de um determinado *loop* coaxial ao poço para a voltagem na bobina receptora de acordo com sua posição relativa às duas bobinas.

Pode-se estender a equação (10) para o caso de zonas cilíndricas coaxiais ao eixo do poço, de diferentes condutividades, simulando o poço, zona lavada, invadida, etc.

$$-V_R = K \left( \sigma_A \int \int_A g dr dz + \sigma_B \int \int_B g dr dz + \dots \right) , \quad (14)$$

onde A, B,... são estas zonas coaxiais, e  $\sigma_A, \sigma_B, \dots$  suas respectivas condutividades.

Chamando  $G_i = \int \int_i g dr dz$ , tem-se

$$-V_R = K(\sigma_A G_A + \sigma_B G_B + \dots) , \quad (15)$$

onde  $G_A, G_B, \dots$  são os fatores geométricos integrados de zonas A, B,  $\dots$ . Suas magnitudes dependem das dimensões e posições das respectivas zonas, e representam a fração segundo a qual cada zona contribui para o sinal total, assumindo condutividade uniforme dentro de cada zona.

É possível demonstrar-se que

$$G_A + G_B + \dots = 1 . \quad (16)$$

Obviamente, o  $G_i$  de um meio homogêneo infinito também é unitário.

O perfil de indução é a medida  $-V_R/K$ , que em primeira aproximação fornece a condutividade aparente( $\sigma_a$ ) da formação, ou seja

$$\sigma_a = \frac{-V_R}{K} = \sigma_A G_A + \sigma_B G_B + \dots . \quad (17)$$

Usando a Teoria do Fator Geométrico para o caso do meio homogêneo isotrópico, como  $G_i=1$ , o resultado do perfil de indução é a condutividade elétrica do meio, o que pode ser visto diretamente em (10)

$$\frac{-V_R}{K} = \int_A g dA \sigma = \sigma . \quad (18)$$

É interessante observar o comportamento da função  $g$  no sentido de se saber quais *loops* relativamente às bobinas transmissora e receptora influenciam mais na resposta do perfil de 2 bobinas. Isto pode ser feito integrando  $g$  em relação a  $z$  entre os limites  $-\infty < z < +\infty$ . O resultado desta integração é a função  $G(r)$ , também chamada fator geométrico radial, dada por

$$G(r) = \int_{-\infty}^{+\infty} g dz . \quad (19)$$

Como  $G_i = \int_a^b G(r) dr$ , onde  $a$  e  $b$  são limites quaisquer em  $r$ , nos valores de  $r$  onde  $G(r)$  for maior estará a máxima contribuição para  $G_i$ . Encontrar tais valores de  $r$ , em termos práticos, equivale a saber de que distância radialmente ao poço vem a maior contribuição para o sinal recebido, considerando uma camada infinitamente espessa. Analiticamente,  $G(r)$  é expressa

em termos de funções elípticas (Doll, 1949) e o gráfico  $G(r)$  versus  $r$  é apresentado na Fig. 2. Segundo Serra(1984), a maior parcela do sinal vem da distância radial  $L/4$  até  $L$ , na sonda de 2 bobinas. Nas sondas focalizadas, o pico ocorre em distâncias maiores.

Raciocinando analogamente, a integração de  $g$  em relação a  $r$  entre os limites  $0 \leq r \leq +\infty$  fornece a função  $G(z)$ , chamada fator geométrico vertical, definida da seguinte maneira

$$G(z) = \int_0^{\infty} g dr . \quad (20)$$

Analiticamente,  $G(z)$  é dada por

$$G(z) = 1/(2L) ; \text{ quando } -L/2 < z < L/2 \quad \text{e}$$

$$G(z) = L/(8z^2) ; \text{ quando } z < -L/2 \text{ ou } z > L/2.$$

Os dois resultados acima mostram que a maior contribuição para a resposta vem dos *loops* situados entre as duas bobinas, como ilustra a Fig. 3.

A Teoria do Fator Geométrico foi utilizada durante a década de 50 com grande aceitação. Algumas limitações, porém, prejudicavam seus resultados, especialmente em formações de alta condutividade ( $\sigma > 1 \text{ S/m}$ ). A teoria proposta por Doll negligenciava a interação entre *loops* próximos, não admitia perdas ôhmicas quando do fluxo de corrente na formação e supunha a propagação instantânea do campo eletromagnético. Estudos posteriores mostrariam que os 3 fenômenos reduzem a voltagem na bobina receptora, relativamente ao valor esperado pela Teoria do Fator Geométrico.

### 2.3.2. Soluções Analíticas Exatas

Moran & Kunz(1962), analisando o comportamento do campo eletromagnético na sonda de indução, obtiveram expressões exatas para o perfil de 2 bobinas em 4 situações: meio homogêneo; camada infinitamente espessa e invadida; 2 camadas adjacentes não invadidas; camada fina intercalada entre meio homogêneo. Em todos os casos, a voltagem recebida era menor do que a predita pela Teoria do Fator Geométrico. A esta redução chamaram *skin effect*.

Considere um meio homogêneo, isotrópico e linear, onde aparecem uma bobina transmissora, alimentada por uma corrente senoidal, e outra receptora.

Se ambas comportam-se como pequenos dipolos, a voltagem lida na bobina receptora será:



$$V = \frac{2TR(\pi a^2)^2}{4\pi} I i w \mu (1 - i k L) \frac{e^{i k L}}{L^3} , \quad (21)$$

onde

$i$  = operador complexo  $\sqrt{-1}$ ,

$k = (i w \mu \sigma)^{\frac{1}{2}}$ ,

$T$  = número de espiras da bobina transmissora,

$R$  = número de espiras da bobina receptora,

$a$  = raio das bobinas,

$I$  = corrente na bobina transmissora,

$w$  = frequência angular da corrente,

$\mu$  = permeabilidade magnética do meio e

$L$  = distância entre bobinas.

A expressão acima pode ser separada em  $V_R$  (voltagem em fase com  $I$ ) e  $V_X$  (voltagem defasada de  $90^\circ$  em relação a  $I$ )

$$-V_R = K \sigma \left( 1 - \frac{2}{3} \frac{L}{\delta} + \frac{2}{15} \frac{L^3}{\delta^3} - \dots \right) \quad (22)$$

e

$$V_X = K \sigma \frac{\delta^2}{L^2} \left( 1 - \frac{2}{3} \frac{L^3}{\delta^3} + \dots \right) , \quad (23)$$

sendo

$$K = \frac{(w \mu)^2 (\pi a^2)^2 T R I}{4 \pi L}$$

e

$$\delta = \frac{1}{(\pi f \mu \sigma)^{\frac{1}{2}}} \quad (24)$$

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

Observando a equação (22), vê-se que o primeiro termo da série é o valor da voltagem recebida pela bobina receptora em um meio homogêneo isotrópico segundo a Teoria do Fator Geométrico. Os demais termos são correções no valor predito pela Teoria do Fator Geométrico devido a atenuação e troca de fase sofrida pelo campo eletromagnético durante a propagação (*skin effect*).

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

Olhando para a equação (22), pode-se escrever

$$-\frac{V_R}{K} = \sigma_a = \sigma \left( 1 - \frac{2L}{3\delta} + \frac{2L^3}{15\delta^3} - \dots \right) \quad (25)$$

No âmbito da prospecção de poço encontra-se, normalmente,  $\frac{L}{\delta} < 1$ . Logo,  $\sigma_a < \sigma$ .

Pode-se então definir o *skin effect signal* para sondas de duas bobinas como sendo

$$\sigma_s = \sigma - \sigma_a \cong \frac{2L}{3\delta} \sigma \quad (26)$$

desprezando os termos de ordem mais alta na série de potências. Quando a condutividade do meio é muito baixa, o *skin effect* tende a zero.

Fazendo agora o quociente entre as equações (22) e (23)

$$-\frac{V_R}{V_X} = \frac{\left( 1 - \frac{2L}{3\delta} + \frac{2L^3}{15\delta^3} \dots \right)}{\frac{\delta^2}{L^2} \left( 1 - \frac{2L^3}{3\delta^3} + \dots \right)} \quad (27)$$

Impondo a condição  $\frac{L}{\delta} \ll 1$ , tem-se  $-\frac{V_R}{V_X} \ll 1$ , o que dá uma idéia dos problemas a serem enfrentados na separação dos dois sinais. Quanto menor este quociente, maiores serão as dificuldades em termos de instrumentação.

Manipulando a equação (25), obtém-se a relação entre a condutividade obtida a partir da Teoria do Fator Geométrico e a condutividade real, para um meio homogêneo isotrópico.

$$\frac{\sigma_a}{\sigma} = 1 - \frac{2}{3} \frac{L}{\delta} + \frac{2}{15} \frac{L^3}{\delta^3} - \dots$$

ou

$$\frac{\sigma_a}{\sigma} = 1 - \frac{2}{3} \Delta + \frac{2}{15} \Delta^3 - \dots, \quad (28)$$

onde

$$\Delta = L \left( \frac{\mu \omega \sigma}{2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (29)$$

Esta expressão é a obtida por Duesterhoeft(1961) para o meio homogêneo isotrópico.

Um procedimento numérico bastante simples é descrito em Simpson et al(1983), com vistas a obtenção de  $\sigma$  quando  $\sigma_a$  é conhecido, para meios homogêneos isotrópicos.

Um grande esforço tem sido feito pelos pesquisadores no sentido de melhorar o desempenho da sonda de indução no que se refere às suas limitações básicas. O Apêndice A trata brevemente da evolução deste equipamento, destacando as inovações que progressivamente foram surgindo.

## CAPÍTULO 3

### MODELAMENTO ANALÓGICO ELETROMAGNÉTICO

A técnica de modelamento em escala é bastante conhecida e usada nos métodos eletromagnéticos para prospecção de minérios, para os quais foram deduzidas as condições de aplicabilidade, de forma que um sistema modelo pode reproduzir acuradamente a configuração geométrica das linhas de força do sistema real. Todavia, precauções devem ser tomadas quanto à presença no sistema modelo de materiais de comportamento não linear, como os ferromagnéticos, onde a permeabilidade magnética depende do campo local, ou como cristais de pirita e a vizinhança entre condutores iônicos e metálicos, onde a corrente de condução também não é linear.

Modelos em escala reduzida são uma técnica eficiente para estudar a resposta de sondas de poço. Devido ao tamanho e profundidade de investigação de alguns equipamentos, é muito difícil e caro construir ambientes em escala natural. A técnica de modelagem oferece benefícios de duas maneiras. Primeiro, pode ser usada para verificar cálculos de resposta teórica. Segundo, medidas podem ser feitas em situações onde os modelos teóricos são de difícil aplicação, fornecendo assim dados de auxílio à interpretação (Shattuck et al, 1987) e a outros estudos.

No caso específico dos perfis de indução, dada a dificuldade de avaliar os efeitos da geometria do poço ou de camadas inclinadas (*dipping beds*) via análise exata, modelos análogos têm sido utilizados. De fato, a falta de simetria cilíndrica torna o tratamento teórico do problema bastante complicado.

#### 3.1. Fundamentos Teóricos

A teoria do modelamento analógico eletromagnético é tratada, a partir das equações de Maxwell, por Grant & West (1965) e Ward (1967), entre outros.

No presente caso, admite-se que o campo eletromagnético propaga-se em meios isotrópicos lineares, sem acúmulo apreciável de carga elétrica durante o fluxo e ausência de fontes ou sorvedouros de corrente. Ainda, a intensidade do campo eletromagnético varia com o tempo na forma  $e^{i\omega t}$ .

Desta maneira, pode-se escrever as equações de Maxwell de forma mais simplificada, no

caso as equações de onda para  $\vec{E}$  e  $\vec{H}$

$$\nabla^2 \vec{E} - K^2 \vec{E} = 0 \quad e \quad (30)$$

$$\nabla^2 \vec{H} - K^2 \vec{H} = 0 \quad , \quad (31)$$

onde

$$K^2 = iw\mu(iw\epsilon + \sigma) \quad e \quad (32)$$

$\vec{E}$ =vetor campo elétrico,

$\vec{H}$ =vetor campo magnético,

$w$ =frequência angular,

$\mu$ =permeabilidade magnética do meio,

$\epsilon$ =permissividade dielétrica do meio,

$\sigma$ =condutividade elétrica do meio.

A constante de propagação  $K$  é a raiz quadrada de  $K^2$ , cujas partes real e imaginária são positivas

$$K = \alpha + i\beta \quad (33)$$

sendo

$$\alpha = w \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{w\epsilon}\right)^2} - 1 \right)} \quad e \quad (34)$$

$$\beta = w \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{w\epsilon}\right)^2} + 1 \right)} \quad . \quad (35)$$

O parâmetro  $\alpha$  é chamado fator de atenuação, e  $\beta$  é denominado de constante de deslocamento de fase.

Supondo agora que os vetores  $\vec{E}$  e  $\vec{H}$  dependam apenas de uma coordenada,  $z$  por exemplo, as equações (30) e (31) tomam a forma

$$\frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial z^2} = K^2 \vec{H}$$

e

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} = K^2 \vec{E} .$$

As soluções destas equações diferenciais têm a forma

$$\vec{H} = H_0 e^{-Kz} e^{i\omega t} \vec{a}_H \quad (36)$$

e

$$\vec{E} = E_0 e^{-Kz} e^{i\omega t} \vec{a}_E , \quad (37)$$

onde  $\vec{a}_E$  e  $\vec{a}_H$  possuem direções fixas e são perpendiculares à direção de propagação  $z$ .

### 3.1.1. Aproximação para Grandes Comprimentos de Onda

De acordo com a frequência e o ambiente em consideração, o parâmetro  $K^2$  assume diferentes valores, ocasionando as simplificações a seguir.

a)  $K^2$  em meios onde  $\sigma \gg w\epsilon$

Supondo:

$$\epsilon \cong 80\epsilon_0 = 7 \times 10^{-10} \text{ F/m (presença dominante de água),}$$

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m (sem presença de materiais ferromagnéticos),}$$

$$\sigma = 1 \text{ S/m,}$$

$$w = 2\pi \times 10^5 \text{ rad/seg e}$$

$$K^2 = iw\mu(iw\epsilon + \sigma), \text{ onde } iw\mu\sigma = 0,8 \text{ e } w^2\mu\epsilon = 3,5 \times 10^{-4}.$$

Ou seja

$$K^2 \cong i\mu w\sigma . \quad (38)$$

Por outro lado, fazendo  $\sigma \gg w\epsilon$  nas eq. (34) e (35), obtém-se

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{w\mu\sigma}{2}}$$

e, de acordo com a eq. (33)

$$K = \sqrt{\frac{\mu w \sigma}{2}} + \sqrt{\frac{\mu w \sigma}{2}} i .$$

Da equação (37)

$$\vec{E} = E_0 e^{-Kz} e^{i\omega t} \vec{a}_E \quad \text{ou}$$

$$\vec{E} = E_0 e^{-(\alpha+\beta i)z} e^{i\omega t} \vec{a}_E = E_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} \vec{a}_E .$$

O fator  $e^{-\alpha z}$  representa uma atenuação sofrida por  $\vec{E}$  durante sua passagem pelo meio.

O valor  $1/\alpha$  é o *skin depth*( $\delta$ ), ou profundidade de penetração da onda no meio.

b)  $K^2$  em meios resistivos

$$\epsilon \cong 80\epsilon_0 = 7 \times 10^{-10} \text{ F/m},$$

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m},$$

$$\sigma = 10^{-3} \text{ S/m},$$

$$w = 2\pi \times 10^5 \text{ rad/seg e}$$

$$K^2 = iw\mu(iw\epsilon + \sigma), \text{ onde } iw\mu\sigma = 8 \times 10^{-4} \text{ e } w^2\mu\epsilon = 3,5 \times 10^{-4}.$$

Neste caso

$$K^2 \cong 0 .$$

Nos meios onde  $\sigma \gg w\epsilon$ , desprezar  $w\epsilon$  significa que as correntes de deslocamento são muito pequenas, e é válida a chamada aproximação quase-estática para o campo eletromagnético.

Se o meio é resistivo, as equações de onda reduzem-se as equações de Laplace

$$\nabla^2 \vec{E} = 0$$

e

$$\nabla^2 \vec{H} = 0 .$$

### 3.1.2. Relações de Similitude

Sejam os pontos  $P(x, y, z)$  do sistema real e  $P(x', y', z')$  do sistema modelo, cujas coordenadas relacionam-se como abaixo:

$$x = px', y = py', z = pz'$$

sendo  $p$  = fator de escala linear.

Associando também  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  e  $t$  de ambos os sistemas

$$\vec{E}(x, y, z, t) = a\vec{E}'(x', y', z', t') ,$$

$$\vec{H}(x, y, z, t) = b\vec{H}'(x', y', z', t') e$$

$$t = gt' ,$$

onde  $a$ ,  $b$  e  $g$  são os fatores de escala para o campo elétrico, magnético e tempo, respectivamente.

Da última relação, conclui-se que

$$w = \frac{w'}{g} .$$

A comparação das equações de onda para os dois sistemas fornece uma relação entre os fatores de escala que uma vez satisfeita garante distribuições idênticas de linhas de força para o sistema modelo e o sistema real.

Começando com a equação do campo elétrico, obtém-se

$$\nabla^2 \vec{E} - K^2 \vec{E} = 0 \quad e$$

$$\nabla'^2 \vec{E}' - K'^2 \vec{E}' = 0 , \tag{39}$$

onde  $\nabla'^2$  é o operador Laplaciano referido às coordenadas  $(x', y', z')$ .

A equação (39) pode ser reescrita a partir dos fatores de escala, resultando



$$p^2 \nabla^2 \frac{\vec{E}}{a} - K'^2 \frac{\vec{E}}{a} = 0 .$$

Uma igualdade entre (30) e (39), garante uma equivalência entre os dois sistemas. Assim

$$K^2 = \frac{K'^2}{p^2} ; e \text{ então } K' = pK . \quad (40)$$

Introduzindo a aproximação quase-estática dada na equação (38) para o sistema real obtém-se

$$K^2 = iw\mu\sigma$$

e para o sistema modelo

$$K'^2 = iw'\mu'\sigma' . \quad (41)$$

Substituindo (41) e (38) em (40)

$$w'\mu'\sigma' = p^2 w\mu\sigma . \quad (42)$$

O fator de escala  $p$  é igual a  $\frac{R}{R'}$ , onde

$R$  = dimensão linear característica no sistema real e

$R'$  = dimensão linear correspondente no sistema modelo.

A equação (42) é chamada equação de similitude entre os sistemas real e modelo. Qualquer sistema real pode ser simulado em laboratório variando-se indiscriminadamente a frequência, condutividade elétrica e a dimensão linear do modelo de forma a satisfazer a equação de similitude. Com isto, contorna-se o problema de tamanho e propriedades dos materiais envolvidos na simulação. Normalmente, a permeabilidade magnética relativa dos materiais escolhidos é aproximadamente igual a do vácuo, resultando uma equação de similitude ainda mais simples, ou seja

$$w\sigma p^2 = w'\sigma' . \quad (43)$$

## CAPÍTULO 4

### DESENVOLVIMENTO DO CONJUNTO EXPERIMENTAL

Com o objetivo de simular perfis de indução de duas bobinas coaxiais, foram construídos um modelo geológico e um sistema elétrico para a execução das medidas. O valor  $p=20$  (fator de redução de escala) foi o que melhor se adaptou às necessidades de construção e à infra-estrutura existente.

#### 4.1. Aproximações Físicas

Os corpos de interesse na prospecção de petróleo são, normalmente, camadas sedimentares horizontalizadas ou sub-horizontalizadas. A invasão pelos fluidos de perfuração nestes leitos produz geometrias que se assemelham a cilindros coaxiais ao poço, cujas dimensões dependem da espessura e permeabilidade dos extratos.

O modelo experimental construído possibilita observar o desempenho da sonda em situações similares às descritas acima, ou seja, em meios homogêneos isotrópicos e em camadas espessas onde houve a penetração do filtrado de lama, originando as zonas lavada e invadida.

Inicialmente, a sonda está preparada para simular a configuração de duas bobinas coaxiais apenas. Desta forma, uma camada a ser considerada infinitamente espessa possuirá, no modelo geológico, um comprimento igual a  $13L$  paralelamente ao poço e  $5L$  radialmente ao mesmo, onde  $L$  é o espaçamento entre bobinas. A validade destas aproximações é analisada mais detalhadamente no Apêndice B, fazendo-se uso da Teoria do Fator Geométrico, além de uma estimativa da redução do sinal secundário devido à interposição das canalizações de PVC, nas quais não há aparecimento de correntes secundárias devido à baixa condutividade do material.

As zonas lavada, invadida e o poço, possuem diâmetro igual a  $1L$ ,  $2L$  e  $0,28L$ , respectivamente.

As bobinas estão distanciadas 5 cm de centro a centro ( $L = 5 \times 10^{-2} m$ ) e possuem diâmetro de 1,2 cm ( $L/4,2$ ). Como é desejável que elas se comportem como pequenos dipolos e a distância que as separa é razoavelmente pequena, foram feitos testes para comprovar o esperado decaimento da amplitude do campo primário com o inverso do cubo do espaçamento. Os resultados foram

satisfatórios e aparecem na Tab. 1, onde ERRO(%) é dado por

$$ERRO(\%) = \frac{l_2^3/l_1^3 - V_1/V_2}{l_2^3/l_1^3} 100\%$$

sendo,

$V_1$ =voltagem devido ao campo primário lida na bobina receptora quando o espaçamento é  $l_1$  e

$V_2$ =voltagem devido ao campo primário lida na bobina receptora quando o espaçamento é  $l_2$ .

Tab.1. Verificação do comportamento dipolar das bobinas transmissora e receptora.

Dist. entre bobinas		$l_2^3/l_1^3$	$V_1/V_2$	ERRO(%)
$l_1$	$l_2$			
5cm	5,5cm	1,33	1,38	-3,76
5cm	6,0cm	1,73	1,71	1,16
5cm	6,5cm	2,20	2,22	-0,91
5cm	7,0cm	2,74	2,85	-4,07

O meio geológico será aproximado por soluções salinas de diferentes condutividades (de 1 S/m a 20 S/m). Para excitar a bobina transmissora foram usadas as frequências de 50,2 kHz, 70,2 kHz, 85,2 kHz e 100,2 kHz.

#### 4.2. Descrição do Modelo Geológico

O modelo geológico está montado em um tanque de fibra de vidro, de dimensões internas 0,6 m × 1,0 m × 2,6 m (altura, largura e comprimento, respectivamente). Seu interior foi dividido em 5 compartimentos estanques, no sentido perpendicular ao comprimento (ver Fig. 4a).

O primeiro e o quinto compartimentos ficam vazios e alojam as roldanas que direcionam a sonda durante a coleta de dados. Nos compartimentos 2 e 3 existem 3 tubulações de PVC concêntricas. A primeira tubulação, mais interna, simula o poço, onde a sonda move, efetuando as medidas. A região entre a primeira e segunda tubulações é preenchida com solução salina, de

forma a simular a zona lavada. O espaço entre a segunda e terceira tubulações, também preenchido com solução, representa a zona de transição. Externamente à terceira tubulação e até a parede do tanque de fibra de vidro tem-se a zona virgem. O tanque foi dimensionado de modo a confinar grande parte da resposta do arranjo de duas bobinas.

O quarto compartimento contém apenas a tubulação mais interna e serve para verificação de funcionamento do sistema elétrico e calibração da sonda.

As duas interfaces laterais entre os compartimentos dois-três e três-quatro são feitas de vidro de 5 mm de espessura. As restantes, entre os compartimentos um-dois e quatro-cinco, são de PVC de 10 mm de espessura. Toda a vedação dos compartimentos e tubulações foi feita com cola de silicone.

As regiões que representam as zonas lavada e de transição são abastecidas por solução salina através de mangueiras (Fig. 4b).

Atenção especial foi dada à colocação das mangueiras para que não fôsse aprisionada uma bolha de ar na parte superior dos canos. Este problema foi contornado fazendo-se entalhes na parte das mangueiras que ficam por dentro das canalizações, como é mostrado na Fig. 4c.

A Fig. 4d apresenta a situação equivalente, em termos de perfilagem de poço, ao modelo geológico construído.

A condutividade das soluções foi dosada com cloreto de amônia.

#### 4.3. Instrumentação

Os equipamentos estão organizados em 3 sistemas: de transmissão, a sonda, e de recepção.

Antes do detalhamento destes sistemas, vale a pena voltar à equação (27), através da qual pode-se estimar a relação  $-\frac{V_R}{V_X}$ . Este quociente permite conhecer a razão entre o campo secundário e o primário, dando uma idéia das dificuldades a serem superadas em instrumentação e dos cuidados a serem tomados para se detectar o sinal secundário, base para a obtenção da condutividade elétrica do meio.

No presente estudo,  $L$  e  $\mu$  são fixos, a frequência varia de 50 kHz a 100 kHz, e dadas as limitações em se obter grandes condutividades de soluções aquosas via adição de sais,  $\sigma$  deve ser

inferior a 20 S/m. Tomando os valores intermediários  $\sigma=2$  S/m,  $\mu=\mu_0=4\pi\times10^{-7}$  H/m,  $f=75$  kHz e  $L=5\times10^{-2}$  m, a equação (27) fornece  $-\frac{V_R}{V_X}=1,5\times10^{-3}$ . Esta é aproximadamente a razão entre as magnitudes do campo secundário e primário sobre a bobina receptora, mostrando que uma série de cuidados devem ser tomados com as blindagens eletrostáticas e no desacoplamento entre os sistemas de recepção e transmissão.

Na Fig. 5 é apresentado o diagrama de blocos do sistema elétrico.

Todos os equipamentos à exceção da sonda e do pré-amplificador foram colocados em ambiente isolado, longe do alcance dos vapores corrosivos desprendidos pelo líquido contido no tanque.

#### 4.3.1. Sistema de Transmissão

Consiste de um oscilador senoidal que alimenta diretamente a bobina transmissora  $T_X$ .

O oscilador utilizado é fabricado pela General Radio (USA), modelo GR-1316 e trabalha de 10 Hz a 110 kHz. Nesta faixa de frequências, a distorção harmônica é inferior a 0,2 %, e a potência máxima de saída é igual 1,6 watts. Além da transmissão e do circuito compensador, o oscilador fornece voltagem para as referências de fase e quadratura ( $1,25 \pm 0,2 V_{rms}$ ).

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

#### 4.3.2. Sonda

A construção da sonda foi uma tarefa bastante demorada, embora o objetivo fosse simular o perfil de duas bobinas apenas.

Como normalmente ocorre nos equipamentos de prospecção geofísica, o sensor é a parte mais crítica no funcionamento do sistema como um todo e devem ser tomados vários cuidados para que trabalhe com a precisão e estabilidade requeridas.

Nas primeiras versões da sonda, a bobina transmissora fazia parte de um circuito LC série ressonante agudo (Fig. 6), onde o capacitor estava localizado no próprio mandril, e era selecionado segundo a frequência do oscilador. Com isto, obtinha-se correntes da ordem de 800 ou 900 mA a partir de pequenas voltagens do sistema de energização. A bobina receptora estava também associada a um circuito LC paralelo ressonante agudo, sendo que a diferença de potencial gerada

devido à indução era tomada por um pequeno amplificador de ganho unitário (localizado na sonda) cuja tarefa era baixar a impedância do circuito para  $75 \Omega$ , fazendo o casamento com a linha de transmissão de 4 m de cabo coaxial até o pré-amplificador instalado próximo ao tanque de solução salina.

Apesar das vantagens proporcionadas pela sintonia aguda, como o alto nível de sinal recebido para baixas voltagens no oscilador e a grande rejeição de sinais em frequências diferentes da ressonante, não foi possível operar de modo satisfatório com este modelo. Pelo menos dois importantes motivos podem ser destacados. O primeiro seria a grande sensibilidade à pequenas flexões e atritos externos sofridos pela sonda, que ocasionavam alterações na geometria das bobinas ou das blindagens e resultavam em grandes variações no sinal. O segundo motivo diz respeito às blindagens eletrostáticas dos circuitos sintonizados que não eram suficientemente eficazes e permitiam acoplamento capacitivo entre a transmissão e recepção quando o mandril penetrava em solução salina, devendo-se por isso baixar as impedâncias dos circuitos para minimizar este efeito.

Na sonda definitiva decidiu-se amortecer o circuito sintonizado receptor e dessintonizar o transmissor. O mandril, apresentado na Fig. 7, onde as bobinas foram enroladas, é composto de acrílico, possui 1,4 cm de diâmetro e comprimento total de 26,8 cm. Há uma rosca central que permite separá-lo em duas partes independentes. Através deste expediente, pode-se aumentar o espaçamento entre as bobinas, bastando adicionar um novo segmento de acrílico.

No mandril foram feitos dois sulcos axiais que conduzem a fiação da transmissão e recepção em direções opostas. Isto minimiza interações indutivas e capacitivas entre os dois sistemas.

A bobina transmissora, enrolada com 60 espiras de fio esmaltado bitola A.W.G. nº 29, tem raio médio de 0,6 cm e indutância  $37,1 \mu\text{H}$ .

A bobina receptora, também enrolada com 60 espiras de fio A.W.G. 29, possui raio médio 0,6cm e indutância  $35,3 \mu\text{H}$ .

Devido à pequena distância que separa as duas bobinas, há um relativamente grande acoplamento capacitivo envolvido. Torna-se necessário uma blindagem eletrostática eficiente em torno das bobinas e dos cabos condutores, bem como o isolamento do receptor através de um sistema amplificador com entrada diferencial.

A blindagem eletrostática das bobinas foi feita segundo o esquema das Figs. 8a e 8b. Uma fita de papel alumínio foi colocada sobre o mandril antes da bobina ser enrolada, formando um anel. Esta fita deve ser posicionada de tal maneira 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.

Os cabos condutores sobre a sonda são trançados e também envolvidos por uma blindagem eletrostática, que por sua vez é unida à blindagem da bobina.

A blindagem da bobina transmissora e de seus cabos condutores é conectada à extremidade de potencial mais baixo de  $T_X$ , que é o condutor de retorno ao oscilador.

Na bobina receptora, a blindagem está conectada ao ponto de aterramento do pré-amplificador.

O ponto de aterramento das blindagens eletrostáticas tem grande influência no sinal recebido, e foram necessários muitos testes até a definição da situação ideal.

Um detalhe importante é que a bobina transmissora trabalha praticamente sem aquecimento, o que proporciona maior estabilidade ao sistema.

#### 4.3.3. Sistema de Recepção

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

##### a) Bobina receptora

Os detalhes relativos à bobina  $R_X$  podem ser vistos na seção onde está descrita a sonda.

##### b) Compensador

Conforme o cálculo teórico, o nível do sinal secundário é da ordem de  $10^{-3}$  do campo primário. Por esta razão construiu-se um circuito compensador para cancelamento do campo primário (Fig. 9). Nele, o sinal senoidal proveniente do oscilador pode ter sua fase e amplitude ajustadas. O controle da fase é feito por 2 potenciômetros de 10 k $\Omega$  e 100  $\Omega$ , para ajuste grosso e fino, respectivamente, o mesmo ocorrendo com o controle de amplitude.

Com o compensador consegue-se produzir um sinal de mesma fase e mesma amplitude

que a voltagem gerada na bobina receptora devido ao campo primário. No pré-amplificador, o sinal do compensador é comparado com o sinal recebido pela bobina receptora devido ao campo primário, de forma que a voltagem resultante seja nula.

#### c) Pré-amplificador

Foi desenvolvido especialmente para o sistema com o objetivo de: ampliar o sinal da bobina receptora, casar a impedância do circuito de entrada com a linha que acopla o sinal ao amplificador Tektronix e cancelar o campo primário usando o sinal enviado pelo compensador. O pré-amplificador (Fig. 10) funciona em modo diferencial, com ganho de 20 dB (10 vezes), rejeição em modo comum estimada em 120 dB, e impedância de saída inferior a 10  $\Omega$ . A impedância de entrada está em torno de 56  $\Omega$ . O nível de ruído é de aproximadamente 1  $\mu$ V pico-a-pico, e a alimentação é feita por duas baterias de 9 V, para garantir melhor isolamento do sistema.

O baixo valor na impedância de entrada minimiza a indução de sinais provenientes de campos espúrios e/ou *loops* de aterramento. Também torna desprezíveis as variações de capacitância devido às deformações do cabo coaxial de 3,5m de comprimento que acopla a sonda ao pré-amplificador, provocadas pela movimentação durante a perfilagem.

A rejeição em modo comum de 120 dB só foi possível obter com o uso de um transformador de acoplamento na entrada do circuito pré-amplificador. Esta alta rejeição é necessária para evitar acoplamentos capacitivos que se formam entre as bobinas transmissora e receptora através da solução salina. O grande isolamento conseguido com o transformador impede ainda a formação de *loops* de aterramento no circuito de entrada. A relação de espiras entre o primário e o secundário é unitária.

O circuito de entrada é sintonizado para 4 frequências nominais de trabalho (50 kHz, 70 kHz, 85 kHz e 100 kHz) através de capacitores selecionados pela chave correspondente. Os capacitores vão de 25 nF, para a frequência de 100 kHz, até 100 nF, para 50 kHz. O ganho em voltagem obtido com a sintonia é de aproximadamente 4 vezes.

#### d) Amplificador

Do pré-amplificador o sinal é acoplado ao amplificador Tektronix AM-502, que lhe fornece um ganho de até 500 vezes, seguindo para um atenuador Tektronix, modelo 2701.



#### e) Atenuador

O atenuador Tektronix 2701 tem como função reduzir o sinal primário antes da execução do cancelamento, de modo a se calibrarem as amplitudes dos sinais de referência em fase e quadratura relativamente ao campo primário. O atenuador pode ser posicionado nos níveis de 0 dB a 79 dB sem que haja giro de fase apreciável no sinal, permitindo trabalhar com o analisador de fase em ganho fixo. Sua presença no sistema de recepção é necessária pois, devido ao sinal primário ser da ordem de 60 dB maior que o secundário, quando a sensibilidade necessária para o registro do campo secundário fosse atingida, o primário já teria saturado o circuito de entrada do analisador de fase. Da mesma forma, o ganho do detector de fase não poderia ser aumentado gradualmente após a execução do cancelamento pois observou-se que a mudança do ganho é acompanhada de mudança de fase do sinal, desfazendo-se a calibração inicial das amplitudes dos sinais de referência.

#### f) Detector de fase

O detector de fase, modelo GR-1238, fabricado pela General Radio (USA), foi adaptado para o sistema. Esse detector responde a quaisquer componentes ortogonais do sinal de entrada relativamente às componentes de referência enviadas pelo oscilador, que calibradas de modo a serem iguais a f.e.m. produzida pelo campo primário e possibilitam detectar as componentes apropriadas do sinal desconhecido.

#### g) Registrador gráfico

Os resultados obtidos no detector seguem para um registrador gráfico de dois canais, modelo RB 102, da ECB do Brasil. O registro dos resultados pode ser realizado em 24 diferentes velocidades numa carta de largura 0.25 m. O registrador conta ainda com um marcador de eventos que permite posicionar o sistema de bobinas com respeito às leituras obtidas.

#### 4.3.4. Posicionamento da Sonda

A movimentação da sonda é feita através de um motor de passo localizado numa das extremidades do tanque. O motor traciona um fio de nylon ao qual a sonda está atracada. A velocidade de perfilagem é variável e o valor adotado está em torno de 0,5 m/minuto, levando-se em conta que não é aconselhável grande rapidez na aquisição dos dados, pois a inércia do sistema de recepção pode ocasionar leituras errôneas, ao mesmo tempo em que se as velocidades forem muito

baixas há aparecimento de *drifts* indesejáveis.

O motor de passo é acionado do interior da sala de controle. Em sua roldana de tração foi instalado um pequeno ímã que aciona um read-relé uma vez a cada revolução. O read-relé está acoplado ao marcador de eventos do registrador gráfico, permitindo desta forma conhecer-se a posição das bobinas no modelo geológico.

Como praticamente não há escorregamento do fio que prende a sonda sobre a roldana tratora do motor, foi possível determinar com boa precisão a distância percorrida pela sonda no modelo geológico para cada intervalo assinalado pelo marcador de eventos. O valor medido foi de 10,5 cm/intervalo. Deste modo, a sonda é colocada manualmente na posição inicial de forma que quando o centro das bobinas passar pela primeira interface tem-se o primeiro pico no registrador. A partir desta marca, basta adicionar 10,5 cm em cada intervalo subsequente para conhecer a posição da sonda relativamente àquela interface. É possível a colocação de mais ímãs sobre a roldana tratora caso deseje-se saber mais precisamente a localização das bobinas.

## CAPÍTULO 5

### PROCESSO DE MEDIDA

#### 5.1. Calibrações

Primeiramente, a sonda deve ser posicionada de tal forma que as bobinas permaneçam no ar, o mais distante possível da primeira interface. O sistema elétrico deve estar ligado a um tempo suficiente para que atinja a estabilidade. Posiciona-se, então, o atenuador em 40 dB (atenuação de 100 vezes) e ajusta-se o nível de voltagem do oscilador GR-1316, assim como o ganho do amplificador AM-502 de forma que o analisador de fase indique um valor qualquer da escala de fase ou quadratura. Deve-se, agora, ajustar as voltagens em fase e em quadratura fornecidas pelo oscilador (sinais de referência) ao detector de fase de modo a ficarem iguais a f.e.m. produzida pelo campo primário, da seguinte maneira: inicialmente a componente em fase do sinal de referência é colocada em quadratura com o campo primário por meio do deslocador de fase do detector GR-1238. Neste caso, a pena do registrador gráfico que corresponde à componente em fase é deslocada para a posição zero no papel de registro. Em seguida, gira-se o sinal de referência em  $90^\circ$ , de modo que o sinal em fase do oscilador fique em fase e igual em amplitude com o campo primário atenuado. Isto é feito levando-se a pena do registrador, por meio do ajuste respectivo, a uma posição que será correspondente a 1% do campo primário. Analogamente, faz-se a calibração para a componente em quadratura de modo que esta fique  $90^\circ$  fora de fase com o campo primário.

Após estas operações, o sinal de referência passa a corresponder à 1% da f.e.m. produzida na bobina receptora pelo campo primário. As penas podem agora ser levadas a uma posição escolhida como base, onde as componentes serão nulas na ausência de campo secundário, ou seja, o sinal de referência não acusará variações sempre que houver apenas o campo primário.

É necessário, agora, efetuar o cancelamento do campo primário. Isto é feito ligando o compensador e retirando a atenuação gradativamente, sempre usando o ajuste potenciométrico de modo a zerar a leitura do analisador de fase. Quando a atenuação for zero, tem-se o sistema com máxima sensibilidade e o fundo de escala no detector de fase corresponde a 1% do campo primário. Dessa maneira, qualquer f.e.m. incremental induzida na bobina receptora será decomposta em suas componentes em fase e quadratura. O ajuste conveniente do atenuador no início do processo de

calibração permite ler percentuais maiores de campo primário.

## 5.2. Medições

Nos termos da Teoria do Fator Geométrico, onde  $L/\delta \ll 1$ , o quociente entre o campo secundário e primário depende linearmente de  $\sigma$  do meio, como mostra a equação (27). Como no presente caso esta aproximação é válida, pode-se construir uma escala linear de condutividade aparente a partir de dois pontos de  $\sigma_a$  conhecida. O ponto de condutividade zero, no início de cada perfil, quando a sonda está no ar longe da solução salina, e o ponto central do compartimento de calibração foram tomados como base para a construção da escala.

Desta forma, após a etapa de calibração, a posição de base da pena do registrador gráfico que representa a componente em fase com a corrente no transmissor demarca a linha de  $\sigma_a=0$ . Levando o mandril até a posição central do compartimento 4, a pena correspondente à componente em fase demarcará o ponto de condutividade aparente conhecida. O sistema agora está preparado para registrar a condutividade aparente dos compartimentos 2 e 3. Durante todo o processo, a componente em quadratura com a corrente no transmissor não deve variar. Devido à faixa de frequência e condutividade em que se está trabalhando, não é possível verificar seu deslocamento.

## 5.3. Testes de Funcionamento do Sistema de Modelamento

O sistema de modelamento foi testado em ambientes de diferentes condutividades e em diferentes frequências.

Para verificação do comportamento da sonda, foi construído um dispositivo de canalizações cilíndricas de PVC (Fig. 11), com 80 cm de comprimento e 5 cm de raio, de tal forma que a sonda pudesse ser introduzida manualmente em seu interior, ficando envolta por solução salina. Neste pequeno modelo, foi testado o funcionamento do circuito elétrico, a eficácia das blindagens eletrostática e a linearidade da sonda com respeito às variações de condutividade da solução salina, evitando o trabalho no tanque, onde um volume bem maior de solução precisava ser condicionado antes do uso.

Quando o desempenho dos sistemas de transmissão, sonda e recepção foram satisfatórios, passou-se aos testes do conjunto completo, já no tanque de solução salina.

#### 5.4. Perfis Demonstrativos

No sistema de modelamento foram tomadas medidas em quatro frequências distintas: 50,2 kHz, 70,2 kHz, 85,2 kHz e 100,2 kHz. A Fig. 12 apresenta os perfis típicos obtidos. Na escala horizontal é feita a leitura de condutividade aparente  $\sigma_a$ , de forma que ela representa o produto entre a condutividade elétrica do meio e o seu fator geométrico integrado. O valor de  $\sigma_a$  no centro do compartimento de calibração vale 1,68 S/m, que resulta do produto  $\sigma G_i$  daquele meio.

A Tab. 2 apresenta a distribuição de condutividades em cada compartimento para as situações simuladas.

A perfilagem foi realizada iniciando pelo compartimento 4, indo até o 2.

As condutividades foram monitoradas por um condutivímetro Phillips, modelo PW 9505, que opera na frequência de 1 kHz, com erro  $\leq 1\%$ .

Tab.2. Distribuição de condutividades no modelo geológico.

Compartimento	Condutividade $\sigma$ (S/m)		
	Zona Lavada	Zona de Transição	Zona Virgem
2	6,15	5,60	0,19
3	5,00	4,30	3,45
4	2,00	2,00	2,00

#### 5.5. Erros na Simulação

O levantamento das possíveis fontes geradoras de erros na resposta do sistema de modelamento é uma etapa importante, mesmo quando não se pode quantificar precisamente a influência que cada fator exerce sobre os resultados. Futuros refinamentos do conjunto dependem muito destas informações *a priori*.

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

No caso da sonda de indução, as bobinas transmissora e receptora devem comportar-se como pequenos dipolos. Como não foi possível, no presente caso, confeccionar bobinas de diâmetros

que seguissem o fator de redução de escala do restante do modelo, o que se fez foi medir o decaimento do campo das bobina transmissora com relação à distância que a separa da receptora, observando se corresponde ao comportamento de um campo dipolar. Os resultados (tabela 1) mostraram-se satisfatórios, e as variações nas leituras providas desta aproximação foram desconsideradas.

b) Erro devido à aplicação da Teoria do Fator Geométrico

A determinação do fator  $G_i$  do compartimento 4 (de calibração) foi feito, sabidamente, a partir da Teoria do Fator Geométrico. Ocorre que a forma do compartimento 4 é a de um paralelepípedo, enquanto que o fator geométrico integrado desta zona corresponde à integração no volume de um cilindro inscrito àquele paralelepípedo. A maneira de estimar o erro deste procedimento foi usar a mesma teoria, porém agora jogando com os limites de integração de forma que o cilindro circunscreva o paralelepípedo. A diferença entre estes dois valores calculados deverá nos fornecer a variação máxima das leituras. O desvio encontrado, seguindo este raciocínio, foi de 5%.

c) Erro devido à calibração

O erro na calibração da sonda no compartimento 4 devido à presença de líquidos vizinhos foi estimado em menos de 2%, o que deve se refletir aproximadamente da mesma forma na leitura de condutividades aparentes dos compartimentos 2 e 3.

d) Erro devido à excentricidade da sonda

O efeito da excentricidade da sonda não foi considerado importante, pois há pequena folga no interior do tubo de PVC que serve como poço para a passagem da ferramenta.

e) Erro devido à blindagem eletrostática

Embora não se tenha determinado quantitativamente, a blindagem eletrostática pode estar alterando a resposta da sonda. Devido a problemas logísticos, não foi possível utilizar uma blindagem melhor, como a malha de fio condutor esmaltado, por exemplo.

f) Erro devido à presença de material não condutivo usado no modelamento

A presença das canalizações de PVC reduzem em menos de 4% o sinal que chega à bobina receptora. Este efeito é levado em conta no cálculo teórico da condutividade aparente de cada meio.

g) Erro devido ao efeito da parede do tanque

A proximidade das paredes do tanque provoca reflexões do campo eletromagnético produzido pela bobina transmissora (Simpson et al, 1983). Considerando o campo primário essencialmente dipolar, onde sua intensidade varia com o inverso do cubo da distância, a relação entre a voltagem gerada na bobina receptora por uma reflexão total do primário no fundo do tanque (parede mais próxima) e pelo primário é  $\leq 0,1\%$ . Como a reflexão não é total e ocorre atenuação devido ao *skin effect*, a intensidade da onda refletida deve ser substancialmente menor, de modo a se poder desprezar o efeito, o que é confirmado pela boa concordância entre os valores de condutividade aparente calculados e medidos apresentados no capítulo 6.

h) Outros

O erro na medida da condutividade da solução é  $\leq 1\%$ . Como as concentrações de sais utilizadas não são muito altas, a condutividade dentro de cada zona no modelo geológico foi considerada homogênea. Ainda, a condutividade das soluções varia com a temperatura, motivo pelo qual esta foi mantida constante no laboratório através da utilização de um aparelho de ar condicionado.

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

Levando-se em conta o efeito conjunto destes fatores todos, as leituras podem ser afetadas em até 12%.

## CAPÍTULO 6

### ANÁLISE DE RESULTADOS

Embora desejasse-se simular corpos de extensão infinita tanto em profundidade como radialmente, isto não foi possível devido às grandes dimensões que o modelo geológico teria de assumir. Este problema pode ser contornado, ao menos em parte, pela utilização da Teoria do Fator Geométrico, através da qual pode-se calcular a condutividade aparente do meio em cada situação de interesse e compará-la com o valor medido.

Tomando como exemplo o perfil da figura 12, corrido na frequência de 85,2 kHz, a leitura direta de condutividade aparente no centro de cada compartimento nos fornece

$$\sigma_a \text{ do compartimento 4 (de calibração)} = 1,68 \text{ S/m,}$$

$$\sigma_a \text{ do compartimento 3} = 3,7 \text{ S/m} \quad \text{e}$$

$$\sigma_a \text{ do compartimento 2} = 2,72 \text{ S/m.}$$

A resposta teórica é obtida a partir das condutividades da Tab. 2 e dos  $G_i$  de cada zona, desprezando a influência dos líquidos vizinhos.

Conforme o Apêndice B, o fator geométrico integrado do compartimento 4 é 0,838, de modo que o produto  $\sigma G_i$  é igual a 1,68 S/m. O  $G_i$  da zona lavada é 0,303, tendo-se  $10 \times 10^{-3} \text{ m} \leq r \leq 35 \times 10^{-3} \text{ m}$  e  $-0,32 \text{ m} \leq z \leq 0,32 \text{ m}$  como limites de integração. A zona de transição possui  $G_i = 0,095$ , onde  $37 \times 10^{-3} \text{ m} \leq r \leq 47 \times 10^{-3} \text{ m}$  e  $-0,32 \text{ m} \leq z \leq 0,32 \text{ m}$ . O  $G_i$  da zona virgem é 0,402, quando a função  $g$  foi integrada entre os limites  $49 \times 10^{-3} \text{ m} \leq r \leq 0,25 \text{ m}$  e  $-0,32 \text{ m} \leq z \leq 0,32 \text{ m}$ . Em todos os casos, supõe-se a sonda posicionada no centro do compartimento. Assim

$$\sigma_a \text{ do comp. 4 (calibração)} = 1,68 \text{ S/m,}$$

$$\sigma_a \text{ do comp. 3} = 5 \times 0,303 + 4,3 \times 0,095 + 3,45 \times 0,402 = 3,3 \text{ S/m} \quad \text{e}$$

$$\sigma_a \text{ do comp. 2} = 6,15 \times 0,303 + 5,6 \times 0,095 + 0,19 \times 0,402 = 2,47 \text{ S/m.}$$

As leituras situam-se em torno de 10% acima do valor teórico.

Os resultados para todas as frequências encontram-se na tabela 3, onde ERRO(%) é calculado da forma



$$\frac{\sigma_{a,calculada} - \sigma_{a,medida}}{\sigma_{a,calculada}} 100\%$$

É interessante transformar as condutividades aparentes lidas no sistema modelo para suas equivalentes no sistema real, via equação de similitude. Admitindo-se como parâmetros do sistema real  $L=1$  m,  $f=20$  kHz,  $\mu=\mu_o=4\pi \times 10^{-7}$  H/m. Os resultados encontram-se na tabela 4.

Tab.3. Condutividades aparentes medidas e calculadas.

f (kHz)	$\sigma_{a,medida}(S/m)$			$\sigma_{a,calculada}(S/m)$			ERRO(%)	
	compartimento			compartimento			compartimento	
	4	3	2	4	3	2	3	2
50,2	1,68	3,53	2,86	—	3,3	2,47	-6,97	-15,79
70,2	1,68	3,62	2,65	—	3,3	2,47	-9,67	-7,29
85,2	1,68	3,6	2,57	—	3,3	2,47	-9,09	-4,05
100,2	1,68	3,7	2,72	—	3,3	2,47	-12,12	-10,12

Tab.4. Condutividades aparentes para o sistema real e modelo.

Sistema Modelo			Sistema Real		
f(kHz)	Cond. aparente(S/m)		f(kHz)	Cond. aparente(S/m)	
	Comp.2	Comp.3		Comp.2	Comp.3
50,2	2,86	3,53	20	0,018	0,022
70,2	2,65	3,62	20	0,023	0,032
85,2	2,57	3,6	20	0,027	0,038
100,2	2,72	3,7	20	0,034	0,046

### 6.1. Desempenho do conjunto de modelamento

Durante o período de testes, o conjunto apresentou boa repetibilidade, com variações nas leituras de condutividade aparente menores que 2%.

O tempo necessário para se completar cada perfil é de aproximadamente 5 minutos, e o *drift* máximo observado é  $\leq 2\%$ , relativamente ao valor de condutividade aparente lida no compartimento de calibração.

Para que haja uma resolução satisfatória nas leituras, as condutividades das soluções salinas devem situar-se acima de  $0,7 \text{ S/m}$  na frequência de  $50 \text{ kHz}$ , o que equivale a uma relação entre campo secundário e primário de  $0,025\%$ . Abaixo deste valor de condutividade as leituras ficam bastante prejudicadas, especialmente nas frequências mais baixas.

Caso deseje-se estudar o comportamento da sonda de indução na interface entre meios de diferentes condutividades, é necessário a substituição das placas de vidro por algum material não condutivo mais fino. As placas de vidro possuem espessura da ordem de um décimo do espaçamento entre as bobinas, e nos perfis de  $85,2 \text{ kHz}$  e  $100,2 \text{ kHz}$  é possível notar a sua presença (Fig. 12).

A posição das bobinas, verificada através do perfil, pode ser conhecida com erro  $\leq 1,5 \text{ cm}$ .

Levando em conta as fontes de eventuais desvios nas leituras de condutividade aparente do sistema, a margem de variação estimada do conjunto está em torno de  $\pm 12\%$ .

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema de modelamento analógico capaz de simular o perfil de indução de duas bobinas coaxiais em ambientes comuns à prospecção geofísica de poço.

O sistema completo é composto de um modelo geológico (Fig.4), que simula camadas espessas invadidas de condutividades variáveis, e de um sistema elétrico constituído de um conjunto transmissor, sonda, e receptor (Fig.5).

No modelo geológico, o fator de redução de escala adotado foi  $p=20$ . As zonas lavada, de transição e virgem são representadas por solução salina, cuja condutividade elétrica pode ser controlada.

O conjunto transmissor opera na faixa de frequência que vai de 50 kHz a 100 kHz.

O receptor mede razões entre campo secundário e primário na faixa de 0,1%. A estabilidade das leituras foi estimada em 0,008%.

Todo o sistema elétrico deve funcionar sob temperatura constante, por volta de 20°C, pois ele apresenta instabilidade à variações de temperatura.

As leituras obtidas com o conjunto, quando comparadas aos resultados teóricos, mostraram variações em torno de 10% do valor esperado. O resultado foi considerado satisfatório, dada a pequena amplitude dos sinais medidos.

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

O modelo geológico pode ser alterado sem grande dificuldade caso se deseje observar o comportamento da sonda em diferentes diâmetros de invasão ou na interface entre meios de condutividades distintas.

Várias sugestões podem ser feitas para melhorar o desempenho do sistema.

a) Substituição do analisador de fase por um equipamento de mais alta resolução, possibili-

tando trabalhar com razões  $-\frac{V_R}{V_X}$  ainda menores. Neste caso, é conveniente substituir o oscilador ou controlar sua frequência por outro oscilador a cristal de quartzo. Além disso, o conjunto ganharia mais versatilidade se operasse em frequências mais altas, por exemplo até 500 kHz.

b) Embora aparentemente o esquema de calibração adotado não seja fonte de grande erros, o ideal seria proceder da maneira comum, construindo um *loop* de resistência elétrica e diâmetro conhecidos, que deveria ser posicionado coaxialmente ao arranjo, e que produz sinal equivalente a um meio homogêneo isotrópico de condutividade arbitrária.

c) Na sonda, a blindagem eletrostática pode ser otimizada pelo uso da tela de fio esmaltado, de bitola A.W.G. 46, por exemplo, ou pela substituição dos anéis de alumínio por cobre de menor espessura, garantindo influência ainda menor no sinal e possibilitando a solda das conexões de terra, o que evita problemas nos contatos das blindagens após uso prolongado.

d) Por último, a aquisição de dados pode ser feita digitalmente, aumentando a confiabilidade nas respostas e possibilitando visualização e tratamento de dados mais rapidamente.

## AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Om Prakash Verma e ao M.Sc. Nélio R. Medeiros da Fonseca pela orientação e co-orientação do presente trabalho, respectivamente.

Ao Dr. Hilton B. Evans pelas correções e modificações sugeridas e ao Dr. Luiz Rijo pelas alterações e pelo auxílio na solução dos problemas numéricos.

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

Aos colegas Luiz, Arnaldo, Paulo de Tarso, Álvaro, André e Bucheb pelo auxílio na edição da tese.

Agradeço ao Departamento de Geofísica do Centro de Geociências da UFPa pela infraestrutura oferecida e ao convênio PETROBRÁS, UFPa, CNPq, FINEP e FAPESP pelo suporte financeiro necessário à realização do trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, B.; BARBER, T.; SCHAEFER, R., 1988, Induction log: evolution of a technique. The Technical Review, 35, 35-41.
- ARCHIE, G.E., 1942, The electrical resistivity logs as an aid in determining some reservoir characteristics. Pet. Tech, 5(1).
- BARBER, T.D., 1983, Introduction to the digital dual induction tool. SPE 58th Annual Fall Meeting, October 5-8, paper 12049.
- DOLL, H.G., 1949, Introduction to induction logging and application to logging of wells drilled with oil base muds. Petroleum Transactions, AIME, June, 148-162.
- DUESTERHOEFT, W. C., 1961, Propagation effects in induction logging. Geophysics, 26 (2), 192-204.
- GIANZERO, S. & ANDERSON, B., 1982, A new look at skin effect. The Log Analyst, 23(1), 20-34.
- GILL, S.P., 1989, Range and resolution performance of a new pulsed power induction log. SPWLA, Thirtieth Annual Logging Symposium, paper M, June, 11-14.
- GRANT, F.S. & WEST, G.F., 1965, Interpretation theory in applied geophysics. McGraw-Hill Book Company.
- HARBEN, P.E.; RODGERS, P.W.; HOLLADAY, G., 1987, Evaluation and design of a large spacing loop-loop electromagnetic tool. The Log Analyst, January-February.
- KELLER, G.V. & FRISCHKNECHT, F.C., 1977, Electrical methods in geophysical prospecting. Oxford, Pergamon Press.
- LANDT, J.A.; ROWLEY, J.C.; NEUDECKER, J.W.; KOELLE, A.R., 1977, A magnetic induction technique for mapping vertical conductive fractures: status report. Los Alamos, Scientific Laboratory of the University of California.

- MORAN, J. H. & KUNZ, K.S., 1962, Basic theory of induction logging and application to study of two-coil sondes. *Geophysics*, 27 (6), 829–858.
- PIRSON, S.J., 1963, *Handbook of well log analysis*. Prentice–Hall.
- SCHLUMBERGER Ltda., 1972, *Principles of well–logging*. Document–1.
- SERRA, O., 1984, *Fundamentals of well–log interpretation*. Elsevier Elf Aquitaine.
- SHATTUCK, D.P.; BITTAR, M.S.; SHEN, L.C., 1987, Scale modelling of the laterolog using synthetic focusing methods. *The Log Analyst*, July–August.
- SIMPSON, R.S.; SHANG, H.C.; SHEN, L.C., 1983, A laboratory study of induction logs using physical modeling. SPWLA Twenty–Fourth Annual Logging Symposium, June, 27–30, paper M.
- WARD, S.H., 1967, The electromagnetic method–Part C. In: HANSEN, D.A., HEINRICHS, W.E., HOLMER, R.C., MacDOUGALL, R.E., RODGERS, G.R., SUMNER, J.S., WARD, S.H., Eds., *Mining geophysics–vol.II*. SEG 224–368.

## APÊNDICE A

### Evolução dos Perfis de Indução

As camadas adjacentes influenciam significativamente na resposta do perfil de duas bobinas coaxiais, como ilustra o gráfico de  $G(z)$ , na Fig. 3. Isto ocorre pelo fato da função  $G(z)$  não diminuir rapidamente o bastante fora do intervalo entre as bobinas, acarretando perda de resolução vertical da ferramenta.

A solução encontrada pelos especialistas para minimizar o problema foi acrescentar várias bobinas transmissoras e receptoras em torno do par principal, de forma a eliminar a resposta indesejável de formações próximas. As sondas criadas a partir desta idéia foram chamadas de *focalizadas*. Por volta de 1959 (Anderson et al, 1988) foi introduzida a sonda 6FF40, possuindo 3 bobinas transmissoras e 3 receptoras, cujo design diminuía em muito a resposta de camadas laterais.

O desenvolvimento de teorias exatas envolvendo a resposta do perfil de indução em meios homogêneos (Duesterhoeft, 1961; Moran & Kunz, 1962) possibilitou corrigir a resposta do perfil em camadas excessivamente condutivas. Situações geológicas mais complexas também foram sendo progressivamente estudadas.

A disposição de bobinas da 6FF40 foi incorporada ao *Dual Induction Log* (construído pela Schlumberger), com o objetivo de medir a condutividade da zona virgem. O *Dual Induction Log* (DIL) era também capaz de medir a condutividade da zona invadida, através de outro arranjo de bobinas. Este modelo de sonda foi usado quase sem modificações por mais de 10 anos.

Por outro lado, filtros de deconvolução cada vez mais eficientes vinham sendo procurados, de modo a melhor recuperar a condutividade de meio.

Nos termos da Teoria do Fator Geométrico, o perfil de indução em um meio composto por várias camadas infinitas radialmente ao poço convolve a condutividade da formação com o fator geométrico integrado em relação a  $r$ ,  $G(z)$ . Ou seja

$$\sigma_{GF}(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(z - z') \sigma(z') dz' ,$$

onde  $\sigma_{GF}(z)$  é a condutividade aparente medida pela ferramenta e  $\sigma(z)$  é a condutividade real da



formação.

A partir da expressão de  $\sigma_{GF}$ , usando os recursos da teoria de processamento de sinal, pode-se obter

$$\sigma_{DIL} = h * \sigma_{GF} ,$$

onde  $h$  é o filtro de deconvolução e  $\sigma_{DIL}$  o valor obtido para a condutividade real do meio após a filtragem.

Ocorre que o sinal de resposta não muda linearmente com a condutividade da formação, e a função resposta, a qual mapeia a condutividade da formação no sinal medido não é uma função constante. Esta variação da resposta com a condutividade do meio está relacionada ao *skin effect*. Como a resposta da sonda de indução não é constante, filtros de deconvolução que trabalhavam bem em altas condutividades não repetiam o desempenho em condutividades 10 vezes menores, por exemplo. Na época, o que se fez foi construir uma ferramenta capaz de medir o sinal  $V_X$ , cuja variação acionava um filtro de deconvolução diferente para cada faixa de condutividade. Mesmo assim, acima de 1 S/m os filtros não tinham boa performance.

Na verdade, a condutividade aparente  $\sigma_R(z)$  obtida a partir da voltagem  $V_R$  lida pela sonda é dada por

$$\sigma_R(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} G_R(z - z', \sigma) \sigma(z') dz' .$$

Gianzero & Anderson(1982) tabelaram expressões para  $G_R(z, \sigma)$  em formações de diferentes geometrias e a função aumenta rapidamente em complexidade.

A função  $G(z)$  é o limite de  $G_R(z, \sigma)$  quando  $\sigma$  tende para zero.

Desde que a resposta do perfil de indução não é linear, a deconvolução usada para corrigir efeitos das camadas adjacentes deve também ser não-linear.

Barber(1983) encontrou os filtros necessários a esta deconvolução, expressando a condutividade deconvolvida na forma

$$\sigma_{phasor} = h * \sigma_R + \alpha(\sigma_X) b * \sigma_X ,$$

onde

$h$ =filtro de deconvolução para  $\sigma_R$ ,

$\sigma_R$ =condutividade obtida a partir de  $V_R$ ,

$\alpha$ =função de ajuste,

$\sigma_X$ =condutividade obtida a partir de  $V_X$  e

$b$ =filtro de deconvolução para  $\sigma_X$ .

Em termos de equipamento, o *DualInductionLog* teve de ser redesenhado de forma a medir as componentes em fase( $V_R$ ) e em quadratura( $V_X$ ) com maior precisão. A nova sonda foi chamada *Phasor-log*, introduzida pela Schlumberger em 1984, e opera até os dias de hoje(Barber, 1983).

Os *PhasorInductionLog* tem algumas importantes vantagens: melhoria da resolução vertical, aumento da profundidade de investigação em formações condutivas graças à utilização de  $V_X$ , e correções mais eficientes em grandes diâmetros de invasão. Além disso, operando em 3 frequências diferentes, 10, 20 e 40 kHz, pode-se obter maiores relações sinal/ruído nas baixas condutividades. O raio médio de investigação do *Phasorlog* para a disposição de bobinas de investigação profunda (*deep signal*) em formações de 10 S/m é 122 cm, e a espessura de camada para resolução vertical total deve ser  $\geq 61$  cm.

Pesquisas mais recentes em termos do log de indução têm revelado a aplicabilidade de ferramentas usando pulsos de energia(Gill,1989). Funcionando sob os mesmos princípios físicos dos perfis convencionais, estas sondas operam com pulsos de aproximadamente 50 MW pico-a-pico, muitas ordens de grandeza maior que os 150 watts liberados pelas sondas tradicionais. A primeira aplicação desta tecnologia é o modelo XHR (produzido pela companhia MPI), com alcance radial de investigação de 11 m, e fina resolução vertical(aproximadamente 30 cm), um desempenho bastante superior aos dos melhores logs de indução comuns. As perspectivas de utilização deste tipo de ferramenta em futuro próximo são bastante promissoras.

## APÊNDICE B

Por sua simplicidade, a Teoria do Fator Geométrico(Doll,1949) foi utilizada no cálculo aproximado da contribuição das diferentes zonas do modelo geológico para o sinal lido na bobina receptora. O que se fez foi avaliar o fator geométrico integrado  $G_i$  para cada zona de interesse, dado por

$$G_i = \int \int_i g \, dr dz \quad ,$$

onde

$$g = (L/2) \frac{R^3}{(R^2 + (L/2 - z)^2)^{3/2} (R^2 + (L/2 + z)^2)^{3/2}} \quad .$$

A integral dupla foi calculada numericamente usando o método iterativo de Romberg, e os resultados apresentados são exatos até a segunda casa decimal.

Antes de mais nada, deve-se verificar se a Teoria do Fator Geométrico pode ser usada no presente caso como primeira aproximação para a resposta do log de indução. Isto será feito observando a expressão entre parênteses da eq. (22) em alguma situação característica do modelamento, por exemplo quando  $L=5 \times 10^{-2}$  m,  $f=100$  kHz,  $\mu=\mu_o$ ,  $\sigma=3$  S/m. De (22), obtém-se

$$\left(1 - \frac{2L}{3\delta} + \frac{2L^3}{15\delta^3} - \dots\right) = (1 - 0,0363 + 0,0001 - \dots) \cong 0,96$$

truncando as potências de  $L/\delta$  de ordem maior ou igual a quatro, significando que um meio homogêneo isotrópico com as características acima fornece uma resposta em fase com a corrente do transmissor de aproximadamente 96% relativamente ao valor calculado pela teoria de Doll. O desvio de 4% foi considerado pequeno, validando o uso desta aproximação.

Pode-se, então, usar a Teoria do Fator Geométrico para responder a duas questões fundamentais. A primeira delas é saber qual a resposta fornecida pelo modelo geológico. A segunda é

determinar qual a influência dos líquidos vizinhos em cada situação distinta, avaliando a mudança na resposta devido à presença dos mesmos.

Inicia-se verificando a resposta da sonda para a situação referente ao compartimento 4, conforme a Fig.4a. O valor calculado para  $G_i$  quando a sonda está no centro do compartimento é 0,838, usando  $10 \times 10^{-3} \text{ m} \leq r \leq 0,25 \text{ m}$  e  $-0,32 \text{ m} \leq z \leq 0,32 \text{ m}$  como limites de integração. O desvio de  $G_i$  do valor unitário é 0,162, e mostra que deve haver correção da condutividade aparente  $\sigma_a$ , no sentido da eq.(17).

Por outro lado, fazendo  $10 \times 10^{-3} \text{ m} \leq r \leq 0,25 \text{ m}$  e  $-0,96 \text{ m} \leq z \leq -0,32 \text{ m}$  obtém-se  $G_i=0,715 \times 10^{-3}$ , que é um valor bastante baixo, significando que o líquido do compartimento 3 influenciará em menos de 2% na resposta quando a sonda estiver no centro do compartimento 4, mesmo se estiver armazenando solução salina com condutividade 20 vezes maior.

Pode-se verificar agora a redução do sinal devido à presença das canalizações quando o mandril se encontra no centro do compartimento 3. O  $G_i$  da canalização que confina a zona lavada é 0,0219, integrando-se a função  $g$  entre os limites  $35 \times 10^{-5} \text{ m} \leq r \leq 37 \times 10^{-3} \text{ m}$  e  $-0,32 \text{ m} \leq z \leq 0,32 \text{ m}$ . A canalização que limita a zona invadida é caracterizada por  $47 \times 10^{-3} \text{ m} \leq r \leq 49 \times 10^{-3} \text{ m}$  e  $-0,32 \text{ m} \leq z \leq 0,32 \text{ m}$  fornecendo  $G_i=0,0163$ . Ou seja, as canalizações reduzem em 0,0382 o sinal no compartimento 3, o mesmo ocorrendo no 2.

Os fatores geométricos integrados das zonas lavada, de transição e virgem são, respectivamente, 0,303, 0,095 e 0,402.

A vizinhança lateral do compartimento 3 influencia suas medidas pelo fator  $G_i=0,715 \times 10^{-3}$ , conforme cálculo anterior. Devido, porém, à existência de solução salina em ambos os lados deste compartimento, passa-se a ter  $G_i=1,43 \times 10^{-3}$ , desprezando o efeito das canalizações no compartimento 2.

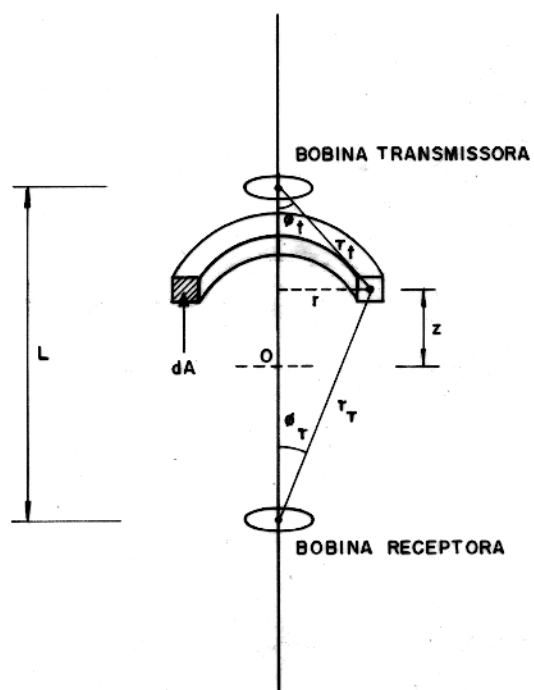


Figura 1 – Bobina transmissora e receptora em meio homogêneo isotrópico. (Extraída de Keller & Frischknecht, 1977).

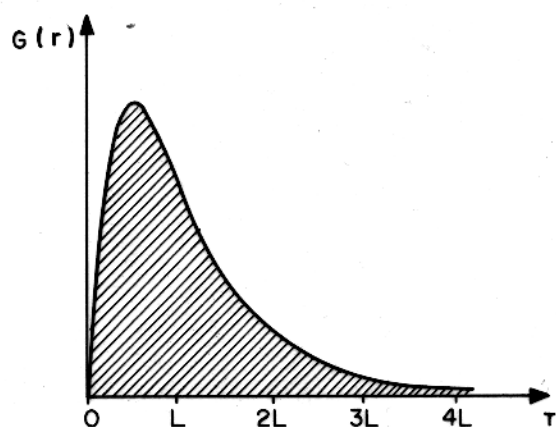


Figura 2 - Fator geométrico radial  $G(r)$  da sonda de 2 bobinas  
( $L$  = Espaçamento entre bobinas). (Extraída de Pirson, 1963).

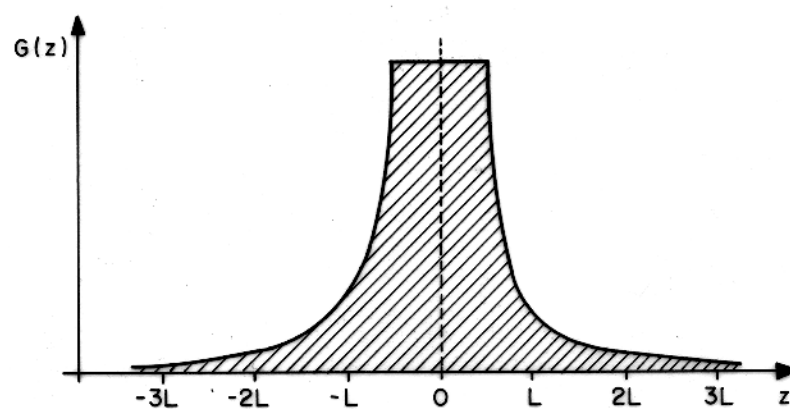


Figura 3 - Fator geométrico vertical  $G(z)$  da sonda de 2 bobinas.  
(Extraída de Pirson, 1963).

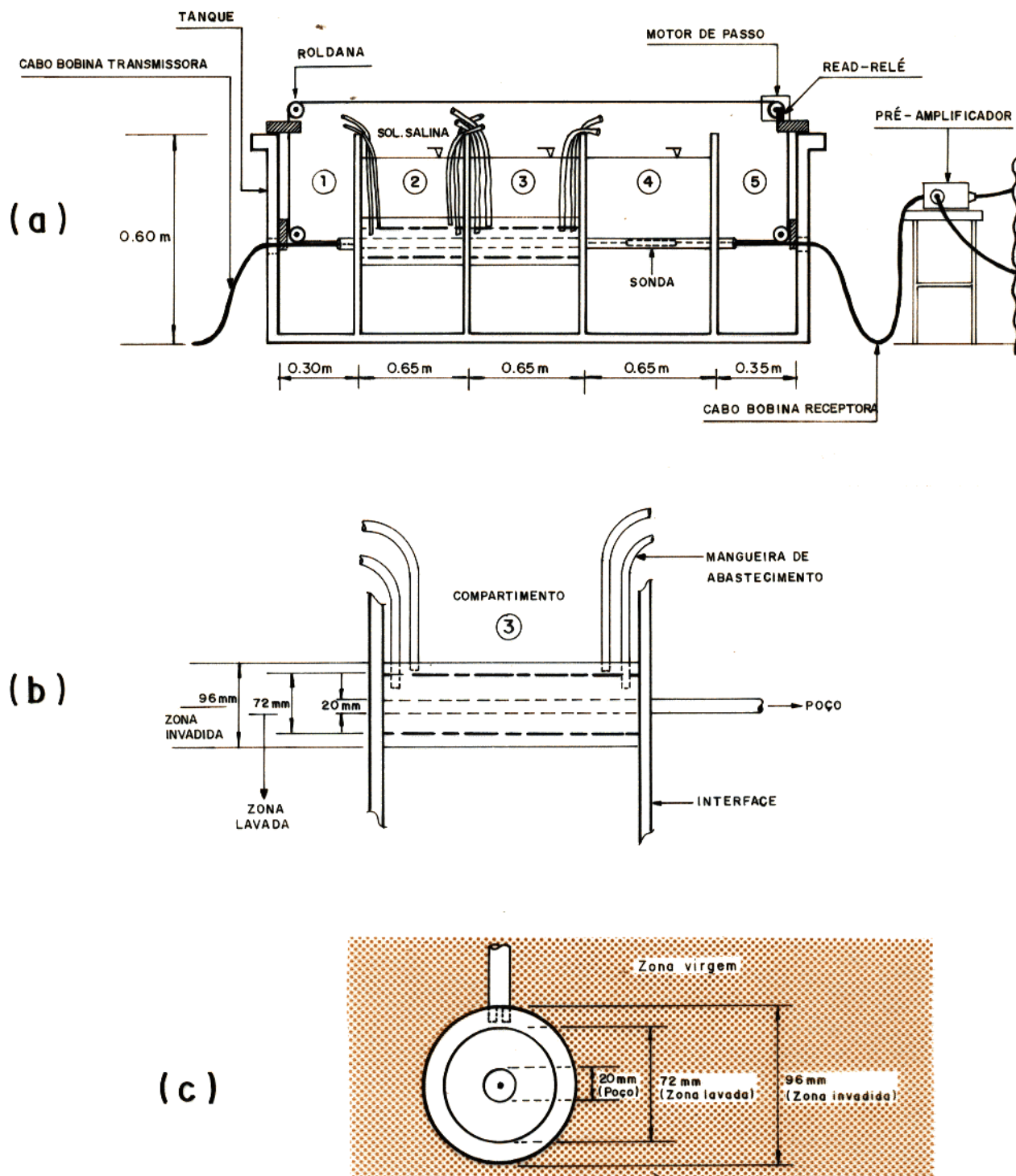


Figura 4 — (a) Modelo experimental simulando situação geológica de poço.  
 (b) Sistema de abastecimento das zonas lavadas e de transição.  
 (c) Seção transversal do modelo geológico do poço.

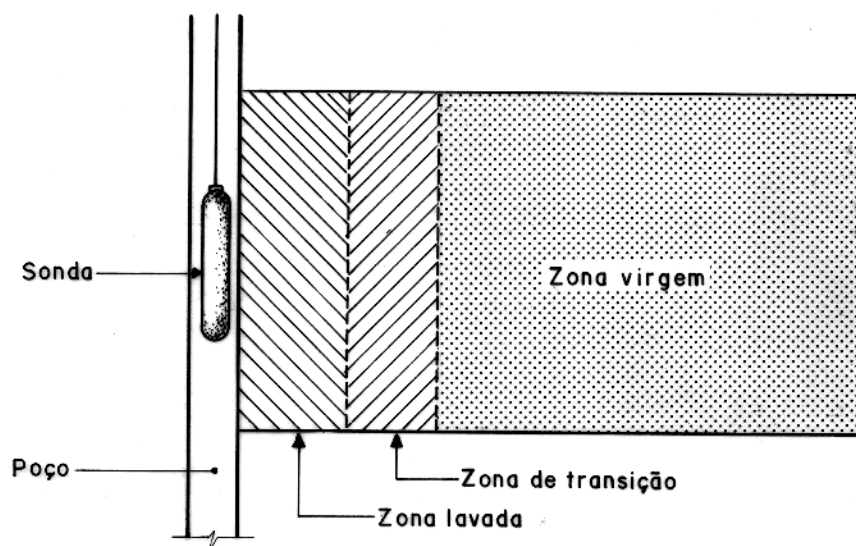


Figura 4d — Situação equivalente ao modelo geológico de poço.



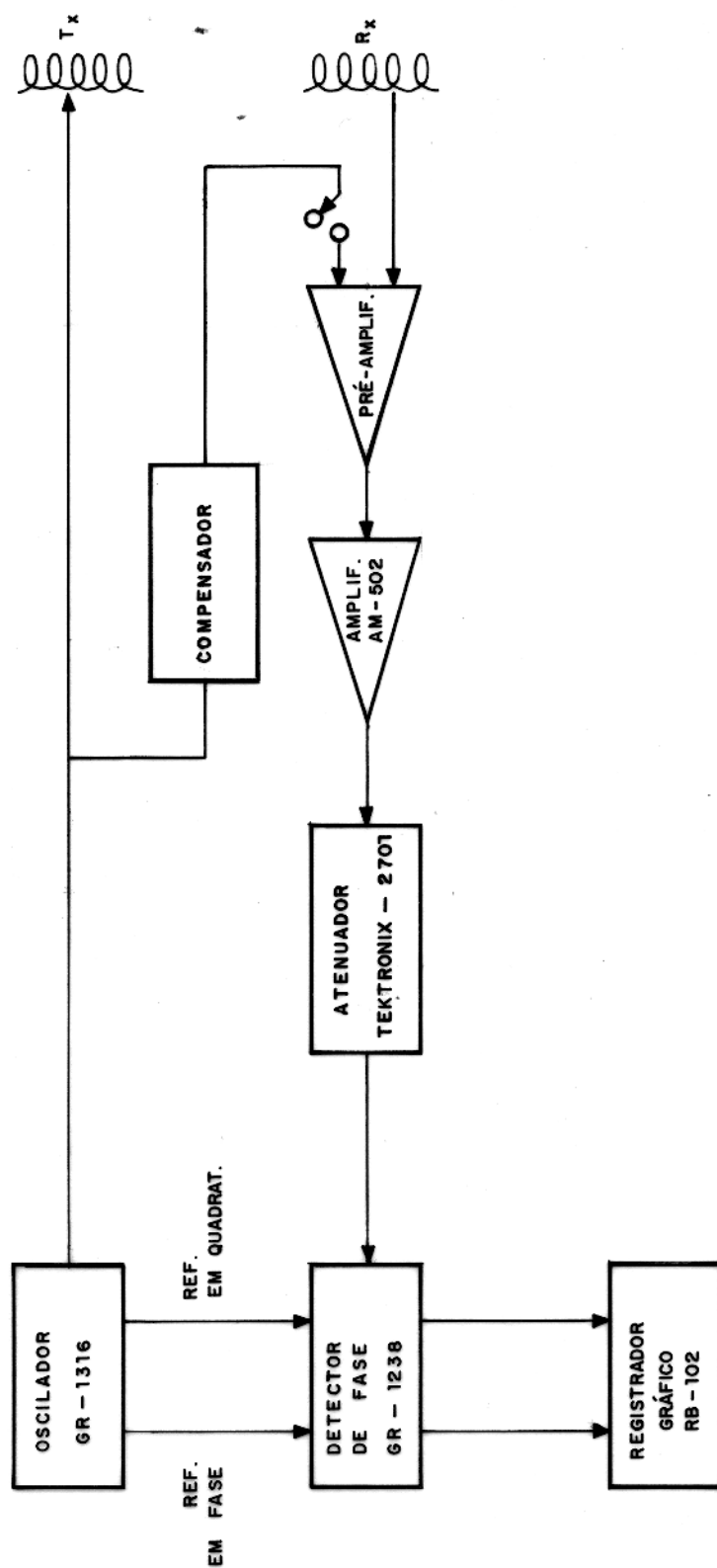


Figura 5 — Diagrama de blocos do sistema elétrico.

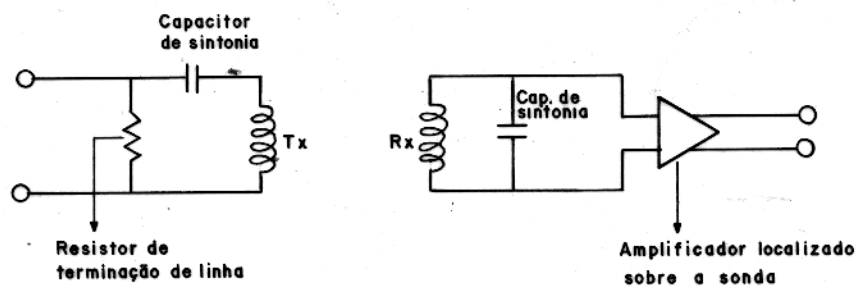


Figura 6 - Circuitos ressonantes de transmissão e recepção.

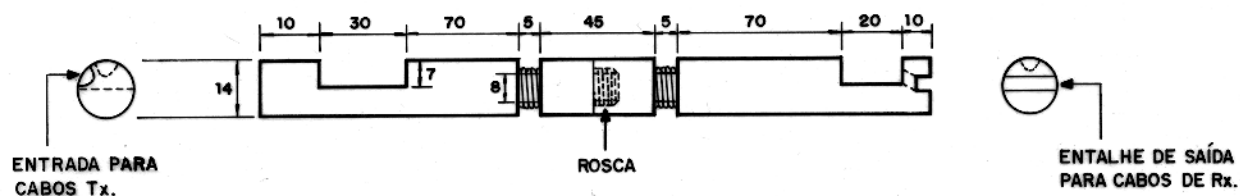


Figura 7a - Vista lateral da sonda. (Dimensões em milímetros).

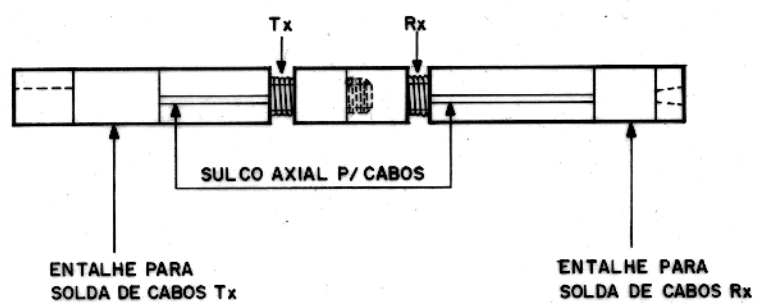


Figura 7b - Vista superior da sonda. (Dimensões em milímetros).

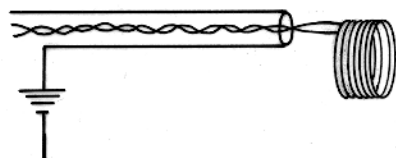


Figura 8a - Blindagem eletrostática dos cabos.

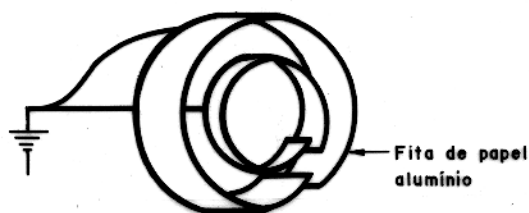


Figura 8b - Blindagem eletrostática das bobinas.

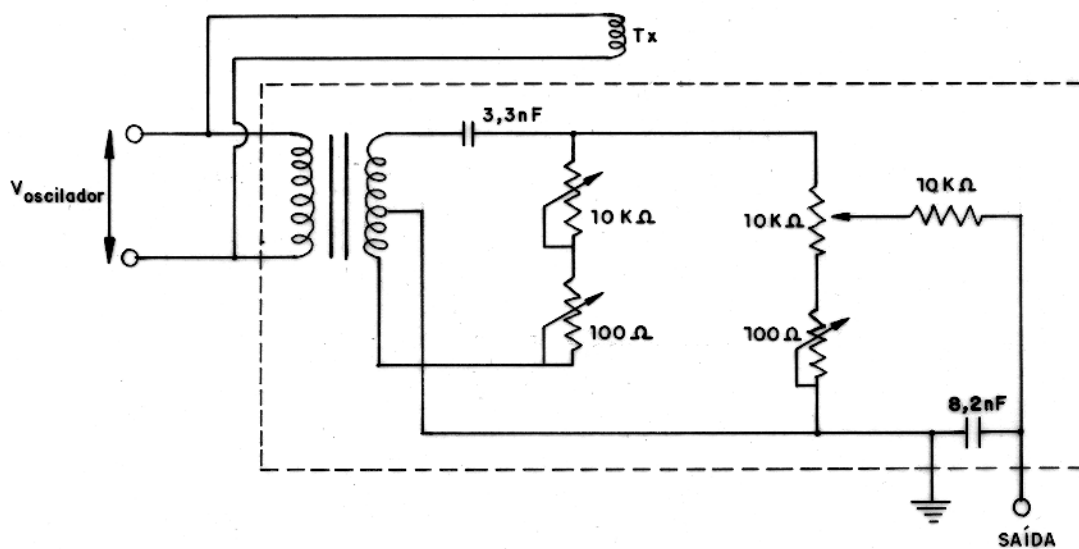


Figura 9 - Circuito compensador para cancelamento do campo primário.

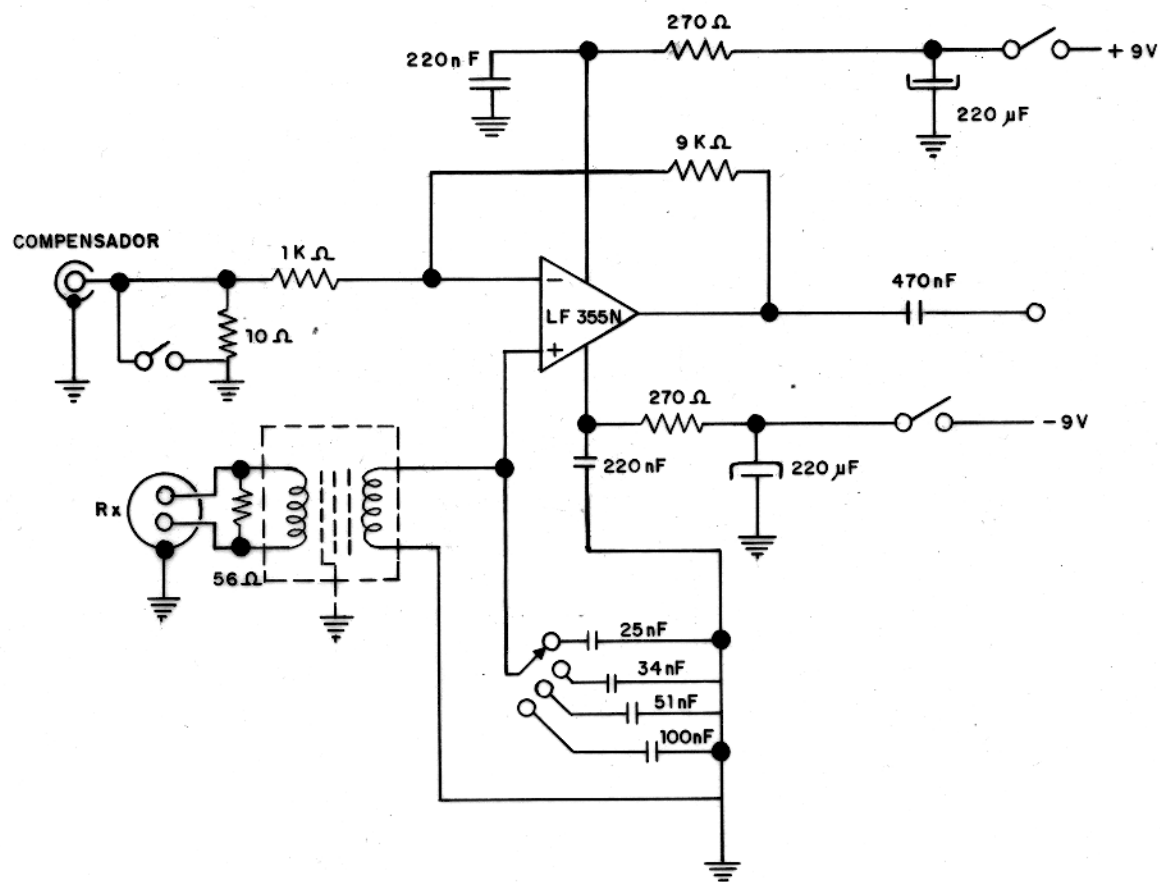


Figura 10 – Circuito do pré-amplificador.

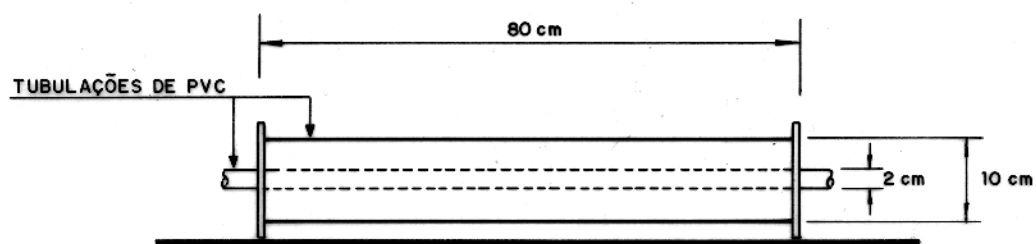


Figura 11 – Dispositivo para verificação do comportamento da sonda.

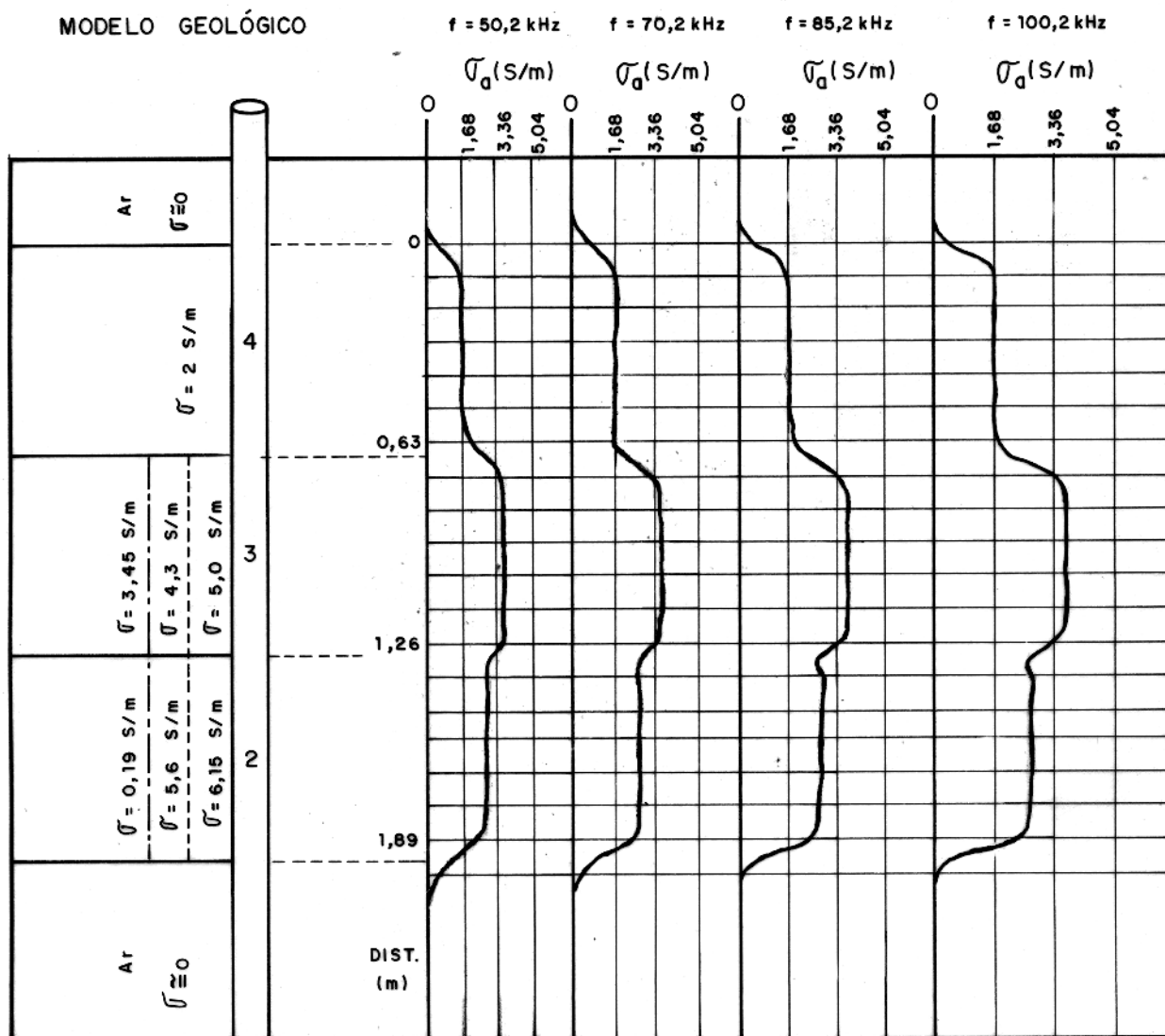


Figura 12 – Perfis de  $\bar{\sigma}_a$  para 50,2 kHz, 70,2 kHz, 85,2 kHz e 100,2 kHz.