

# Perfis indutivos unidimensionais simulados em poços de reservatórios finamente laminados

\*Carrasco, A. & Carrasquilla, A.; LENEP – UENF; Macaé -RJ

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

## Abstract

Numerical methods are used to simulate difficult cases of exploration geophysics, and, for this reason, it is always necessary to develop fast and efficient computational algorithms to achieve these objectives. In this article, we worked in an one-dimensional (1D) computational algorithm, in order to simulate conductivities well logs, which were collected in areas considered as complex geological environments. The developed program was used to analyse effects in induction well logs, choosing as model several sequences of thin horizontal parallel intercalated layers with high contrast of conductivities (shale–sand), which is a very common geological situation of oil reservoirs and always, in accord with by the petroleum industry, presents difficulties in interpretation. In this form, to perform our modelling, we used ILD, 2C40 and 6FF40 tools, all developed by SCHULUMBERGER and commonly utilised in oil industry. Thus, our results show that focalized tools as 6FF40 have better responses in the studied cases, but, among of them, the values of conductivities and thickness of the layers were always very far from the theoretical models.

## Introdução

A medição da condutividade elétrica é fundamental na avaliação das propriedades petrofísicas de uma formação geológica. Esta propriedade pode ser medida através das perfilagens elétricas ou de indução, sendo que a escolha de uma ou da outra técnica depende, sobretudo, do tipo de lama de perfuração e da sua condutividade. Entretanto, as medições da condutividade podem vir a serem influenciadas por diversos fatores como a lama de perfuração, as camadas adjacentes (*shoulder effect*) e a zona invadida pela lama, e portanto, é necessário entender esses efeitos para proceder às necessárias correções nas medições (Ellis, 1987).

A simulação de situações geológicas complexas é geralmente realizada por técnicas numéricas, já que as modelagens físicas se tornam inviáveis em muitos casos. Desta forma, os casos de reservatórios com a presença de zonas laminadas com seqüências de camadas muito finas, são tratados na indústria do petróleo como casos de geologia complexa e de difícil interpretação. No estudo de casos como esse, a utilização de modelagens

matemáticas se torna imprescindível (Anderson & Barber, 1988).

O termo camada delgada ou muito fina é conceituado como uma seqüência de camadas formadas por arenitos limpos, folhelhos e arenitos argilosos intercalados, a maioria das quais possuem uma espessura, tal que as usuais ferramentas de perfilagem empregadas na avaliação de formação, são incapazes de registrar a real variação de um determinado parâmetro petrofísico numa forma individual (Allen, 1984). Os reservatórios com camadas finas ocorrem em várias partes do mundo, por exemplo, nos campos das costas do Texas, da Louisiana e Meio Oeste americano ou no nordeste da Itália. No Brasil, eles acontecem em vários campos da Bacia de Campos, no campo Rio Preto na Bacia do Espírito Santo, e no campo Pilar na Bacia do Sergipe – Alagoas (Andrade, 1992).

Desta maneira, motivados por estas informações, desenvolvemos um algoritmo computacional unidimensional para a simulação de modelos com diferentes situações com camadas plano – paralelas, com a presença de camadas finas, condutoras, resistivas e intercaladas.

## Metodologia

Na modelagem unidimensional (1D) utilizamos os arranjos de transmissor – receptor correspondentes as sondas 2C40, 6FF40 e ILD. A posição e número de enrolamentos para cada bobina transmissora e receptora estão especificadas na Figura 1. As letras indicam as interações entre as bobinas.

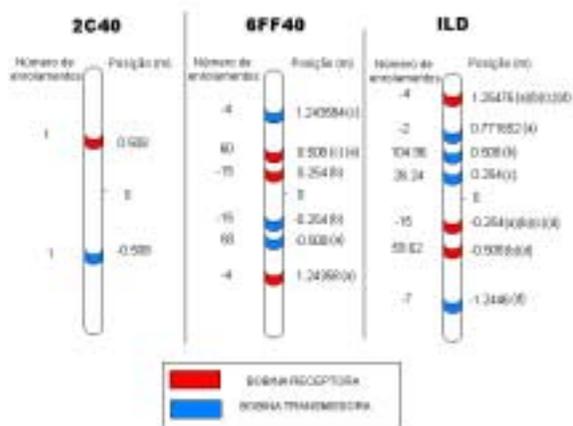


Figura. 1. Sondas da SCHLUMBERGER simuladas.

Na modelagem 1D consideramos reservatórios de camadas finas devido à que a maioria dos perfis convencionais tem baixa resolução e se faz necessário uma melhor avaliação de reservatórios mais complexos. Por este motivo, o avanço tecnológico permitiu o

desenvolvimento de novas ferramentas tais como os arranjos multi-sensores, que são ferramentas que dispõem de vários pares de bobinas. Neste caso, o algoritmo 1D trabalha com os arranjos das ferramentas de indução ILD, 2C40 e 6FF40 e utilizamos na modelagem três tipos de reservatórios de camadas finas: intercalações folhelho - arenito, intercalações arenito - arenito moderadamente silificados e intercalações de arenito moderadamente silificados - arenito - folhelho (Viera, 1990).

Para testar os resultados derivados dos cálculos do programa consideramos o modelo de Rojas (1995). Este modelo está formado por uma seqüência de 27 camadas e é conhecida como formação Oklahoma, o qual é utilizado como ponto referencial na indústria da perfilagem de poços. A Figura 2 mostra as condutividades aparentes dos arranjos ILD, 2C40 e 6FF40. Uma comparação entre estas curvas mostra a resposta do arranjo 6FF40 tende a seguir os valores de condutividade verdadeira (em comparação com os outros arranjos), especialmente nas camadas menos condutivas (Rojas, 1995).

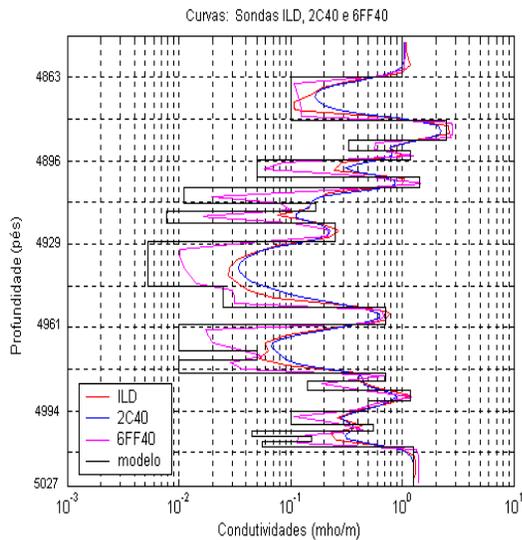


Figura 2. Resultados do modelo 1D de Oklahoma.

A presença de reservatórios constituídos por camadas finas é comum em ambientes deposicionais do tipo: turbiditos marinhos e lacustrinos, depósitos deltaicos (barras distais), varvitos do tipo glaciolacustrino e depósitos fluviais. As formações com camadas finas também podem se caracterizar por uma intercalação de zonas porosas e não porosas (cimentadas), como é o caso de algumas formações carbonáticas e arenitos eólicos (Andrade, 1992).

Considerando uma seqüência alternada de areias e folhelhos de 2 metros, e a condutividade do folhelho em 1 mho/m e do arenito em 0.04 mho/m, como se mostra na Figura 3, vamos ter as leituras da sonda ILD mais perto da condutividade verdadeira nas camadas mais condutivas dos folhelhos e um significativo efeito de camadas adjacentes nas camadas menos condutivas.

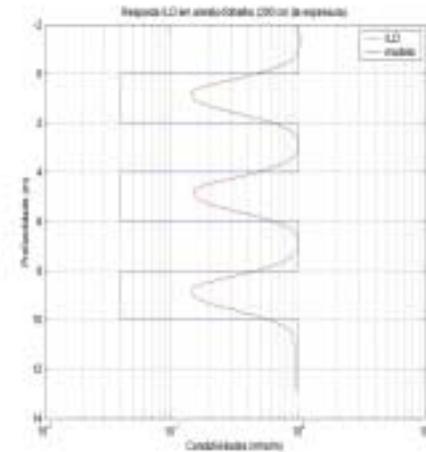


Figura 3. Resposta ILD para uma seqüência alternada de arenito - folhelho em camadas com 200 cm de espessura

Diminuindo a espessura da camada para 100 cm, notamos que a resposta da sonda ILD apresenta uma resolução muito menor e a determinação da condutividade do arenito vai ser muito difícil a partir de um simples análise visual, como se pode notar na Figura 4.

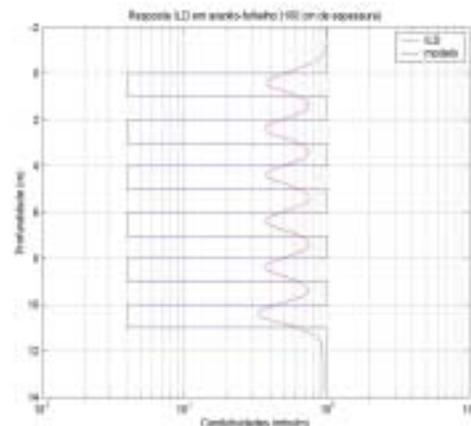


Figura 4. Resposta da sonda ILD numa seqüência areia - folhelho em camadas com 100 cm de espessura.

Se a espessura da camada é diminuída até 30 cm, como se mostra na Figura 5, temos que a sonda não pode oferecer nenhuma informação com respeito às fronteiras de cada camada ou das condutividades. Assim, para esses valores se tem uma convergência para um valor constante para uma zona laminada.

Na modelagem sintética se escolheu uma espessura em media inferior a 30 cm, devido a que a resolução vertical em camadas delgadas é muito pobre, e isto pode ser verificado através das cartas de correção por camadas adjacentes (efeito 'shoulder') como pode ver-se na Figura 6.

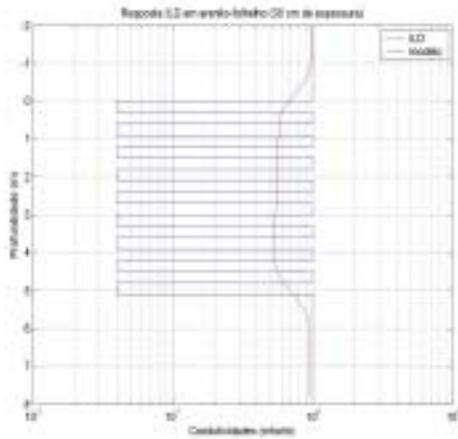


Figura 5. Resposta da sonda ILD numa seqüência areia – folhelho em camadas com 30 cm de espessura.

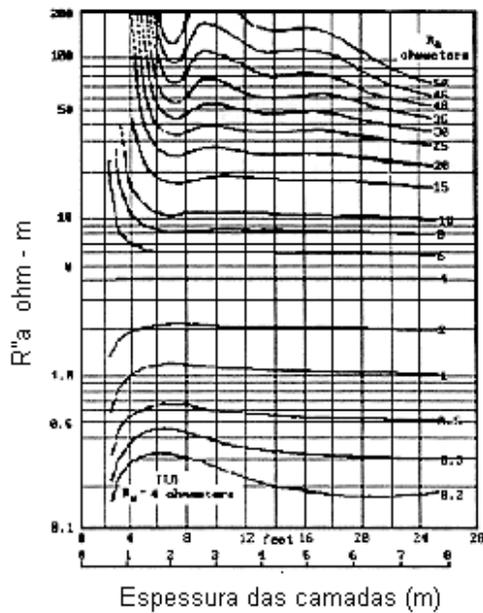


Figura 6. Carta de correção por efeito das camadas adjacentes (efeito shoulder). (Schlumberger,1972)

**Resultados**

a. Intercalações Arenito – Folhelho

Para este modelo sintético vamos apresentar dois casos, o primeiro com espessura do folhelho sendo maior com respeito à espessura do arenito, com o percentual de arenito de 28 por cento e o modelo é formado por um reservatório de 13 camadas com alternância entre o arenito e folhelho, como mostra a Figura 7. Esta figura também apresenta o resultado da simulação das respostas das 3 ferramentas de indução utilizadas, podendo-se notar a baixa resolução das ferramentas para camadas de pequena espessura e um mesmo valor de convergência aproximado de 0.7 mhos/m. No segundo caso variamos as espessuras das camadas e mantemos constantes os valores de condutividade (Figura 8), notando-se diferentes valores de convergência nas respostas, sendo este valor de 0.3 mhos/m para o ILD.

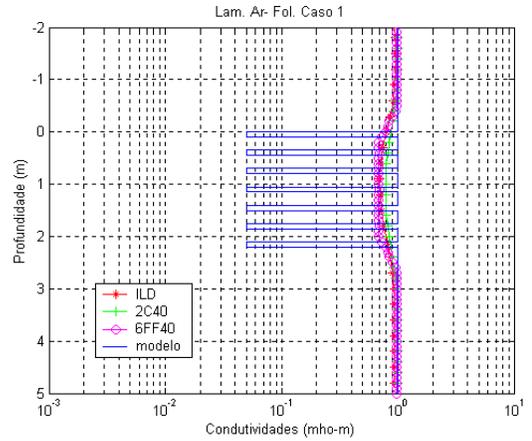


Figura 7. Intercalações Arenito – Folhelho – Caso 1.

Caso 1		
Litologia	Cond.(mho/m)	Espess.(cm)
Arenito	0.05	10
Folhelho	1	25

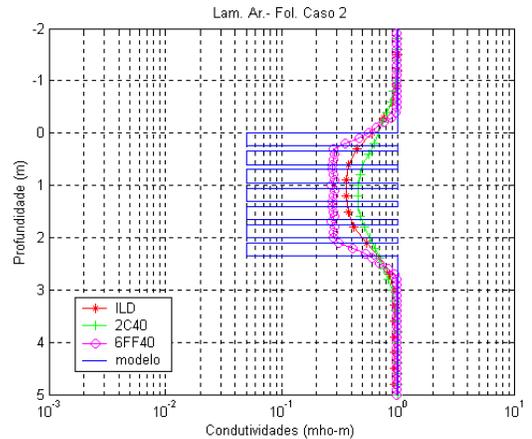


Figura 8. Intercalações Arenito – Folhelho – Caso 2.

Caso 2		
Litologia	Cond.(mho/m)	Espess.(cm)
Arenito	0.05	25
Folhelho	1	10

A partir destas figuras notamos que é impossível determinar a condutividade da formação só com um tipo de perfil. A espessura das camadas pode ser calculada a partir dos registros de micro resistividade. Notamos também que diminuindo as espessuras das camadas o valor de convergência se mantém constante nas diferentes ferramentas. Se os valores do caso 1 e 2 são graficados em unidades de condutividade como função da percentagem de arenito (Figura 9), vamos ter uma relação linear na qual a condutividade aparente ( $\sigma_a$ ) é igual à soma do produto da condutividade do arenito ( $\sigma_{ar}$ ) vezes a percentagem do em volume de arenito ( $\%ar$ ), mas a condutividade do folhelho ( $\sigma_f$ ) vezes a percentagem em volume presente ( $\%fol$ ). Assim, vamos ter a seguinte relação:

$$\sigma_a = \sigma_{ar} \cdot \%ar + \sigma_f \cdot \%fol \tag{1}$$

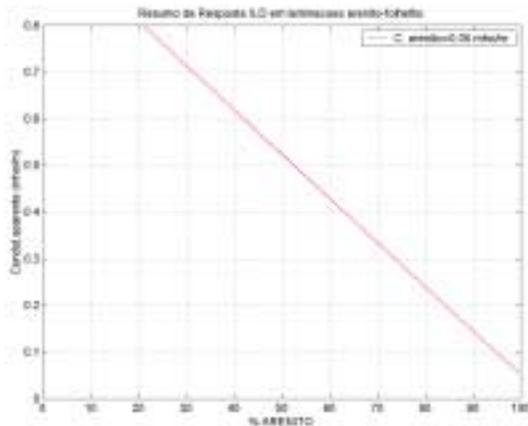


Figura 9. Resposta ILD para o arenito - folhelho

Considerou-se para estes gráficos somente as respostas da ferramenta ILD porque valores de condutividades media aparente mais próximos aos valores de convergência obtidos nos modelos.

b. Intercalações Arenito–Arenito silicificado

Esta modelagem é utilizada para caracterizar reservatórios onde as camadas finas produtoras têm maior condutividade que as camadas não produtoras. Para este tipo de reservatórios apresentamos também dois casos, o primeiro caso com a camada de arenito moderadamente silicificado com maior espessura (Figura 9) e um percentual em volume de arenito de 29 por cento. No segundo caso variamos as espessuras das camadas (Figura 10). Nestas figuras, nota-se que a baixa resolução das sondas em camadas de pequena espessura fazem com que as respostas das sondas tenham valores aproximadamente constantes assim como os valores de convergência.

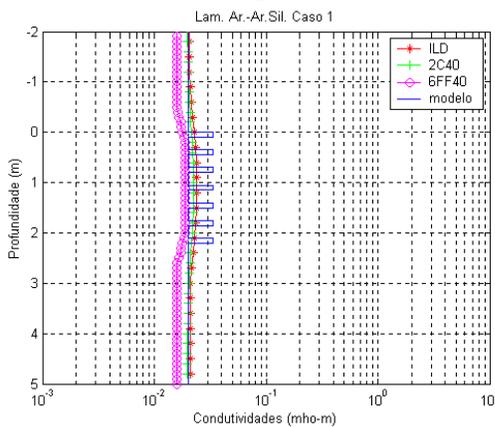


Figura 9. Intercalações Arenito–Arenito silicificado

Caso 1		
Litologia	Cond.(mho/m)	Espess.(cm)
Arenito	0.33	10
Ar, Silic.	0.2	25

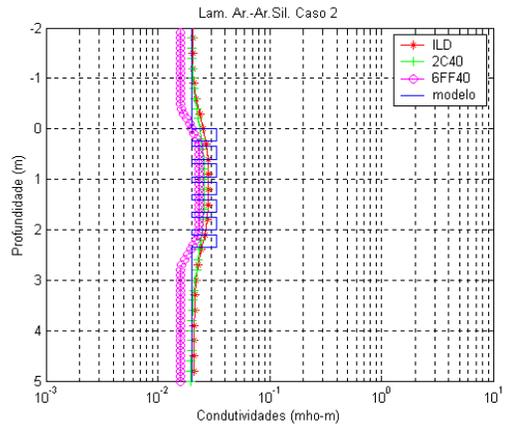


Figura10. Intercalações Arenito – Arenito silicificado

Caso 2		
Litologia	Cond.(mho/m)	Espess.(cm)
Arenito	0.33	25
Ar, Silic.	0.2	10

Fazendo o gráfico para estes dois casos, quando temos uma intercalação arenito – arenito silicificado, vamos ter a relação linear da Figura 11:

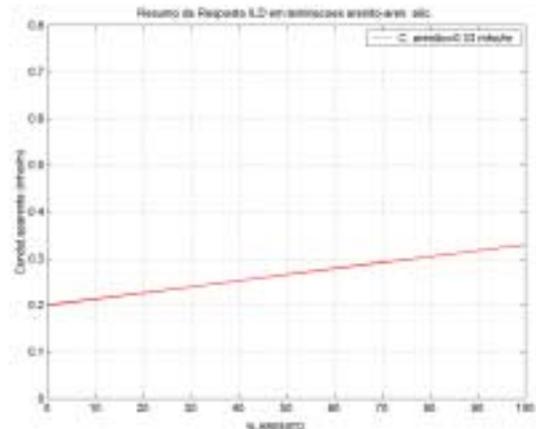


Figura 11. Resposta ILD para o arenito – arenito silicificado

c. Intercalações Arenito silicificado – Arenito – Folhelho

Este tipo de reservatório pode ser descrito como um modelo geológico onde a camada fina de arenito de interesse está entre uma camada de menor condutividade (arenito silicificado) e outra de maior condutividade (folhelho). Para este modelo simulamos dois casos. No primeiro caso (Figura 12) as camadas de arenito possuem uma espessura de 10 cm, nota-se a baixa resolução das sondas, melhorando ligeiramente com a sonda 6FF40, a qual mostra alguma sinuosidade pela influencia das camadas de maior condutividade (folhelho) e das camadas de menor condutividade (arenito silicificado).

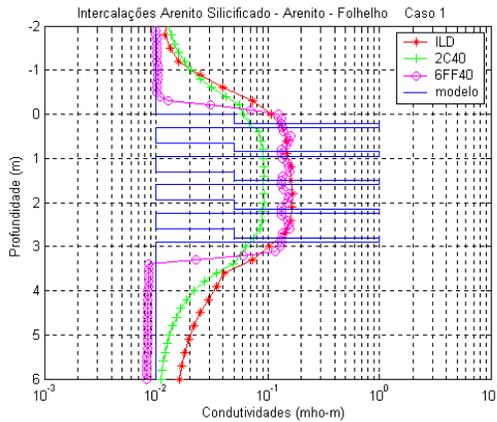


Figura 12. Intercalações Arenito silicificado – Arenito – Folhelho – Caso 1.

Caso 1		
Litologia	Cond.(mho/m)	Espess.(cm)
Ar, Silic.	0.01	35
Arenito	0.05	10
Folhelho	1	10

No segundo caso deste modelo incrementamos a espessura da camada de arenito até 35 cm, mantendo constantes os demais valores do primeiro caso (Figura 13). Para este tipo de reservatório notamos ainda a baixa resolução das sondas, aparecendo uma melhor resposta na sonda 6FF40, ao apresentar uma pequena sinuosidade. Nestes dois casos os valores de convergência das ferramentas 6FF40 e ILD estão muito perto, sendo sus valores para o caso 1 de 0.15 aproximadamente.

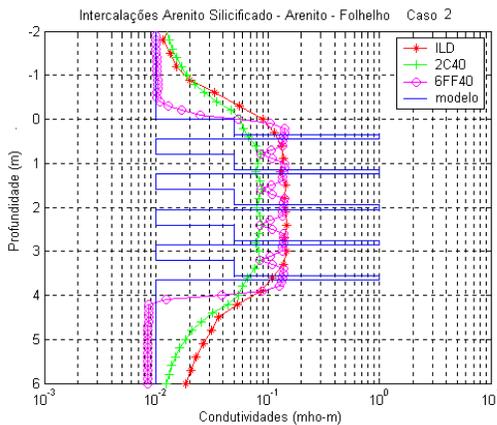


Figura 13. Intercalações Arenito silicificado – Arenito – Folhelho – Caso 2.

Caso 2		
Litologia	Cond.(mho/m)	Espess.(cm)
Ar, Silic.	0.01	35
Arenito	0.05	35
Folhelho	1	10

## Conclusões

Este trabalho mostra o comportamento das sondas de indução ILD, 2C40 e 6FF40 em reservatórios com intercalações de camadas finas. Para todos os modelos e casos apresentados, a sonda 6FF40 focalizada se caracterizou por ter uma melhor resolução na localização da posição das camadas, embora com ela não seja possível a determinação dos valores de resistividade e espessura do modelo geológico. Também observamos a partir das relações lineares que a resposta da ferramenta ILD é mas adequada para o calculo da condutividade aparente.

Também, neste trabalho testamos a eficiência do algoritmo 1D, o qual calculou os modelos testados com um tempo computacional de 3 segundos aproximadamente num PC (*Personal Computer*). Isto disponibiliza um algoritmo rápido e eficiente, o qual pode ser usado para obtenção de catálogos de correção do efeito das camadas adjacentes (*shoulder effect*), tal como fizeram *Anderson & Barber* (1988).

Finalmente na seqüência da nossa pesquisa, a efetivação deste algoritmo possibilitará a sua utilização em futuras modelagens com sondas de indução em ambientes tridimensionais, pois esta solução representa o campo primário, que não é mais do que o primeiro fator da equação integral de *Fredholm*.

## Agradecimentos

Os autores agradecem as bolsas de doutorado da UENF e de produtividade do CNPq.

## Referencias

- Allen, D.** 1984. Laminated Sand Analysis. In: SPWLA 25<sup>th</sup> Annual Logging Symposium, June, New Orleans, paper XX
- Anderson, B. & Barber, T.D.** 1988. Strange induction logs: a catalog of enviromental effects. SPWLA Twenty-ninth Annual Logging Symposium
- Andrade, A.** 1992, Deconvolução de Perfis de Poço, Tese de Mestrado, UFPA, Belém-Pará
- Ellis, D. V.** 1987. Well Logging for Earth Scientists. New York. Elsevier.
- Nabighian, M. N.** 1989. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Oklahoma, Society of Exploration Geophysicists. 972p. V.2, pt. A e B.
- Rijo, L.** 1996, Notas de aulas do curso 'Teoria dos métodos elétricos e eletromagnéticos I e II'.
- Rojas, P. A.** 1995, The Forward and Inverse Problems in Induction Logging. Ph.D these, Colorado School of Mines.
- Schlumberger,** 1972. Log Interpretation. Volume I - Principles, 113p.
- Vieira, A.** 1990, Modelamento de Perfis de Indução, Tese de Mestrado, UFPA, Belém-Pará.