

Perfil de Indução

Baseado no livro Perfilagem Geofísica em Poço Aberto de Geraldo Girão
Nery

Introdução

Desenvolvido para findar os problemas dos perfis galvânicos em poços que utilizam lama muito salgada (curto-circuito) ou isolante (sem penetração nas camadas).

Os perfis de indução funcionam por acoplamento eletromagnético entre as bobinas e as rochas, de modo a minimizar o efeito lama/poço.

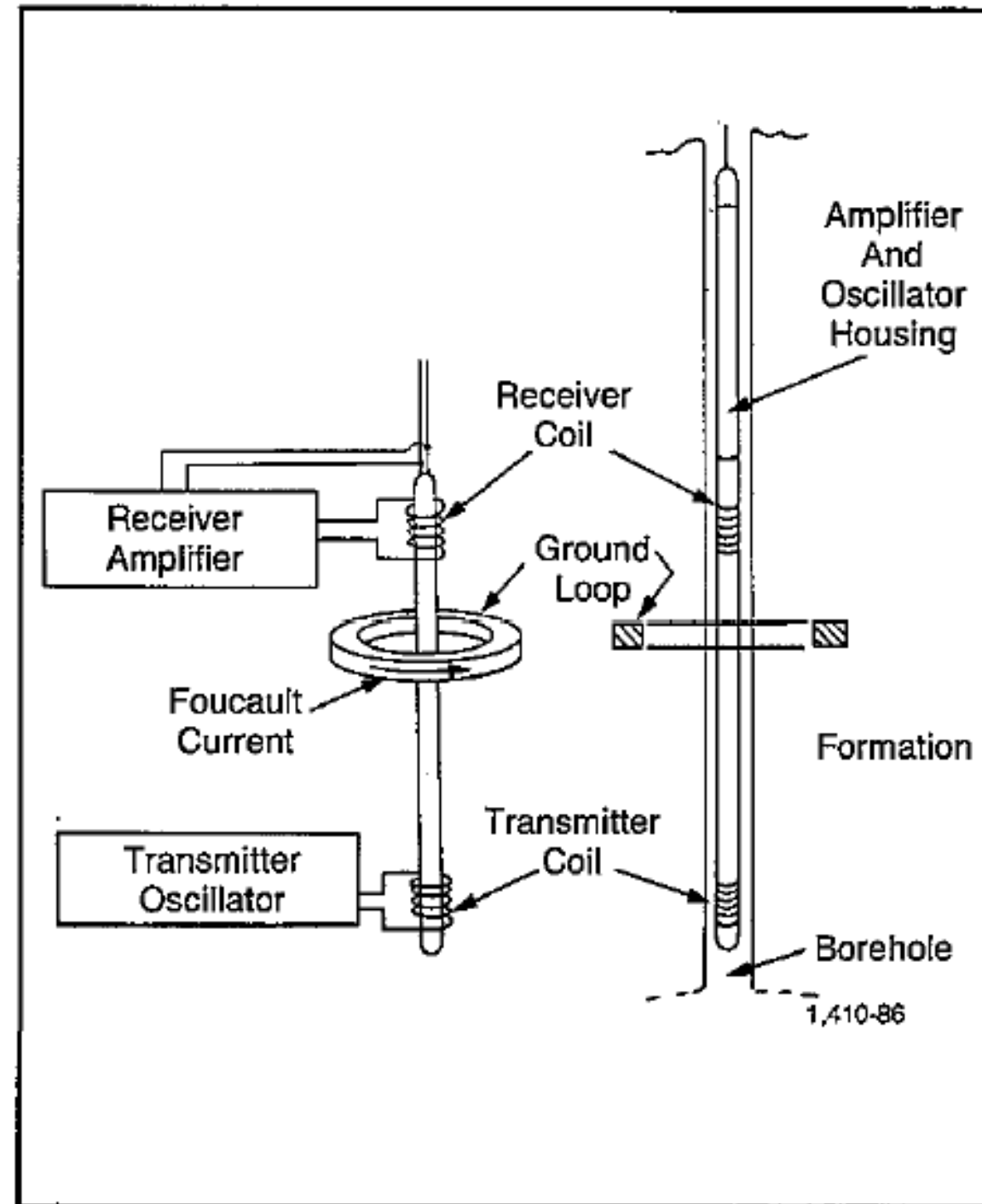
Funcionamento

- Usam-se duas bobinas coaxiais ao eixo do poço. Uma transmissora e uma receptora.
- Na transmissora circula uma corrente alternada, que gera um campo magnético alternado à sua volta.
- Este, por sua vez, gera “correntes parasitas” no interior das rochas sedimentares, chamadas correntes de Foucault.
- Estas correntes parasitas, também alternadas, geram um campo magnético secundário, defasado de 180° do primeiro, e será sentido na bobina receptora,
- assim como o campo magnético primário.
- https://phet.colorado.edu/sims/html/faradays-law/latest/faradays-law_pt_BR.html

Funcionamento

A magnitude do sinal na bobina receptora depende de:

- Permeabilidade magnética do meio no qual ocorre a indução.
- Potência da energia aplicada.
- Quantidade de voltas por unidade de comprimento das espiras.
- Distância e posição relativa entre as bobinas.



Funcionamento

- Na bobina receptora, o que difere os sinais oriundos da bobina transmissora e das camadas são a defasagem e a amplitude.
- O sinal recebido da bobina transmissora tem uma amplitude maior que o sinal vindo das camadas, além de ser defasado em 90° , enquanto o sinal das camadas é defasado em 180° .
- Não recomendado quando a camada-alvo for muito condutiva ou a lama muito salgada (> 30.000 ppm).
- Antes de descidas, as bobinas sofrem uma calibração, de modo que a contribuição da bobina transmissora é “ajustado” como 0 mV na bobina receptora, de modo que toda a contribuição que esta receba seja proveniente da condutividade das camadas.

Interpretação do Perfil de Indução

- Sobre a resposta final do perfil incidem diferentes percentuais de
- **Rm** (resistividade da lama),
- **Rxo** (resistividade da zona lavada/invadida),
- **Rs** (resistividade das camadas sobre e sotopostas) e
- **Rt** (resistividade da zona virgem), além de um erro ferramental, inerente ao próprio instrumento.

$$R = Rm + Rxo + Rs + Rt$$

Interpretação do Perfil de Indução

- Ao se usar uma lama não condutiva (a base de água doce, petróleo, gás ou ar), os termos R_m e R_{xo} tenderão a 0.
- Se a espessura da camada for maior que a distância entre as bobinas transmissora e receptora (geralmente 40 polegadas, aproximadamente 1 metro), a influência das camadas sobre e sotopostas podem ser negligenciadas ($R_s \rightarrow 0$), e sobrar na leitura do perfil apenas o que nos interessa, ou seja, R_t .

Interpretação do Perfil de Indução

- Resumindo, influem sobre a resposta final do perfil diferentes contribuições de R_m , R_{xo} , R_s e R_t , além do erro ferramental.
- Em outras palavras, afetam a medida:
 - o tipo e volume da lama,
 - o diâmetro da invasão (e, conseqüentemente, a resistividade da zona invadida),
 - a espessura da camada
 - e o erro ferramental,
 - e o intérprete deve estar apto a reconhecer o grau de complexidade relacionado a cada um dos efeitos acima.

Interpretação do Perfil de Indução

- Muito embora as ferramentas tenham algumas correções automáticas, estas admitem meios homogêneos e espessuras infinitas, o que não é realidade para a maioria das camadas atravessadas por um poço.
- Assim, estes equipamentos não são tão precisos quanto se imagina.

Limitações do Perfil de Indução

- Lama muito salgada (> 30.000 ppm)
- Invasão muito profunda (obtenção de R_{xo} ao invés de R_t).
- Rochas de altas resistividades ($> 100 \Omega.m$ – gera imprecisão do perfil). Nesse caso, devem-se usar cartas de correção fornecidas pelo fabricante.
- Camadas com espessura menor que 1,5 m e invasão radial maior que 1,5 m. Para obtenção de R_t precisamente, a camada deve ter uma espessura maior que 1,5 m e invasão radial menor que 1,5 m.

Principais Usos do Perfil de Indução

- Fornecer a resistividade verdadeira R_t das rochas.
- Determinação do fator de formação: $F = R_o / R_w = 1 / \phi^m$.
- Aproximação da saturação em água: $S_w = \sqrt{R_o / R_t}$.

Ferramentas

- A terminologia aqui utilizada será a mesma usada pela Schlumberger, pelo simples fato de ter ela o maior acervo de publicações a disposição dos clientes.
- Tradicionalmente, acoplavam-se ao perfil de Indução (IL – *induction log*), duas outras curvas: a normal curta (SN de 16 polegadas) e o SP. Esta foi a solução operacional para que a indústria de petróleo desse continuidade a seus trabalhos de correlação entre o IL e aqueles poços perfilados antes da década de 40, com os antigos mono ou multi-eletrodos. A essa configuração deu-se o nome de ***Induction Electrical Survey*** ou ***Induction Electrical Log*** (IES ou IEL).
- A parte indutiva do Elétro-Indução (IES), consta de três pares distintos de bobinas coaxiais. Duas maiores, denominadas de transmissora e receptora principais (separadas entre si por 40 pol. ou 101,6 cm), duas menores (separadas entre si por 2 pol. ou 50,8 cm), enroladas em sentido inverso das principais para minimizar o sinal de acoplamento direto e duas outras, também menores (separadas entre si por 98 pol. ou 2.5 m), para manter a corrente primária como que comprimida entre as duas bobinas principais. Esta configuração obriga a corrente primária penetrar mais profundamente nas rochas (focalização). Por possuir 6 bobinas e proporcionar uma focalização tanto vertical como radial, a ferramenta foi denominada de 6FF40 e sua leitura é referenciada como **RILD** (R de resistividade, IL de *induction log* e D de *deep*).

Ferramentas

- Na segunda geração tem-se o **Duplo-Indução**, constituída por um sistema 6FF40 acoplado a um outro de igual resolução vertical, porém com menor espaçamento entre as bobinas. Esta aproximação entre bobinas diminui a investigação radial em relação à 6FF40, por isto a curva foi denominada de indução média (**RILM**). Ambos os jogos de bobinas, a profunda e a média são totalmente independentes e individualizados por frequências distintas. Acopla-se, ainda, uma terceira ferramenta de investigação ainda mais rasa que a RILM, geralmente uma Micro Esférica-Focalizada (RMSFL). O uso das frequências distintas e da RMSFL, proporciona profundidades (e volumes) de investigação também distintos, de modo a se medir, com precisão, a resistividade das zonas invadida (Rxo) e verdadeira (Rt), além de se obter o diâmetro de invasão (Di).

Ferramentas

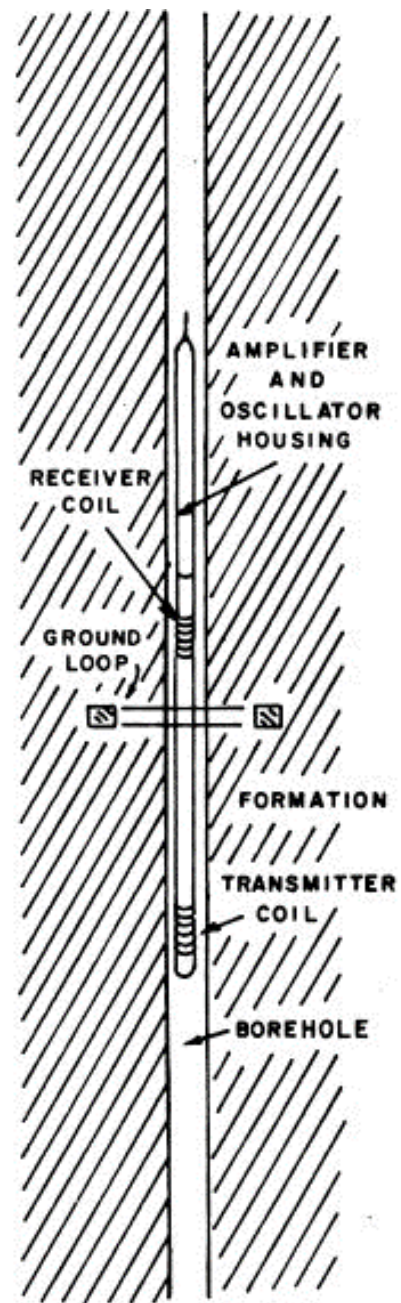
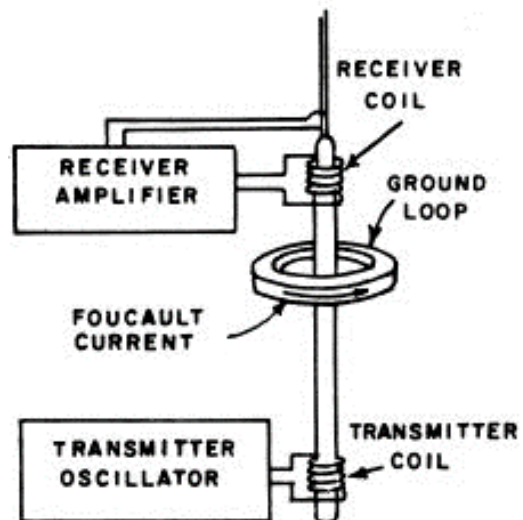
- As ferramentas da terceira geração (**Phasor** ou **Indução de Alta Resolução – HRI**, da Halliburton), foram desenvolvidas no final da década de 80, pela necessidade de as ferramentas anteriores necessitam de correções para minimizar os efeitos ambientais e camadas adjacentes (SBR - Shoulder Bed Resistivity). Embora tais correções sejam possíveis de serem realizadas manual ou computacionalmente, elas se originam na não linearidade do sinal recebido pelas bobinas, devido ao ou efeito de propagação. Tais ferramentas, nada mais são do que versões melhoradas do Duplo-Indução, operando com frequências de 10, 20 ou 40 kHz e medindo as componentes em fase e em quadratura do sinal, o que permite melhoria na correção do efeito de propagação. As ferramentas IL e DIL, registram somente o sinal real, ou resistivo, que chega a bobina receptora, descartando eletronicamente (inversão de fase) a componente reativa ou em quadratura. O sinal resistivo é devido à própria formação ao passo que o reativo resulta do acoplamento entre as bobinas, ou seja, da impedância reativa causada pelos indutores (bobinas) e capacitores do sistema ferramenta/formação. Além do mais, elas passam por um processamento de deconvolução não linear do sinal, corrigindo as leituras em tempo real, pelo efeito SBR e camadas finas (resolução em espessura de até 2 pés). O referido processamento reduz bastante o erro ferramental, proporcionando leituras bem mais confiáveis de resistividades.

Ferramentas

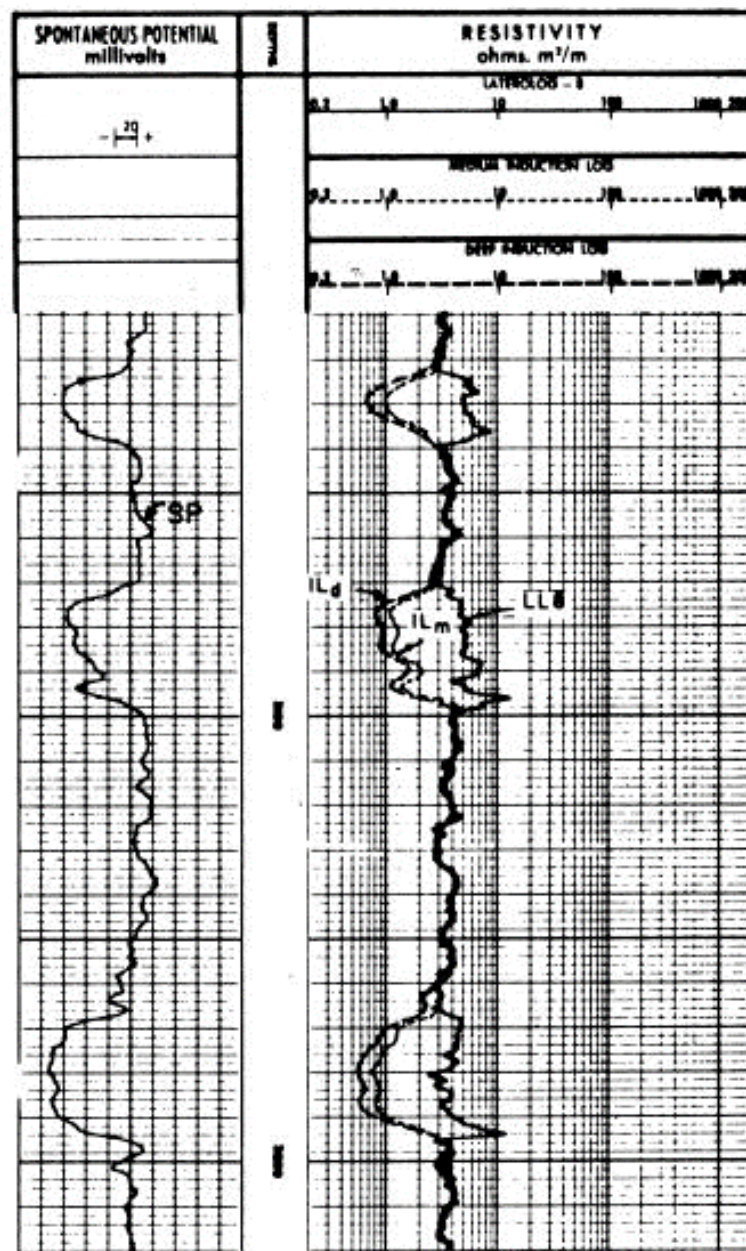
- A quarta geração veio com a ferramenta de **Imagens Resistivas – AIT**, na qual um transmissor de 3 frequências e 8 receptores mutuamente balanceados, realizam 28 leituras diferentes, em intervalos de 3 polegadas, que são corrigidas em tempo real pelo efeito do poço. Um processamento combina as 28 leituras para a produção de 5 curvas com profundidades de investigação variando entre 10, 20, 30, 60 e 90 polegadas, a partir do centro do poço. Pelo fato de lerem radialmente distâncias variáveis é possível se observar às heterogeneidades laterais das camadas. Como tais curvas têm uma mesma resolução vertical, elas podem ser apresentadas como tendo sido realizadas com 1, 2 ou 4 pés para melhor definição de camadas finas. Processamento mais avançado permite visualizar o comportamento da invasão em dimensões de resistividade, de forma radial e volumétrica (Schlumberger,1992).

Ferramentas

- Por volta de 2000 a Baker Atlas (Mollison et al, 2001), anunciava a introdução comercial do **3DEX (3D Explorer Induction Logging Service)**, como sendo a primeira ferramenta capaz de proporcionar medidas das resistividades horizontais e verticais, independentemente do desvio do poço e mergulho da formação. Ela consta de 3 transmissores e 3 receptores mutuamente ortogonais, medindo a componente axial do campo magnético paralelo ao eixo do poço (H_{zz}) e as transversais perpendiculares ao poço (H_{xx} e H_{yy}). Adicionalmente, dois outros componentes cruzados (H_{xy} e H_{xz}), para mapeamento de anisotropias de condutividades (o primeiro índice representa a direção do dipolo transmissor e o segundo a direção do dipolo receptor). Em poço vertical H_{zz} é sensível às resistividades horizontais das camadas, enquanto que H_{xx} e H_{yy} são sensíveis tanto as horizontais como as verticais.
- Devido à tradição do uso da resistividade nas interpretações dos perfis elétricos, o equipamentos indutivos realizam a conversão das condutividades em resistividades, compatibilizando as unidades em, respectivamente, Ohm.m e mS/m.



(a)



(b)

