

# UMA ANÁLISE TEÓRICA SOBRE O MÉTODO DA POLARIZAÇÃO INDUZIDA E SUAS APLICAÇÕES NA GEOFÍSICA.

VINÍCIUS CRESTANELLO<sup>1</sup>, SAUL SOARES SALES<sup>1</sup>  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - UFPA<sup>1</sup>

Copyright 2023, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation during the 18<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 16-19 October 2023.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 18<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent 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

This paper addresses the Induced Polarization (IP) method in applied geophysics. Electrical methods, such as resistivity, IP, and Spontaneous Potential (SP), utilize electrical parameters to investigate subsurface geology. Resistivity is an important property controlled by rock porosity. The IP method measures voltage variations after interrupting the electrical current, revealing charge concentrations in the subsurface. Measurements can be performed in the time or frequency domain. IP equipment is used in arrangements such as Schlumberger and Wenner, allowing for resistivity profiling to map subsurface structures. Applications include identifying mineralizations and analyzing heterogeneities in subsurface layers.

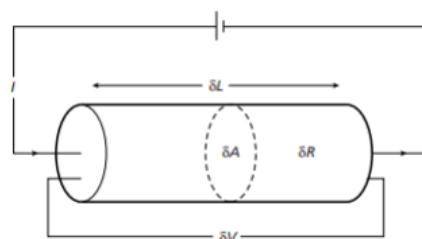
## Introdução

Dentro da geofísica aplicada existem diversos métodos para estudos de prospecção e dentre esses estão os métodos elétricos que são divididos nas seguintes categorias método da resistividade, da Polarização Induzida (IP) e do Potencial Espontâneo (SP), que utilizam os parâmetros elétricos dos solos e rochas, como condutividade, resistividade, potencial espontâneo, polarização, para investigar a geologia de subsuperfície. Alguns fazem uso de campos dentro da Terra enquanto outros requerem a introdução de correntes geradas artificialmente no solo. Neste trabalho iremos abordar especificamente o método da Polarização Induzida (IP).

## Fundamentos Teóricos

A condutividade/resistividade é a principal propriedade física, quando falamos nos métodos elétricos. A resistividade de um material é definida como a resistência em ohms entre as faces opostas em cubo unitário do material. Segundo Kearey, P. (1988), para um cilindro condutor de resistência  $\delta R$ , comprimento  $\delta L$  e área da seção transversal  $\delta A$  (Fig. 1) a resistividade  $\rho$  é dada por:

$$\rho = \frac{\delta R \delta A}{\delta L}; (1)$$



**Figura 1:** Parâmetros usados na definição de resistividade (Kearey, P, 1988).

A resistividade é uma das mais variáveis propriedades físicas certos minerais, como metais nativos conduzem eletricidade através da passagem de elétron. A maioria dos minerais formadores de rocha são, no entanto, isolantes, e a corrente elétrica é conduzida através de uma rocha principalmente pela passagem de íon nas águas dos poros. Assim, a maioria das rochas conduzem eletricidade por um processo eletrolítico em vez de um processo eletrônico. Conclui-se que a porosidade é o principal controle de resistividade das rochas, e a mesma geralmente aumenta à medida que a porosidade diminui (Kearey, P, 1988). Porém a condutividade/resistividade não pode ser levada como um parâmetro para diagnosticar o tipo de rocha que se encontra em subsuperfície. Devido à grande variação nas faixas de condutividade/resistividade das rochas e minerais O método de polarização induzida (IP) se baseia na medição das variações de voltagem em função do tempo ou da frequência (Telford et al.,1990). Ele é medido quando a corrente que circula no solo é interrompida, após a interrupção da corrente, a tensão entre os eletrodos M e N não cairá imediatamente para zero. No processo de atenuação para zero, várias partes do subsolo podem ter uma concentração de carga, e esses locais tendem a retornar à posição original, e o sinal indicado pelo voltímetro é muito fraco. Durante alguns segundos ou minutos (dependendo da geologia), uma determinada fração da voltagem inicial permanece no terreno enquanto as concentrações de carga são dissipadas e nesse momento é medida a polarização induzida. O parâmetro utilizado para medir a IP é a Cargabilidade aparente (Ma) que pode ser expressa em milivolt/volt (mV/V) quando se utiliza IP no domínio frequência e em milissegundos (ms) no domínio tempo.

Durante as aferições de medidas no método de IP a corrente é aplicada à terra por meio de dois elétrodos de corrente, e o efeito de polarização induzida é medido entre dois elétrodos potenciais (REYNOLDS, 1997). As medidas do método da polarização induzida (IP), podem ser realizadas tanto no domínio do tempo quanto no domínio

da frequência. Em um tipo de detector IP o decaimento da voltagem é medido como uma curva em função do tempo em vários intervalos. Este procedimento é denominado de IP domínio do tempo. Devido ao tempo ser também finito, a resistividade aparente ( $\rho_a$ ) varia com a frequência, decrescendo com o aumento desta. Então medições de  $\rho_a$  em duas ou mais frequências, geralmente abaixo de 10 Hz, constitui outro método de detecção, denominado de IP domínio da frequência (SIQUEIRA NETO, 2015).

Sendo que no domínio do tempo a medição do efeito de Polarização Induzida no domínio do tempo consiste em analisar o decaimento temporal da voltagem que é gerado após o desligamento dos pulsos de corrente injetados no solo (REYNOLDS, 1997) e já no domínio da frequência. A forma mais simples de medir o efeito IP com o equipamento domínio do tempo é comparar a voltagem residual ( $V(t)$ ) existente em um tempo ( $t$ ) após o corte da corrente, com a voltagem inicial ( $V_c$ ) emitida durante o intervalo de fluxo de corrente. A voltagem residual ( $V(t)$ ) deve ser medida antes que tenha decaído ao nível do ruído. Devido ao fato de ( $V(t)$ ) ser muito menos que  $V_c$ , a relação ( $V(t)/V_c$ ) é expressa como milivolt por volt, ou como uma porcentagem. O intervalo de tempo  $t$  deve variar entre 0.1 e 10 s. (Telford et al., 1990)

Já domínio da frequência ou método da frequência variável, as medidas de resistividade aparente são realizadas para (no mínimo) duas frequências distintas e menores que 10Hz, para eliminar efeitos de acoplamento indutivo (HALLOF, 1964). Para este método no domínio da frequência há dois tipos de medições comumente realizadas, o efeito de frequência (Efeito de Frequência e Porcentagem de Efeito de Frequência) e o fator metal (FM). O Porcentagem de Efeito de Frequência é definido como a diferença normalizada entre a resistividade medida em duas frequências diferentes. O efeito de frequência é normalmente definido como:

$$EF = \frac{\rho_{a0} - \rho_{a1}}{\rho_{a1}}; \quad (2)$$

E a porcentagem de efeito de frequência é dada por:

$$PFE = 100 \left( \frac{\rho_{a0} - \rho_{a1}}{\rho_{a1}} \right); \quad (3)$$

Onde  $\rho_{a0}$  e  $\rho_{a1}$  são as resistividades aparentes para a frequência menor e maior, respectivamente.

O Fator Metal também é utilizado no método Polarização Induzida no domínio da frequência. Normaliza-se o Porcentagem de Efeito de Frequência com relação às resistividades de frequências mais baixa, e com isso, remove em parte, a variação do efeito Polarização. Mostra-se um parâmetro mais diagnóstico na detecção de corpos de mineralização disseminada na equação:

$$FM = EF \left( \frac{A}{\rho_{a0}} \right) = \frac{A(\rho_{a0} - \rho_{a1})}{\rho_{a0} \cdot \rho_{a1}}; \quad (4)$$

A expressão do fator metal é comumente representada em termos da condutividade, tendo em vista que a condutividade ( $\sigma$ ) é o inverso da resistividade. Representada a seguir:

$$FM = A \left( \frac{1}{\rho_{a0}} - \frac{1}{\rho_{a1}} \right) = A(\sigma_{a0} - \sigma_{a1}); \quad (5)$$

### Metodologia

A Sondagem Elétrica Vertical conhecida como SEV, nos permite analisar uma seção vertical de variação de resistividade. Esta técnica consiste em injetar ao solo uma corrente elétrica através de dois eletrodos (A e B) e medir a diferença de potencial entre dois outros pontos (M e N) localizados entre os pontos de corrente. A partir da corrente, diferença de potencial e do fator geométrico (função das distâncias entre os pontos de injeção de corrente e de medidas de potencial) determina-se a resistividade aparente do meio, através da equação apresentada em Bhattacharya & Patra (1986):

$$\rho_a = \left( \frac{\Delta V}{I} \right) k; \quad (6)$$

$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}}; \quad (7)$$

Onde:  $\rho_a$  = resistividade aparente;  $\Delta V$  = diferença de potencial;  $I$  = corrente elétrica;  $AM$  = distância entre os eletrodos A e M;  $AN$  = distância entre os eletrodos A e N;  $BM$  = distância entre os eletrodos B e M; e  $BN$  = distância entre os eletrodos B e N.

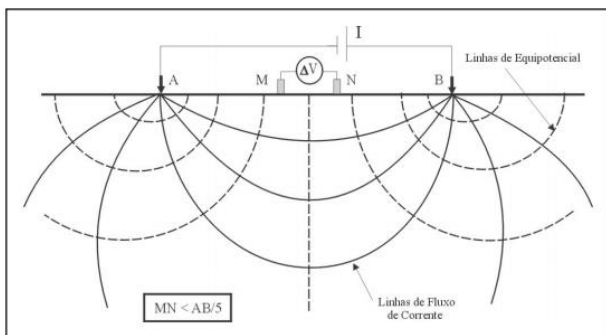
A técnica do caminhamento elétrico é baseada na análise e interpretação de parâmetros físicos, que são obtidos por meio de medições na superfície do solo, investigando, ao longo de uma seção, sua variação na horizontal, a uma ou mais profundidades determinadas. Os resultados obtidos são correlacionados via mapas (em uma ou mais profundidades determinadas) ou de seções (com diferentes profundidades de investigação - vários níveis do mesmo).

Na configuração polo-dipolo, um eletrodo é posicionado como um polo fixo no solo, enquanto outro eletrodo é movido em diferentes posições de dipolo. A corrente elétrica é injetada no eletrodo fixo (polo) e a diferença de potencial é medida no eletrodo móvel (dipolo). Esse arranjo permite obter informações sobre a distribuição de resistividade do subsolo ao longo da linha de dipolos, proporcionando uma visão mais detalhada da estrutura subsuperficial.

Já na configuração dipolo-dipolo, são utilizados dois conjuntos de eletrodos, sendo um conjunto para a injeção de corrente e outro para a medição de diferença de potencial. A distância entre os eletrodos é variada, o que

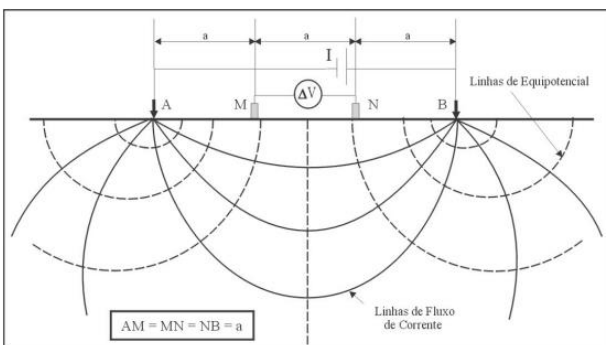
permite explorar diferentes profundidades e configurações subsuperficiais. Essa configuração oferece uma maior flexibilidade para investigar diferentes áreas de interesse e pode fornecer informações valiosas sobre a heterogeneidade e a geometria das camadas do subsolo.

O arranjo Schlumberger é amplamente usado em sondagens eletrônicas devido à qualidade das curvas de campo, facilidade e rapidez na execução do ensaio, além de menor suscetibilidade a variações laterais de resistividade e ruídos. Ele utiliza quatro elétrodos alinhados no terreno: dois para corrente (A e B) e dois para medição de potencial (M e N). A distância MN é mantida pequena em relação a AB, obedecendo a  $MN \leq AB/5$ . Quando o sinal enfraquece, aumenta-se MN e realizam-se medidas com diferentes distâncias AB. Esse procedimento, chamado de “embreamagem”, permite verificar a qualidade dos dados obtidos durante o processo de campo.



**Figura 2:** Esquema de arranjo Schlumberger. Fonte: USP. (2020). Método da polarização induzida – IP.

Já no arranjo Wenner como no Schlumberger, utiliza os elétrodos AB de emissão de corrente e MN de medida de potencial, dispostos no terreno seguindo uma linha reta. Sua diferença está na distância entre os elétrodos, que é igual entre todos (distância “a”) para todas as medidas de ensaio (Figura 3). Em prática, a cada nova leitura todos os elétrodos são afastados do centro do arranjo, mantendo entre eles uma mesma distância “a”.



**Figura 3:** Arranjo Wenner. Fonte: USP. (2020). Método da polarização induzida – IP

Segundo Orellana (1972), uma desvantagem do Wenner em relação ao Schlumberger é que, no Wenner todos os elétrodos são movidos simultaneamente, não é possível a realização de embreamagem. Tornando o arranjo Wenner

suscetível ao efeito de heterogeneidades laterais em camadas superficiais, isto podendo ser evitado com a embreamagem.

O equipamento IP é semelhante ao de resistividade, mas usa corrente cerca de 10 vezes maior. Pode ser mais volumoso e elaborado. As configurações dipolo duplo, polo-dipolo e Schlumberger são as mais efetivas. Os espaçamentos variam de 3 a 300m, sendo os maiores usados para levantamentos de reconhecimento. Vários pares de elétrodos de corrente podem ser usados, conectados a um gerador via dispositivo liga-desliga. Os caminhamentos são feitos sobre a área de interesse, indicando as leituras IP no ponto médio do arranjo de elétrodos.

Os equipamentos de IP também medem resistividade simultaneamente, pois os dados são os mesmos usados para calcular a resistividade. No domínio do tempo, uma unidade de emissão de corrente elétrica é acoplada a um gerador e uma unidade receptora capta as tensões geradas, compensa o potencial espontâneo e sincroniza automaticamente através dos elétrodos. No domínio da frequência, há unidades de emissão e recepção trabalhando em corrente alternada de frequência baixa. Podem operar em diferentes frequências, entre 0,1 e 10 Hz, e possuem dispositivos para eliminar frequências indesejadas.



**Figura 4:** conjunto transmissor TSQ-3 (transmissor + gerador) de 3 KW de potência e IPR-12 digital da Scintrex. Fonte: USP. (2020). Método da polarização induzida – IP

## Resultados e Aplicações

Com método IP devido em suas principais técnicas de aplicação sendo elas a SEV, CE, Wenner, Schlumberger, Dipolo-Dipolo e Polo-Dipolo temos as seguintes aplicações para cada uma:

SEV: • Determinação da espessura das camadas litológicas; • Determinação da profundidade do topo do embasamento cristalino; • Definição do nível do lençol freático; • Parametrização do perfil de um poço já construído; • Ensaio de resistividade do solo.

CE: • Prospecção mineral; • Prospecção de água subterrânea; • Estudos ambientais. • Identificação de cavernas; • Mapeamento de falhas e fraturas

Wenner: • amplamente usada para investigar a estrutura subsuperficial. • Efetiva na caracterização de camadas horizontais e uniformes. • Aplicada em estudos geotécnicos, mapeamento de aquíferos e detecção de contaminação do solo.

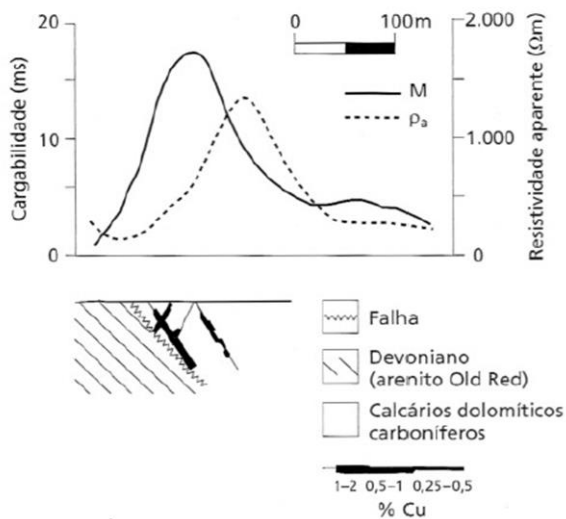
Schlumberger: • comumente utilizada em estudos de resistividade em sondagens geofísicas. • Eficiente para investigar a subsuperfície em profundidades maiores. • Oferece melhor resolução vertical e caracterização de estruturas geológicas complexas.

Dipolo-Dipolo: • altamente versátil. • Permite explorar diferentes profundidades e configurações subsuperficiais. • Fornece informações valiosas sobre a heterogeneidade e geometria das camadas do subsolo.

Polo-Dipolo: • ideal para mapear propriedades elétricas do subsolo ao longo de uma linha de dipolos. • Oferece uma visão detalhada da estrutura subsuperficial. • Aplicada em estudos de engenharia geotécnica, investigações de água subterrânea e mapeamento de estruturas geológicas.

### Exploração de Metais

O método IP é amplamente utilizado na exploração de metais básicos devido à sua alta eficácia em encontrar depósitos de minério de baixo teor, como sulfetos disseminados. Esses depósitos possuem um efeito IP significativo, mas não são condutores e, portanto, não podem ser prontamente detectados pelos métodos eletromagnéticos. O IP é, de longe, o método geofísico mais efetivo para identificar esses alvos.



**Figura 5:** IP Domínio do tempo, arranjo polo-dipolo sobre uma jazida de cobre e prata, Irlanda. (Baseado em Seigel, 1967). Fonte: KEAREY, P., & BROOKS, I. M. **Geofísica de exploração.** Cap. 8, 347p, Figura 8.34.

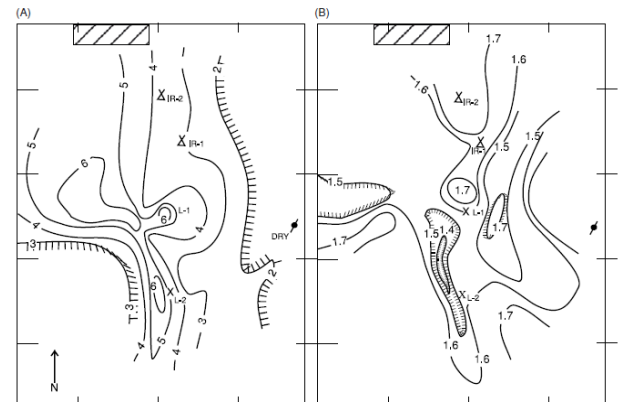
Exemplificando a figura 5, ilustra o perfil de cargabilidade obtido por meio de um levantamento IP no domínio do tempo, utilizando um arranjo polo-dipolo, em um corpo de minério de cobre e prata na Irlanda. Apesar do baixo teor do depósito, com menos de 2% de metais condutores, a anomalia de cargabilidade é bem definida e está

concentrada no corpo do minério. Por outro lado, o perfil de resistividade aparente correspondente reflete o alto contraste de resistividade entre o arenito e o calcário, não apresentando nenhuma indicação da presença da mineralização.

### Água Subterrânea

Em relação a investigações de água subterrânea, Vacquier et al. (1957) foram os primeiros a utilizar a polarização induzida para estudos hidrogeológicos e descreveram dois casos relevantes. O primeiro ocorreu próximo a Carrizozo, no Novo México, em um vale delimitado pela Sierra Blanca, composto por rochas vulcânicas que fornecem água potável. Ao norte e oeste, os sedimentos cretáceos do Vale de Tularosa contaminam as águas subterrâneas com cloretos e gesso, tornando-as impróprias para consumo. Figura 6A, é apresentado como a evidência de um canal enterrado, com proporções mais altas associadas a materiais de granulação fina.

Esses exemplos demonstram que, para a IP no domínio do tempo, os mapas de razão de sobretensão para dois tempos diferentes podem proporcionar uma resolução mais clara de corpos d'água subterrâneos em comparação aos mapas de sobretensão para um único tempo. No entanto, embora o IP possa fornecer uma interpretação útil dos corpos de água, é o método de campo menos prático em comparação com os modernos métodos de indução eletromagnética. Isso pode explicar a falta de exemplos recentes do uso desse método em investigações desse tipo.



**Figura 6:** mapas de A) sobretensão de polarização induzida após 10s (contornos em intervalos de 1 mV/V), e B) na proporção de dados IP após 5s e 10s após o desligamento da corrente, sobre um aquífero de vale enterrado próximo a Carrizozo, Novo México, EUA. Fonte: Vacquier et al. (1957).

### Conclusão

A polarização induzida é uma técnica eficiente e valiosa na geofísica, permitindo a caracterização detalhada do subsolo e a identificação de estruturas geológicas. Sua capacidade de fornecer informações de alta resolução espacial, juntamente com sua natureza não invasiva, torna-se uma ferramenta poderosa para estudos geofísicos voltados principalmente para a identificação de

estruturas características de água subterrânea e principalmente para identificação de lençóis freáticos, assim como estudos voltados a área ambiental, caracterizando e identificando pontos de contaminação em subsuperfície.

### Agradecimentos

Agradecimento em especial ao GMAG -UFPA pela infraestrutura cedida para a construção deste trabalho.

### Referências

BHATTACHARYA PK & PATRA HP. 1986. Direct Current Geoelectric Sounding. Elsevier Publishing Company, New York, 134 p.

Gallas, J. D. F., Taiolo, F., Filho, W. M., Prado, R. L., Dourado, J. C. 2001. Métodos e técnicas geoeletricas rasas na delimitação de área afetada por ruptura em teto de túnel urbano. Brazilian Journal of Geophysics, 19(1): 33-46

Gomes Junqueira, P., & Moreira, C. A. (2017). ESTUDO DE ÁREA CONTAMINADA POR HIDROCARBONETOS POR APLICAÇÃO DO MÉTODO POLARIZAÇÃO INDUZIDA. Águas Subterrâneas. Recuperado de <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28701>

HALLOF, P. G. (1964). A comparison of the various parameters employed in the variable frequency induced-polarization method. Geophysics.

Kearey, P., M. Brooks, and Ian Hill. An Introduction to Geophysical Exploration. Malden, MA: Blackwell Science, 2002.

REYNOLDS, J. M. (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. Chichester John Wiley and Sons Ltd.

Siqueira Neto, Antonio Carlos de Utilização de métodos geoeletricos na caracterização de célula experimental no aterro de resíduos urbanos Delta A em Campinas – SP / Antonio Carlos de Siqueira Neto; Orientador: Vagner Roberto Elis. São Paulo, 2015

SUMNER, J.S. – 1976 – Principles of Induced Polarization for Geophysical Exploration. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 227p

Teixidó T. 2012. The Surface Geophysical Methods: a useful Tool for the Engineer. Elsevier. 1st International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate Industry. Procedia Engineering. 46. 89 – 96.

Telford, W. M.; Geldart, L. P. & Sheriff, R. E.; Applied Geophysics. Cambridge University Press, 1990.

USP. (2020). Método da polarização induzida – IP. Disponível em: < Método da Polarização Induzida - IP (usp.br) > 1-18p. Acesso em: 25 de abril de 2023.

KEMNA, A., BINLEY, A. and SLATER, L. (2004) Crosshole IP Imaging for engineering and environmental applications. Geophysics, 69: 97–107. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1649379>

Vacquier, V., Holmes, C. R., Kintzinger, P. R. & Lavergne, M., 1957. Prospecting for groundwater by induced electrical polarization, Geophysics, 22:660-687.