



Sistema de prospecção geofísica pelo método Eletromagnético Indutivo (EM) com aplicações no Sítio Controlado do IAG/USP

Hugo F. Saar^{1,2}, Francisco Y. Hiodo¹, Nilton Silva¹, Kleiton Blaine¹, Edgar Bronizeski¹, André Rugenski¹, Jorge L. Porsani¹ & Welitom R. Borges¹

¹ IAG-USP. Tel.: (11) 3091 2847. Fax.: (11) 3091 5034. E-mail: francisc@iag.usp.br

Copyright 2005, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility 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

An electromagnetic equipment operating in frequency domain was developed to prospect shallow conductive targets, as found in hydrogeological and archaeological surveys. Using low magnetic induction number concepts and lock-in circuits, it became possible to characterize conductors and ferromagnetic materials buried in subsurface, using the dipole electromagnetic profiling method. To achieve this end, in phase and quadrature signals due secondary magnetic fields detected by receiver coil allowed to recognize many kinds of buried conductors like pipes, metal drums. System consisting by two horizontal air cored coils (transmitter & receiver) fixed in both edges of a PVC tube, and intercoils spacing is 4 meters. Operating frequency is around 10kHz and primary magnetic field is generated by a PWM power source associated with a serie LC resonant circuit. The effective depth of investigation is about 5 meters. A rotatory mechanism allows measurements in HCP and VCP coils configurations. One great advantage of this detector using induction balancing is that surveys can be carried out in regions with high surface electrical resistivity such as asphalt and sand. Measurements realized on Sítio Controlado da Geofísica Rasa- IAGUSP showed that system has good resolution and can operates in urban area of high cultural noise.

Keywords: dipole electromagnetic profiling method, hydrogeological and archaeological surveys, synchronous detection, Sítio Controlado da Geofísica Rasa-IAGUSP.

Introdução

Neste trabalho foi desenvolvido um equipamento de prospecção eletromagnética (EM) no modo indutivo para aplicações em Geofísica rasa, usando o conceito de número de indução baixo. Pela medida das componentes em fase e quadratura do campo magnético secundário, gerado pelas correntes elétricas (*eddy*) em subsuperfície, pode-se determinar as condutividades elétricas das camadas geológicas ou localizar quaisquer objetos

metálicos enterrados, como tambores, canos, etc. Os alvos ferromagnéticos podem ser identificados pela presença da componente em fase do campo secundário.

O sistema construído opera no domínio da frequência e está fundamentado no método introduzido por Sundberg (1910). Este equipamento desenvolvido para localização de alvos condutores rasos é de fácil transporte, sendo ideal para trabalhos em lixões, aterros sanitários, Geotecnia e em Arqueologia.

A condutividade elétrica é calculada usando o conceito de número de indução baixo, e determinando-se a razão dos campos Secundário (Hs) pelo primário (Hp) medidos na bobina receptora; sendo o campo primário (Hp) gerado na bobina transmissora. As bobinas transmissora e receptora estão fixadas nas extremidades opostas de uma haste de 4 m, em cujo centro estão dispostos os circuitos eletrônicos utilizados. Todo o conjunto desloca-se paralelamente a uma distância de 50 cm do solo. Desta forma, o equipamento desenvolvido permite medidas contínuas das componentes em fase e em quadratura do campo magnético secundário (método do caminhamento eletromagnético). A haste que sustenta as bobinas transmissora e receptora pode direcionar simultaneamente os eixos das bobinas tanto na vertical HCP como na horizontal VCP, em relação ao solo.

Durante o projeto foram desenvolvidos circuitos eletrônicos de geração e de medidas de campos magnéticos variáveis no tempo. O sistema receptor é capaz de detectar e medir o campo magnético principal e as componentes em fase e em quadratura do sinal secundário, tendo por base um sinal de referência originado no próprio circuito transmissor. A separação das componentes em fase e em quadratura é feita com a utilização de um circuito demodulador síncrono, também denominado detector sensível a fase (DSF), multiplicador de 4 quadrantes ou *lock-in*. O sistema de transmissão gera inicialmente um sinal de configuração quadrada através de amplificador de potência, alimentado por um conversor 12VDC(entrada)- ±20 VDC(saída) operando no modo chaveado PWM (pulse width modulation). Portanto o sinal de saída do amplificador, construído com transistores complementares, pode alcançar tensão de 40 VAC (pico a pico). Este sinal é aplicado a um circuito LC série ressonante, onde a indutância L é a própria bobina transmissora. Portanto tem-se um campo magnético de configuração senoidal, em fase com o sinal quadrado original. Esta condição de fase é válida somente na condição de ressonância.

Um teste final foi realizado no Sítio Controlado da Geofísica Rasa SCGR do IAG/USP (Porsani et al.,

2004) e, com sucesso, foram localizados todos os alvos metálicos enterrados.

Futuramente, o cálculo da condutividade elétrica será feito em tempo real com o uso de um microcontrolador ATMEEL AT8295S da família 8051, programado em C, que efetua a divisão algébrica dos valores de H_s e H_p citados, multiplicando o resultado com um valor constante, fixado para o equipamento. Os valores calculados serão gravados nas memórias não voláteis tipo flash do microcontrolador, para serem transferidos para notebook, via comunicação serial.

O método de Sundberg

O princípio da indução eletromagnética (método EM) proposto por Karl Sundberg (Sundberg, 1936) é mostrado na figura 1.

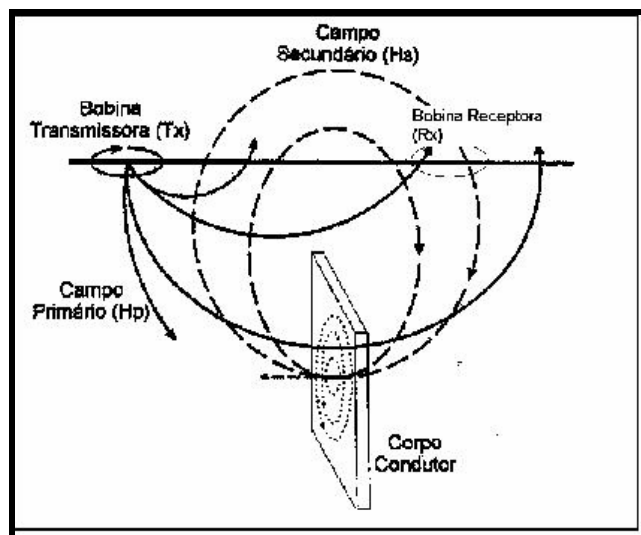


Figura 1 – Método da indução eletromagnética em alvos condutores. (Modificada de Marcolino, 2000)

O campo magnético resultante na bobina receptora Rx é a soma vetorial dos campos magnéticos primário (H_p) e secundário (H_s). Na prática, a corrente elétrica percorrendo a bobina transmissora gera um campo magnético primário senoidal em todo o espaço. Ao atingir materiais condutores, este campo induz uma diferença de potencial alternada (f.e.m) na mesma frequência do campo primário na região do condutor, de acordo com a lei de Faraday. A f.e.m estará sempre defasada do campo magnético primário (senoidal) que a induziu por um ângulo de 90° .

A f.e.m gera então uma alternância no potencial elétrico do condutor, que movimentará cargas elétricas (corrente elétrica) em seu interior, gerando assim o campo magnético secundário presente na superfície.

O comportamento dos campos magnéticos presentes é facilmente visualizado através do diagrama de fasores mostrado na figura 2.

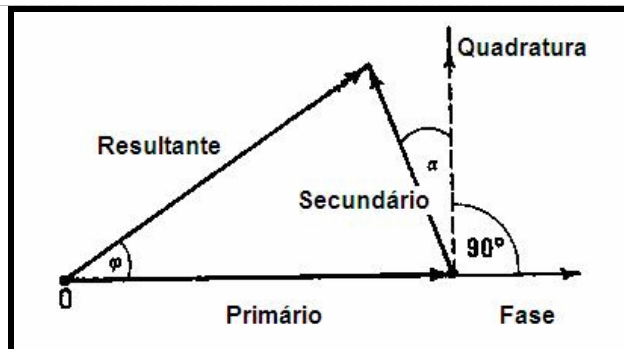


Figura 2 – Diagrama de fasores ilustrativo da decomposição do campo secundário nas componentes em fase e em quadratura, relativo ao campo primário. (modificado de Beck, 1991)

O campo magnético primário é fixado como referência de fase. Na presença de condutores aparecerá o campo secundário que será proporcional a corrente que o gerou e conseqüentemente à condutividade elétrica do meio.

A defasagem entre os campos magnéticos primário e secundário não pode ser inferida facilmente, pois a fase dos campos elétrico e magnético que compõe as ondas eletromagnéticas varia linearmente com o aumento da distância de propagação em subsuperfície. A taxa de mudança da fase deste campo eletromagnético é inversamente proporcional ao efeito pelicular ou *skin Depth*, isto é, haverá maior defasagem entre H_p e H_s com o aumento da condutividade do solo.

O efeito que se perceberia no diagrama de fasores é que na presença de ótimos condutores o ângulo α ficaria próximo a 90° , tendendo a zero em condições de condutividade baixa. Na natureza inexistem condições de ótima condutividade e, então, a defasagem deve ficar entre 90 e 180° .

A característica mais importante deste método de prospecção é que a resultante da indução eletromagnética será sempre um campo magnético senoidal defasado do campo primário de um certo ângulo α de mesma frequência do sinal indutor. A figura 3 mostra, de forma clara e direta, as formas de onda observáveis no método de Sundberg, geradas por condutores em subsuperfície.

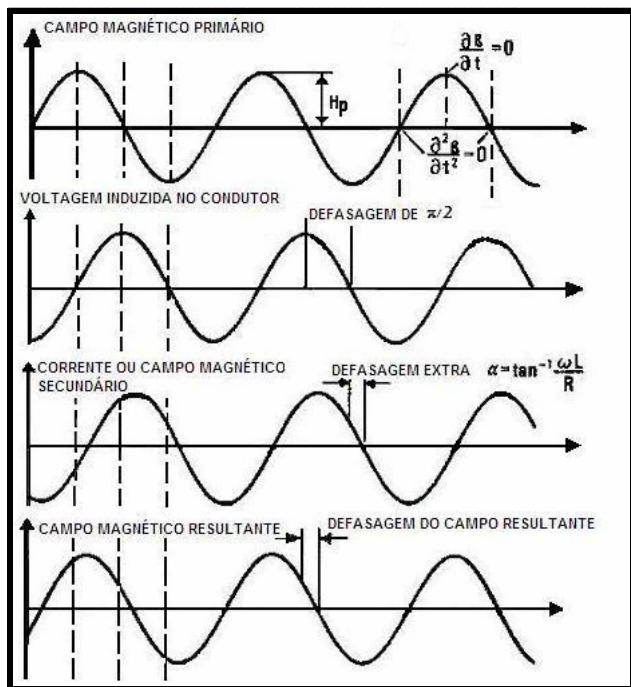


Figura 3 – Formas de onda observadas no método eletromagnético indutivo. (modificada de Beck, 1991)

1- Sistema Eletrônico desenvolvido

1.1 – Circuito Subtrator

A bobina receptora de núcleo de ar constituída de 3000 espiras, transforma em sinal elétrico, todo e qualquer campo magnético variável que a atravesse. Isto possibilita a medida do campo magnético resultante da soma dos campos magnéticos primário e secundário, bem como o “ruído de 60Hz” e todo sinal de natureza aleatória. Logo, o equipamento construído para operar no modo EM, através das medidas das componentes em fase e em quadratura do campo magnético secundário deve possuir a capacidade de recuperar um sinal coerente em meio a um ruído intenso.

Neste intuito, primeiramente foi construído um circuito que subtrai um sinal de amplitude proporcional ao campo magnético primário (H_p) pelo sinal na bobina receptora devido ao campo magnético resultante (H_r). Este circuito denominado de Subtrator (figura 4), faz uma subtração de H_p por H_r , instantaneamente. A saída também senoidal deste circuito é proporcional ao próprio campo magnético secundário H_s .

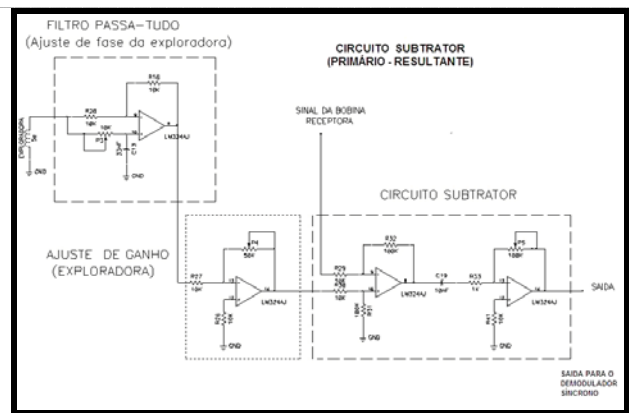


Figura 4 – Circuito Subtrator que tem como saída um sinal proporcional ao campo magnético secundário.

1.2 – Demodulador Síncrono

As componentes em fase e em quadratura do campo magnético secundário H_s , detectado na bobina receptora são medidas e separadas com o auxílio do demodulador síncrono, mais conhecido como detetor sensível a fase (DSF) ou amplificador lock-in. Seu funcionamento baseia-se na retificação síncrona de um sinal periódico em relação a um sinal de referência. O DSF correlaciona eletronicamente o sinal proveniente do circuito subtrator com o sinal de referência, eliminando assim todo e qualquer ruído.

O funcionamento do demodulador síncrono montado neste projeto é mostrado na figura 5.

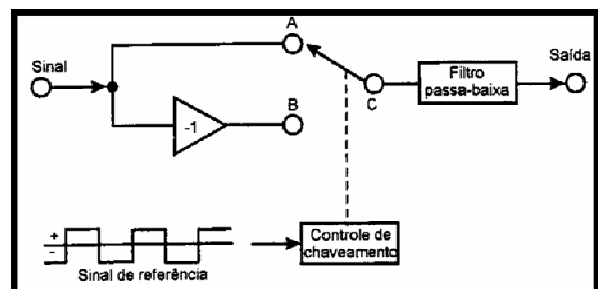


Figura 5 – Funcionamento Simplificado do Detetor Sensível a Fase. (fonte: Meade,1982)

O chaveamento do sinal de entrada da bobina receptora com o sinal de referência, faz com que o sinal de saída do demodulador se torne máximo, quando os dois estão em fase (condição de sincronismo) e seja nulo na condição de quadratura.

Um fator muito importante nos sistemas eletrônicos que medem os sinais provenientes da indução eletromagnética é a necessidade de recuperar sinais coerentes em fase com o sinal de referência em meio a intenso ruído, sendo o uso dos demoduladores síncronos indicados para esta finalidade (Meade, 1982). No nosso caso o ruído de natureza aleatória desapareceu após um tempo de integração igual a cinco vezes o tempo RC do filtro passa-baixa ($\tau \geq 5 RC$) de saída (tipo roll-off), de constante igual a RC

Neste trabalho, foram construídos dois circuitos demoduladores DSF, com as referências em fase e em quadratura em relação ao campo primário H_p . Portanto, o

sistema eletrônico mede, simultaneamente, as duas componentes (em fase e em quadratura) do campo secundário Hs.

1.3 – Calibração do equipamento

Na ausência de condutores em subsuperfície e sobre um solo muito resistivo, a bobina receptora irá medir somente o campo magnético primário. Nesta condição é feita a calibração do equipamento, pois não haverá defasagem entre o sinal gerado na bobina transmissora e o medido na receptora. Um sinal proveniente de uma bobina exploradora de 2 espiras enrolada sobre o dipolo transmissor é ajustado em amplitude e em fase, e comparado com o sinal da receptora no circuito subtrator. Quando os dois sinais forem idênticos em amplitude e fase tem-se uma tensão nula na saída deste circuito comparador. O ajuste de fase do sinal da exploradora é feito por um filtro passa-tudo, também mostrado na figura 4.

2- Resultados

2.1 – Testes preliminares

O equipamento foi testado com sucesso na localização de tambores metálicos enterrados no Sítio Controlado da Geofísica Rasa do IAG/USP em agosto de 2004, com a finalidade de verificar a sensibilidade e a resposta do mesmo sob condições reais de campo.

O primeiro teste realizado para aferir a resposta do equipamento foi na detecção de um bueiro de águas pluviais. A medição das componentes em fase e em quadratura deu-se a cada 1m, totalizando 10 pontos. Os resultados são apresentados na figura 6, e o bueiro estava localizado na marca de 5m e as bobinas estavam dispostas no modo HCP.

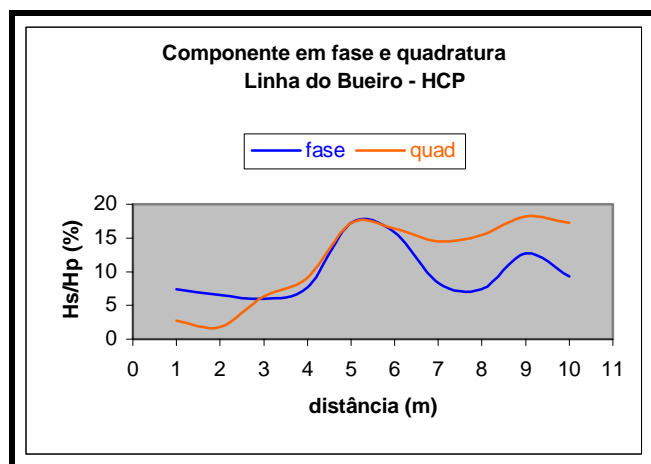


Figura 6 –Perfil sobre o Bueiro a 5m.

2.2 – Testes finais no Sítio Controlado

A boa resposta do equipamento sobre o bueiro levou a equipe do LIGA - Laboratório de Instrumentação em Geofísica Aplicada do IAG/USP a realizar testes nos modos HCP e VCP sobre a linha

dos tambores no Sítio Controlado, cuja localização e resultados são mostrados nas figuras 7, 8, 9 e 10.

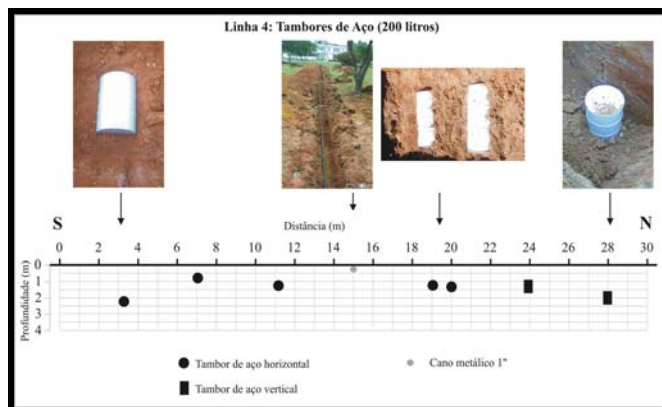


Figura 7 – Localização e profundidade dos alvos metálicos. (Foto cedida por Welitom Rodrigues Borges)

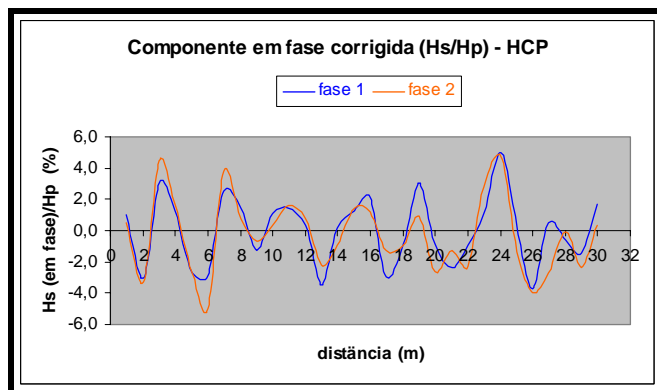


Figura 8 – Componente em fase dos 2 perfis feitos em dias diferentes sobre a linha dos tambores no modo HCP.

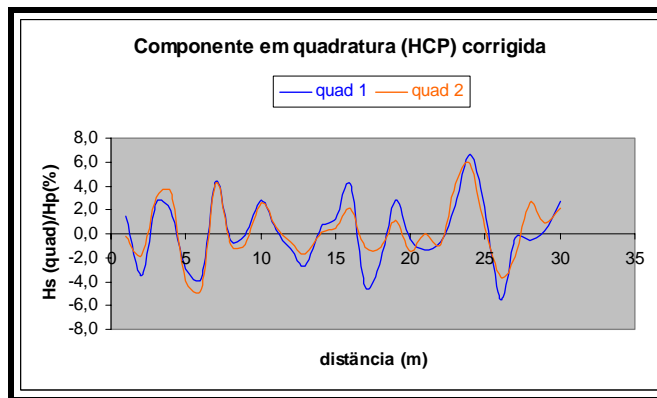


Figura 9 – Componente em quadratura dos 2 perfis feitos em dias diferentes sobre a linha dos tambores no modo HCP.

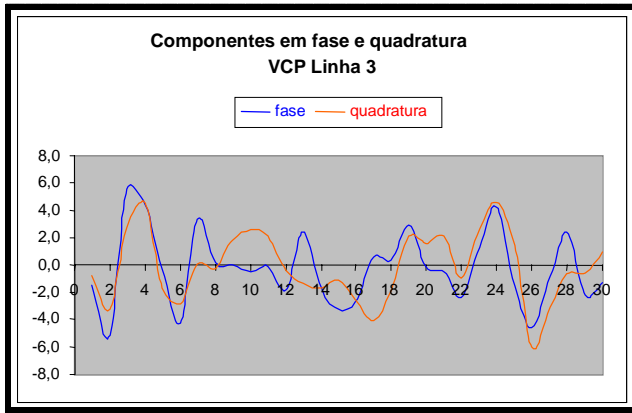


Figura 10 – Componentes em fase e quadratura no modo VCP.

mensuráveis nas duas componentes. Para uma melhor visualização do posicionamento das anomalias (alvos condutores) utilizou-se recursos disponíveis nos softwares comerciais. Para isto, foi realizado um minucioso levantamento de perfis EM sobre toda a região do SCGR - Sítio Controlado da Geofísica Rasa do IAG/USP. As dimensões e coordenadas do SCGR não estão aqui apresentadas por ser objeto de estudo pormenorizado usando outros métodos: GPR, eletroresistivo e EM, que farão parte da tese de doutorado de Welitom Rodrigues Borges.

A figura 11 mostra o resultado final do levantamento 2D pela componente em fase no modo HCP. As anomalias correspondentes aos tambores estão em azul e são negativas, pois o mapa foi desenvolvido a partir da derivada segunda do sinal medido. A linha dos tambores encontra-se na marca de 27m no eixo horizontal. Os valores de campo magnético estão em porcentagem de Hs/Hp.

2.3 – Levantamento 2D no SCGR do IAG/USP

Nos dois testes anteriores, o equipamento mostrou ótimo desempenho na detecção de alvos metálicos enterrados, que geraram anomalias

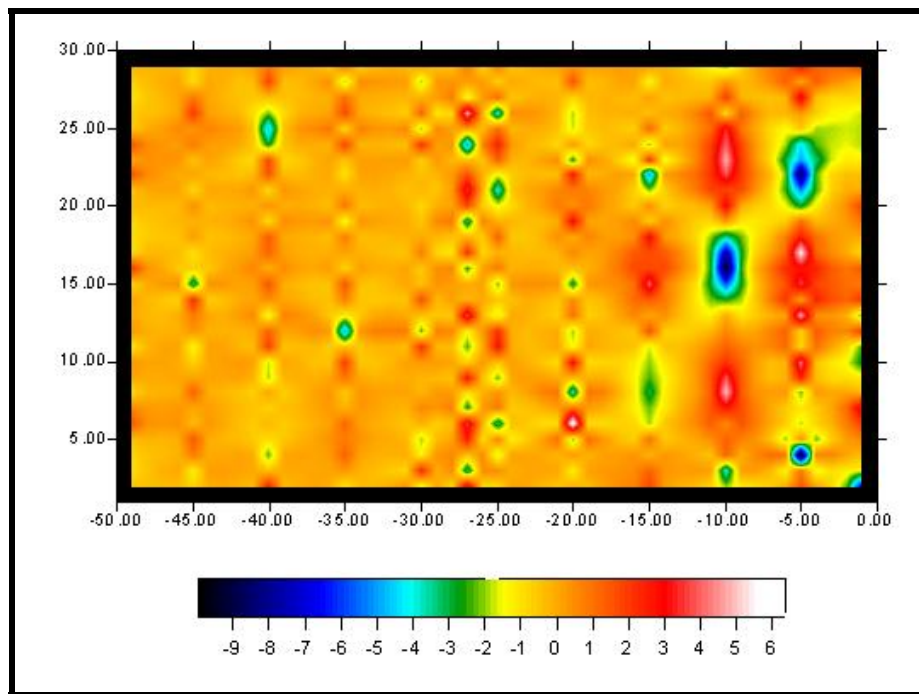


Figura 11 – Mapa 2D da segunda derivada da componente em fase.

A figura 12 mostra o resultado final do levantamento 2D pela componente em quadratura no modo HCP. Novamente, as anomalias correspondentes aos tambores metálicos estão indicadas em azul e são

negativas, porque o mapa corresponde a derivada segunda da anomalia efetivamente medida, na marca de 27 m no eixo horizontal.

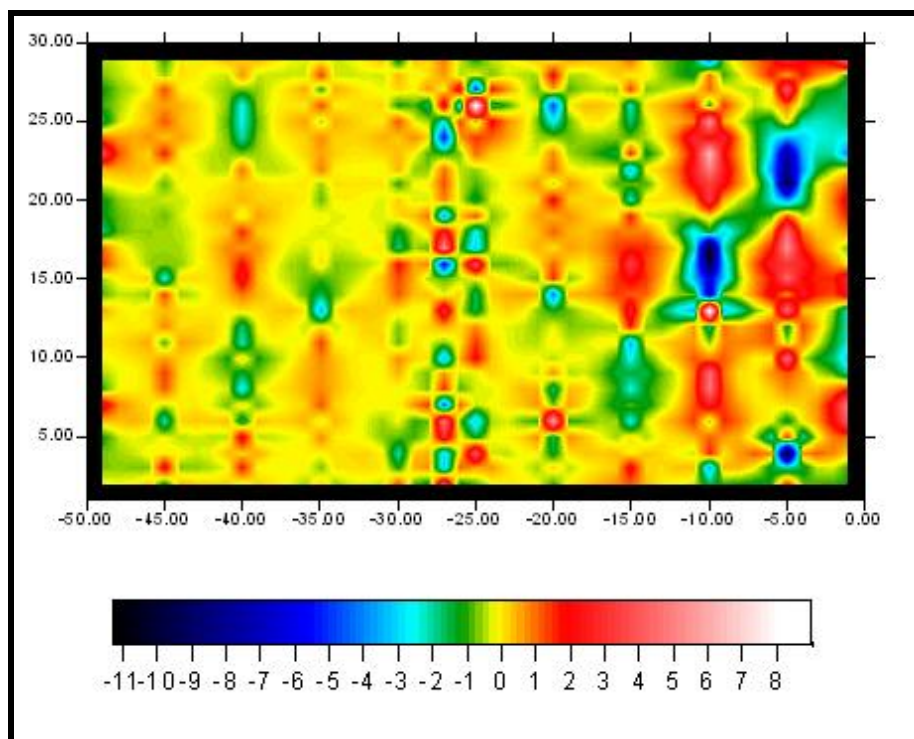


Figura 12 – Mapa 2D da derivada segunda da componente em quadratura no modo HCP.

Conclusões

O equipamento montado mostrou excelente desempenho nas medidas das componentes em fase e em quadratura do campo magnético secundário gerado pela indução eletromagnética nos condutores metálicos em subsuperfície.

Na configuração de dipolo magnético vertical ou HCP, a influência da condutividade do meio regional teve forte influência nas medidas, pelo fato da energia irradiada para o solo ser maior que no modo VCP, aumentando assim a profundidade do *Skin Depth*.

Algumas diferenças são observadas nos modos HCP e VCP, como por exemplo no alvo enterrado na marca de 11m que, na configuração horizontal HCP (dipolos verticais) apresentou um campo magnético secundário com certa intensidade percentual das duas componentes. No modo VCP nota-se somente a presença da componente em quadratura, sendo a outra (em fase) nula. Isto mostra que no modo VCP, o número de indução permaneceu baixo, devido ao baixo conteúdo (%) da componente em fase. Isto não ocorreu no modo HCP por causa da elevada condutividade da região e dos alvos metálicos, que tornaram o *Skin Depth* muito pequeno e conseqüentemente o número de indução muito grande.

Referências

- Beck, A.E., 1991.** Physical Principles of exploration Methods. Manitoba: Wuerz Publishing Ltd. Pp. 292.
- Marcolino, C.S., 2000.** Desenvolvimento de um sistema HLEM de Campo magnético induzido no domínio da frequência para prospecção mineral. Trabalho de Graduação: IAG/USP, São Paulo.
- Meade, M.L., 1982.** Advances in lock-in amplifiers. J. Phys. E: Sci Instruments, vol 15, p. 395-403.
- Porsani, J.L., Rodrigues, S.I., Borges, W.R. & Hido, F.Y., 2004b.** O sítio controlado de geofísica rasa do IAG-USP: Instalação e resultados preliminares. I Simpósio Brasileiro de Geofísica, São Paulo, cd-rom.
- Sundberg, K., 1936.** Principles of the Swedish Geoelectrical Methods. Vol 1. Stockholm: Centraltryckeriet.

Agradecimentos

Ao pesquisador pioneiro Karl Sundberg, que desenvolveu e aplicou o método EM na busca de sulfetos metálicos na Suécia em 1936, sem as facilidades da eletrônica moderna. Ao IAG que proporcionou a possibilidade da construção de um equipamento para aplicação em prospecção geofísica no Brasil e ao pessoal do LIGA que muito me ajudou.