



Desenvolvimento de um Conjunto de Modelagem Eletromagnética de Alta Resolução.

Alberto Leandro de Melo – UFPA – leandro@ufpa.br

Om Prakash Verma – UFPA – verma@ufpa.br

Abstract

Very low electromagnetic anomalies are obtained in the archaeological, geotectonical and contamination investigations due to low induction number of targets. To study the applicability of new electromagnet techniques of high resolution in development, we need a reduced scale model set-up of micro resolution. A very high resolution, of the order of 10^{-6} Hp, set-up is developed to carry out experiments in the laboratory. Especial care has been taken in the confections of the mechanical parts and electronic circuits particularly the transmitter and the receiver coils.

Introdução

Ultimamente, aplicações de métodos eletromagnéticos são muito freqüentes nas investigações em arqueologia; geotecnia; contaminação do subsolo por chorume de lixões, derramamento de combustível por postos de abastecimento, rejeitos de fábricas e por cemitérios; nas invasões de aquíferos costeiros por água do mar. Entretanto, esses alvos têm em comum um baixo de número de indução nas freqüências de até 20kHz por conseguinte, geram anomalias EM muito baixas na ordem de 0,01% de **Hp** (100 ppm de **Hp**). Para medir anomalias desta ordem de grandeza e com precisão de $\pm 1\%$ é necessário um sistema de aquisição de dados com resolução de 10^{-6} **Hs/Hp** (1ppm).

Um conjunto de modelagem analógica eletromagnética para investigações em micro-resolução foi projetado e montado no Laboratório de Modelagem Eletromagnética (LAMODEM) com o objetivo de estudar os problemas da aplicabilidade dos métodos eletromagnéticos nas investigações de alvos com baixo número de indução.

CONJUNTO DE MODELAGEM

O conjunto experimental em escala reduzida para simular as técnicas eletromagnéticas em laboratório foi projetado observando-se o rigor da Lei da Similitude nas freqüências baixas, isto é, as correntes de deslocamento são desprezíveis em relação às correntes de condução. Esse conjunto foi projetado para explorar os mais diversos métodos de levantamento e sondagem eletromagnética. Além da sondagem geométrica, mais tradicional nas investigações EM, a sondagem multi-freqüencial (Won, 1997) é também possível, uma vez que o sistema é de banda larga. A lei da Similitude impõe que dois ambientes são eletromagneticamente similares se ambos possuírem o mesmo número de indução. Para materiais isotrópicos e com constante de

perda $p = \sigma/\omega\epsilon \gg 1$, a corrente de condução é dominante, podendo-se afirmar que o material é bom condutor e o campo EM viaja no interior do material regido pela equação da difusão de onda. Nestas condições o sistema de modelagem foi projetado, permitindo modelar ambientes geológicos numa faixa de freqüência de 10 kHz até 1 MHz. No limite superior de freqüência, cuidados devem ser tomados para evitar que a contribuição da corrente de deslocamento se torne relevante.

Durante a aquisição de dados nos experimentos, o sistema permite que o conjunto Tx – Rx seja deslocado a uma velocidade constante com resolução de 0,5mm e nas sondagens EM, o afastamento mínimo e máximo de Tx-Rx permitido é de 40mm e 400mm respectivamente. A altura de Tx-Rx pode ser ajustada para simular sobre voo em áreas de investigação. Portanto é possível aplicar uma grande faixa de fator de escala, tanto geométrico, quanto freqüencial.

CONJUNTO DE MODELAGEM ELETROMAGNÉTICA

O conjunto de modelagem eletromagnética é dividido em três partes distintas: 1- Sistema de Transmissão; 2- Sistema de Recepção e 3- Estrutura física de modelagem. Como pode ser visto na Figura 1, as partes que compõem o conjunto de modelagem EM estão distribuídas em dois ambientes distintos: no ambiente A, isolado, estão localizados a estrutura física de modelagem e alguns poucos equipamentos (esse ambiente requer isolamento, pelo fato que em algumas experimentações é necessário utilizar soluções salinas e portanto, o ambiente torna-se agressivo para a instrumentação eletrônica envolvida) e no ambiente B estão localizados os equipamentos de controle, aquisição e processamento de dados.

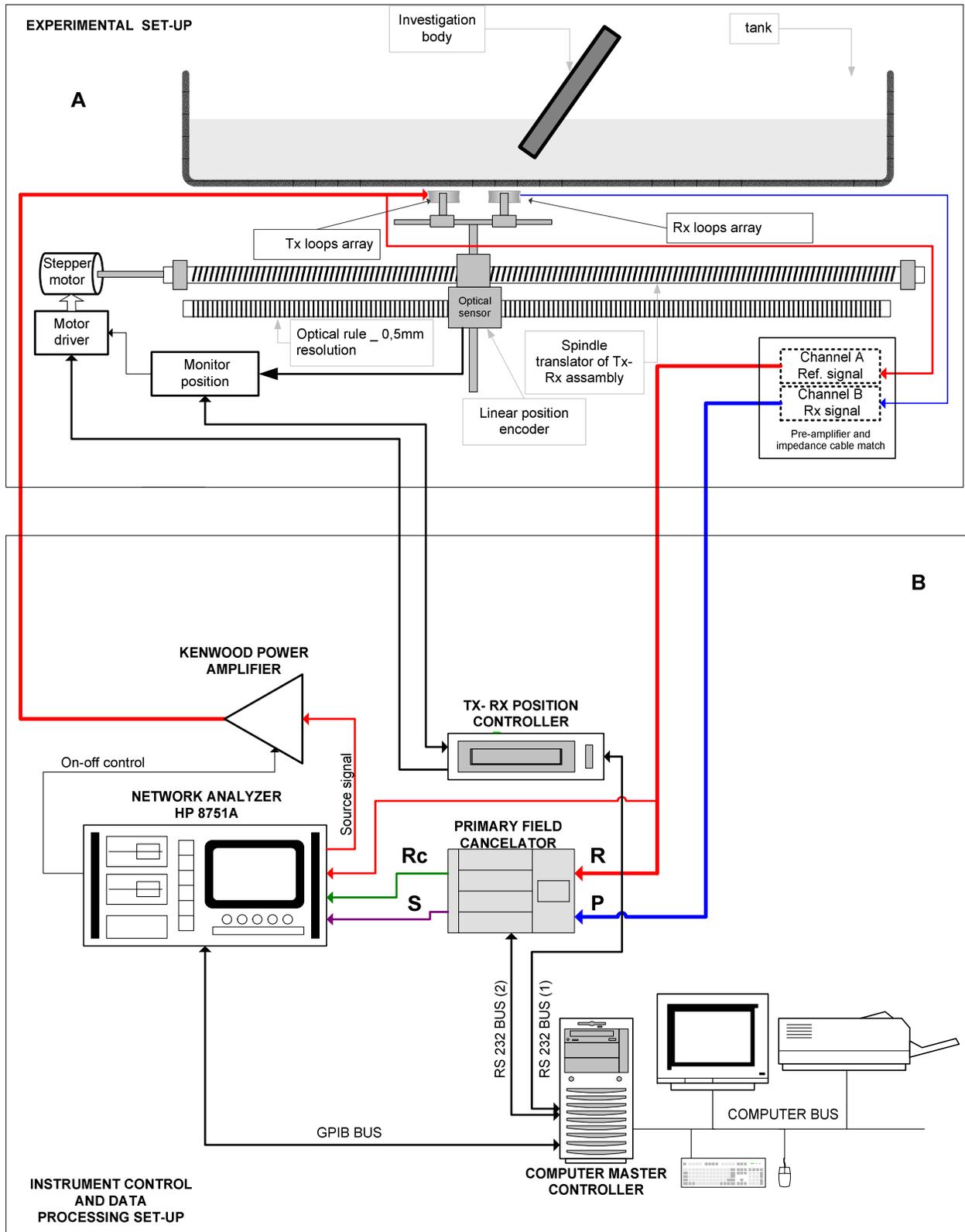


FIG. 1. Diagrama Funcional simplificado do Conjunto Instrumental de Modelagem Eletromagnética.

SISTEMA DE TRANSMISSÃO

O sistema transmissor é composto basicamente de um sintetizador senoidal (Network Analyzer), um amplificador de potência (Kenwood 150W Power Amplifier) e de um arranjo de loops transdutores. Na Fig. 2, tem-se o diagrama esquemático do sistema de transmissão.

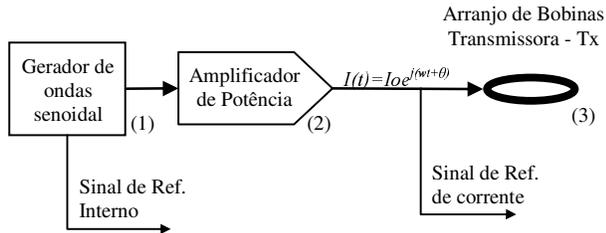


FIG. 2. Sistema de transmissão.

1. Gerador de Sinal Senoidal

O sinal de excitação senoidal é gerado pelo “Network Analyzer” modelo hp8751A, que sintetiza o sinal senoidal com frequência que pode variar de 5 Hz até 500 MHz e resolução de 1mHz. A precisão em frequência é de $\pm(1\text{ppm} + 1\text{mHz})$ numa janela de temperatura de 0° a 55°C e estabilidade de $\pm 2,5E^{-9}/8\text{h}$, numa temperatura de $23^\circ \pm$

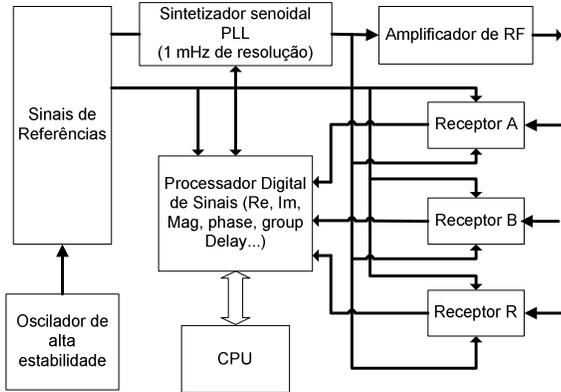


FIG. 3. Diagrama de blocos simplificado do analisador de sinais.

5°C , do sinal gerado é garantida por um cristal de 10 MHz acomodado em câmara térmica (OPTION 001). A distorção de harmônica é menor que -30 dBc. O ruído de fase com frequência de 20 KHz é menor que -75 dBc/Hz. Estas características habilitam o HP8751A como fonte de excitação de alto grau de precisão. O “Network” gera vários sinais internos de referências, entre eles referências em quadratura, que o permite ser utilizado como analisador de sinais fasoriais. O sinal de saída do gerador possui baixa potência e, portanto requer amplificação. Na Figura 3, tem-se o diagrama em blocos simplificado do analisador de sinais HP8751A.

2. Amplificador de Potência

O sinal senoidal suprido pelo “Network Analyzer” é amplificado pelo “Kenwood High Speed DC amplifier” modelo L-07MII, de alta estabilidade e alta pureza espectral, sendo capaz de suprir até 150W (real) numa carga de 8Ω . O L-07MII possui elevada banda de frequência desde de DC até 1MHz (-3 dB).

3. Transdutor magnético

O transdutor magnético desenvolvido neste trabalho consiste de um arranjo de bobinas na forma de pequenos loops (quase-dipolos magnéticos) com núcleo de ar (μ_0), otimizados e agrupados num pequeno volume. Para manter a corrente $i_{TX}(t)$ que flui nos loops o mais plana possível dentro da faixa de frequência de interesse, foi necessário reduzir ao máximo possível a indutância dos loops. Cada loop foi confeccionado com baixo número de espiras (10 espiras cada) e, um total de 6 loops foram arranjados no modo série-paralelo. A Impedância total do arranjo é mantida abaixo de 10Ω no limite superior da faixa de frequência (1 MHz). Nas Figuras 4a e 4b, tem-se o circuito equivalente e a resposta em frequência de magnitude e fase da impedância do arranjo Tx, respectivamente.

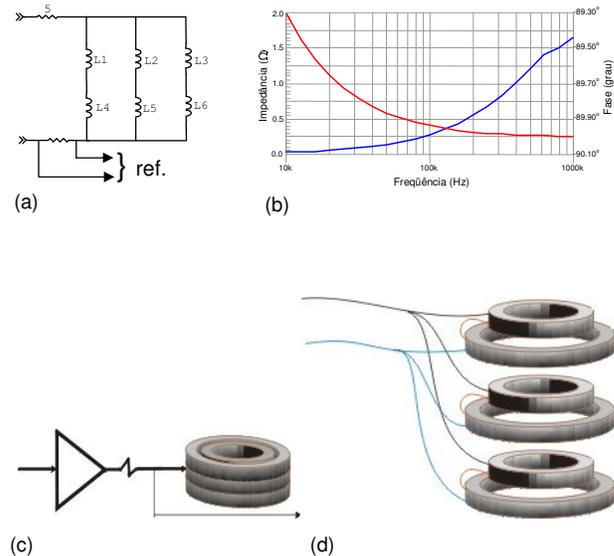


FIG. 4. Configuração do arranjo de bobinas transmissoras. (a) Circuito equivalente do arranjo. (b) Resposta em frequência de impedância (—) e fase (—) do arranjo. (c) Vista espacial do arranjo Tx. (d). Vista espacial explodida do arranjo Tx.

Para se obter uma boa resposta do corpo alvo é necessário que o campo tenha razoável densidade de fluxo magnético \mathbf{B} na região de interesse. E como \mathbf{B} , para fontes dipolares decai em intensidade com o cubo da distância, é necessário manter uma elevada corrente fluindo no loop transmissor. Entretanto, não se pode aumentar de forma ilimitada a corrente no loop por

questões técnicas (capacidade de corrente do sistema de potência, aquecimento excessivo dos transdutores, entre outros). Outra forma de aumentar a densidade de fluxo magnético é aumentar o tamanho elétrico do momento \mathbf{m} (N .i. A) do loop transmissor, novamente outras limitações se fazem presentes. Aumentar a área real do loop compromete a Lei da Similitude, quanto ao fator de escala geométrica, e, aumentar o número de espiras do loop, aumenta a auto-indutância do loop tornando-o muito seletivo (alto Q). Então é preciso otimizar o momento \mathbf{m} do loop transmissor. Um arranjo ótimo de bobinas transmissoras na forma de pequenos loops foi obtido por meio de arranjo série-paralelo de loops individuais de baixa indutância e com frequência de ressonância além do limite superior da banda de frequência desejada. Um total de 6 pequenos loops foram utilizados e combinados conforme a figura 4c. Esse arranjo, garante baixa impedância no limite superior da banda de frequência. Nas baixas frequências, um resistor em série com o arranjo transmissor mantém a impedância de carga vista a partir do amplificador de potência acima de 5Ω . A diferença de fase em decorrência das diferenças de características elétricas de cada loop não compromete o campo gerado além do limite imposto para pequenos loops na forma de dipolo ($l > 5R$). Simulações em computador demonstram que o erro de fase é desprezível para pontos localizados além de $3R$.

SISTEMA DE RECEPÇÃO

1. Bobina Receptora

Essa, consiste de um arranjo de 12 bobinas na forma de pequenos loops. Cada loop foi projetado para comportar-se como dipolos magnéticos, possuindo baixa capacitância e elevada frequência de ressonância. A disposição espacial dos loops permite manter baixo acoplamento capacitivo entre os mesmos, por conseguinte, a manutenção suave da resposta em magnitude sem afetar substancialmente a configuração de fase. Os 12 loops do arranjo, são combinados para formar 4 grupo coaxiais de 3 loops em série. Cada grupo é acoplado a um estágio pré-amplificador de transcondutância. A contribuição de voltagem (f_{em}) induzida em cada grupo é convertida em corrente e somadas. A soma resultante é convertida em tensão no estágio somador/casador. Devido a altas impedâncias de cada loop nas altas frequências, e também as alta capacitância do cabo de transmissão de sinal, foi necessário casar a impedância das bobinas receptoras com os cabos de sinal. Dessa forma optou-se por acoplar junto ao arranjo sensor um estágio pré-amplificador do tipo "pickup" modificado, que produz o ganho total de 32dB. Tanto os loops sensores quanto o pré-amplificador de sonda, são blindados eletrostaticamente, reduzindo substancialmente a indução capacitiva nestes por campos potencial elétricos circunvizinhos ao arranjo Rx. Na Figura 5a tem-se a configuração do arranjo sensor e na Figura 5b o modo de blindagem.

2. Pré-amplificador e Casador de impedância

A unidade pré-amplificadora intermediária fica localizada numa posição fixa próximo ao sistema físico de modelagem e distante da sala de controle e aquisição de dados. Devido ao comprimento (6m) do cabo de sinal (RG52) que conecta o sensor à unidade de cancelamento de campo, é necessário casar a impedância do 1º pré-amplificador de sonda com a impedância de 50 ohms do cabo de sinal. A unidade pré-amplificador intermediária tem amplificação fixa de 20 dBs. Essa unidade possui outro canal pré-amplificador destinado ao casamento de impedâncias do sinal de referência suprido pelo sistema transmissor. Veja Figura 1.

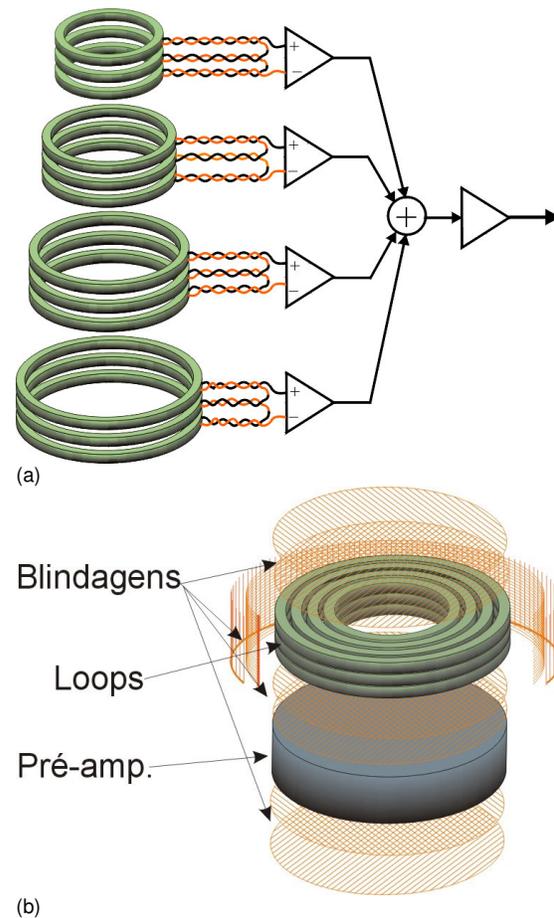


FIG 5. Configuração dos loops que formam o arranjo sensor magnético. (a). Circuito equivalente. (b). Vista espacial do arranjo com a blindagem.

3. Cancelamento de Campo Primário

A f_{em} induzida no arranjo receptor Rx, é devida a soma vetorial de pelo menos dois campos magnéticos presentes no receptor: o campo primário H_p , devido ao acoplamento magnético entre o receptor Rx e o transmissor Tx; o campo secundário H_s , devido ao corpo

condutivo (induzido por Tx) localizado nas proximidades do sistema Tx-Rx. Outros campos presentes em Rx são os campos espúrios. Campos de baixa condutividade em baixa frequência possuem baixo número de indução e, portanto, geram baixas anomalias eletromagnéticas. Tipicamente a razão H_s/H_p fica abaixo de 10^{-4} (-80 dB). Portanto é necessário evidenciar o campo devido ao corpo condutivo.

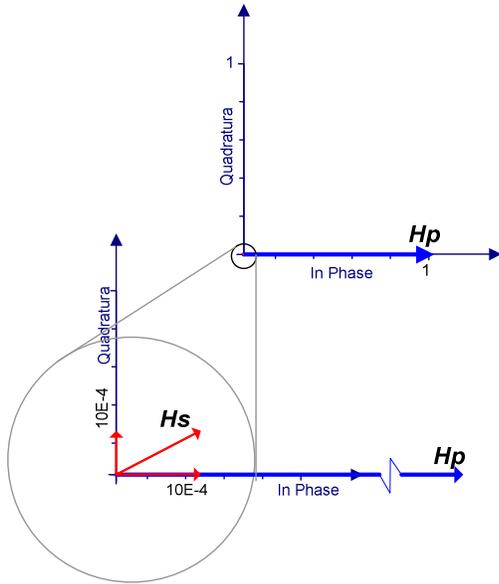


FIG.6. Campo secundário na presença do campo primário.

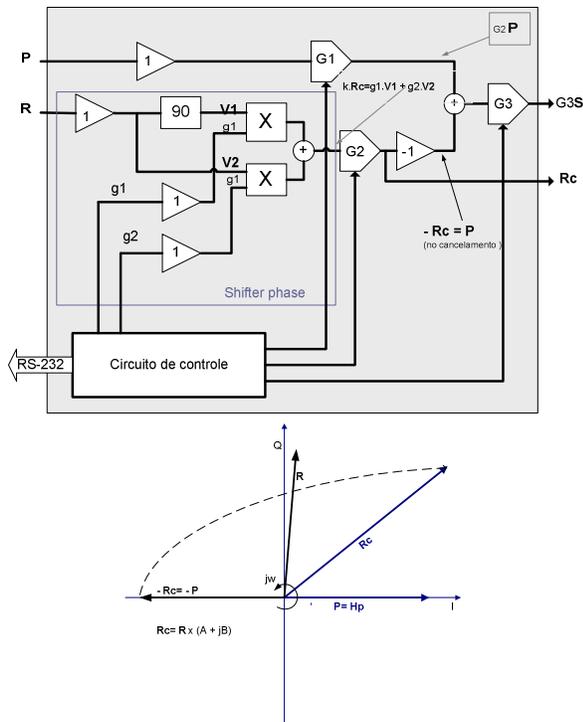


FIG. 7. Esquema de cancelador de campo primário através de processamento fasorial.

Como o principal objetivo deste trabalho é detectar corpos condutivos com baixo número de indução. Alguma estratégia de cancelamento de campo primário deve ser aplicada de modo a evidenciar o campo secundário, uma vez que simplesmente amplificar o sinal composto ($P+S$) resultaria na saturação do sistema amplificador. Neste trabalho, é proposto um método de cancelamento através do processamento analógico fasorial entre o fasor voltagem medido no arranjo receptor, que corresponde ao campo $H_p + H_s$, e o fasor voltagem de referência R que corresponde uma fração da corrente (convertida em voltagem $1V/A$) que flui no arranjo transmissor. Na Figura 7, tem-se o esquema simplificado do sistema de cancelamento de campo primário construído no laboratório. Pode-se verificar que o sinal medido no arranjo sensor Rx, aqui denominado de fasor P , não sofre nenhuma rotação de fase e pode apenas sofrer transformação em magnitude, enquanto que o sinal de referência R derivado da corrente que flui no arranjo transmissor, é devidamente transformado de modo a produzir um novo fasor R_c com mesma magnitude e mesma de fase de P . R_c é por último rotacionado em 180° e em seguida somado com o fasor P , produzindo assim um fasor S que será nulo no ponto de cancelamento. Uma vez alcançado o ponto de cancelamento, o sistema é travado e apenas amplificação do fasor S é permitido. Nesse ponto, o sistema está calibrado e cancelado e o fasor R_c passa a ser novo sinal de referência do sistema. A partir do ponto de cancelamento, (com o conjunto Tx-Rx em deslocamento), o sinal presente na saída do somador (2) é um sinal residual S , que nada mais é que o sinal do campo secundário H_s . O sinal S então é amplificado por G_2 (0, 20, 40 e 60 dB) sem o risco de saturação.

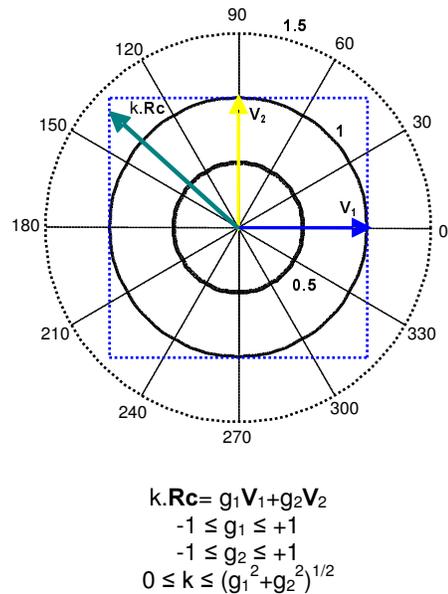


FIG. 8. Função de controle de fase produzido pelo “phase shifter”.

O deslocamento de fase necessário ao processo de cancelamento é realizado pelo deslocador de fase (*phase shifter*), que consiste de um somador de dois fasores em quadratura, tomados a partir do fasor de referência **R**. Os fasores agora denominados por **V₁** e **V₂**, têm suas amplitudes moduladas por dois fatores de multiplicação **g₁** e **g₂**, respectivamente, que podem variar de -1 até +1. Estes fatores controlam o ângulo de fase do “*phase shifter*” e são ajustados individualmente. O fasor resultante desse processo terá a fase desejada entre 0°~360°.

Os sinais pré-processados pelo cancelador são então aplicados aos canais receptores do analisador de sinais (HP8751A). Os dados obtidos são então processados e interpretados no computador mestre, utilizando-se os programas HPVEE 5.0 e MATLAB e outros.

CONJUNTO FÍSICO DE MODELAGEM

O conjunto de experimentação é composto por uma estrutura de sustentação de modelo e uma estrutura de deslocamento do conjunto Tx-Rx. Toda a estrutura física envolvida no ambiente de experimentação foi devidamente construída sem a utilização de partes metálicas, reduzindo assim os efeitos indesejáveis de sinais espúrios.

A estrutura de sustentação do tanque de simulação do ambiente geológico (ver Figura 1) foi construída em madeira e o tanque de experimentação, que tem dimensão de 200x150x50 cm em comprimento, largura e altura, respectivamente, foi construído em fibra de vidro.

O sistema mecânico de deslocamento do conjunto Tx-Rx foi construído totalmente em acrílico, não possuindo qualquer parte metálica em sua estrutura. Isso minimiza a quantidade de ruídos coerentes que possam prejudicar os experimentos realizados. A estrutura foi projetada considerando-se os vários métodos de levantamento e sondagem EM. Com comprimento de 200 cm, a estrutura permite que o conjunto Tx-Rx deslize suavemente sobre seus trilhos. O ruído mecânico produzido pelo deslocamento do conjunto foi minimizado durante o processo de construção do trilho de tal forma que o erro de posicionamento devido à vibração da estrutura é também minimizado. O suporte do conjunto Tx-Rx permite ajustes em altura (H), afastamento (L) entre Tx e Rx, e também articular os arranjos independentemente um do outro em 360° na direção axial e 180° na direção do azimute.

O conjunto Tx-Rx é deslocado por meio de um fuso, construído em PVC. O conjunto que avança 2cm por uma rotação completa do fuso que está acoplado diretamente a um motor de passo com 0,9° de resolução, localizado numa das extremidades da estrutura. O modo de deslocamento do conjunto Tx-Rx pode ser contínuo ou

discreto. A precisão do posicionamento do conjunto é garantida por um codificador de posição linear que observa a posição relativa do conjunto que intercepta a régua óptica. A resolução é de 0,5mm no modo discreto. O controle de posição e de velocidade do conjunto é realizado por um controlador micro-processado que aciona o motor de passo e controla a posição do conjunto, permitindo o total controle no deslocamento conjunto Tx-Rx. O controlador é comandado pelo computador mestre via interface RS232.

Conclusão

O sistema apresentado neste trabalho foi construído e encontra-se em fase final de montagem no Laboratório de Modelagem Eletromagnética. Os primeiros testes ainda na fase de desenvolvimento, mostram bons resultados. Os resultados finais demonstrarão a viabilidade de simular ambientes geológicos complexos que apresentam baixo número de indução. Esses ambientes poderão ser simulados e avaliados sob vários aspectos sob total controle de seus parâmetros.

Agradecimentos

Ao Curso de Pós Graduação em Geofísica pelo apoio no desenvolvimento desse trabalho como proposta de dissertação de mestrado.

References

- Ramo, S., Whinnery, J. R. & Duzer, T. V., 1965, Fields and Waves in Communication Electronics, John Wiley & Sons, Inc.
- Martins, N., 1975, Introdução à Teoria da Eletricidade e do Magnetismo, Editora Edgard Blücher.
- Grover, F. W., 1962, Inductance Calculations – Working Formulas and Tables, Dover Publications, Inc.
- Hund, A., 1933, High Frequency Measurements, McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Schaumann, R., Ghausi, M. & Laker K. R., 1990, Design of Analog Filters, Prentice Hall Series in Electrical and Computer Engineering.
- Won, I. J., A Sweep-Frequency Electromagnetic Exploration Methods In A. A. Fitch (ed.), Developments in Geophysical Exploration Method – 4, Chapter 2, P. 39-64. Applied Science Publishers Ltd, London.