

Magnetômetros Fluxgates amorfos robustos para pesquisa em Sondagens Geomagnéticas Profundas no Brasil

Wanderli Kabata, Ícaro Vitorello, Marcelo Banik, Nalin B. Trivedi

INPE, C.P. 515, 12201-970 - São José dos Campos, SP, Brazil

Wagner C. Cunha

ITA, Pça Mal. Eduardo Gomes 50, 12228-900, São José dos Campos, SP, Brazil

Recebido em 10 de Setembro, 2004. Versão revisada recebida em 22 de Novembro, 2004

Foram construídos 20 magnetômetros tipo *fluxgate*, portáteis, com núcleo de fita amorfa, para medir as variações do campo magnético nos três eixos ortogonais pertinentes. O campo é medido a partir do segundo harmônico da tensão induzida, medida nos instantes de saturação do núcleo. Os magnetômetros têm alta sensibilidade (14 nT/mV) e baixo ruído (15pT), resolução entre 0,27 e 0,01 nT e uma faixa dinâmica de +/-35.000nT de acordo com os valores esperados para baixa latitude. Os magnetômetros foram instalados para coletarem dados no sul do Brasil, formando dois conjuntos bidimensionais com espaçamento de aproximadamente 110 km entre as estações, operando simultaneamente e ininterruptamente por dois meses, com medidas em intervalos de 60 s. Durante o mesmo período, outro conjunto composto por 25 magnetômetros fluxgates da Universidade de Flinders, Austrália, foi instalado na mesma região. Os resultados comparados indicam dados compatíveis, estando atualmente sendo analisados com modelos de Sondagens Magnéticas Profundas para reconhecimento de concentração anômala de correntes elétricas nas áreas adjacentes e/ou mais profundas.

Twenty portable fluxgate magnetometers have been constructed with amorphous cores (metallic glass ribbon wound in a polycarbonate spool) to sense variations of the field in three orthogonal axes. The field is measured from the second harmonic induced voltage at the same time interval of the core saturation. The magnetic sensors are lodged in a case specially designed for rugged field works in tropical environments. After performing calibration and temperature corrections, tests were carried out for linearity and noise. The results indicate high sensitivity (14 nT/mV), low noise (around 15 pT), resolution between 0.27 and 0.01 nT and a dynamic range of +/- 35,000 nT, in accordance with geomagnetic values prevalent at low latitudes. Comparisons of the recorded variations during tests demonstrate a very good agreement with data from the nearest geomagnetic observatory. The magnetometers were then deployed in a two dimensional array with spacing of about 110 km between stations, operating simultaneously and uninterruptedly for almost two months in southern Brazil, with recorded measurements at 60 s intervals. During the same operating period, another array composed of 25 fluxgate magnetometers from the University of Flinders (Australia) was also deployed in the same region. The results from both arrays indicate compatible data, presently being analyzed with Geomagnetic Depth Sounding (GDS) models for the recognition of anomalous concentration of electrical currents under and adjacent to the study area. The anomalous zones are sites of enhanced conductance likely associated with geological structures or lithologies. A long period magnetotelluric system is under development to adapt a telluric component to the fluxgate magnetometers for probing the vertical conductance variation beneath such anomalies.

1 Introdução

Em geral, as características geofísicas da crosta e manto litosférico, das quais pode-se inferir as suas estruturas tectônicas e processos geodinâmicos, são pobremente conhecidas em escalas regionais no continente sul americano. Medidas magnéticas de longo comprimento de onda são disponíveis através de dados de satélites (e.g. POGO, Magsat, Oersted, CHAMP), que no entanto não possuem resolução adequada para estes estudos. Considerando que a resolução espacial é fortemente relacionada com a órbita e a altitude do satélite, a recuperação da contribuição magnética

regional da litosfera é dificultada pela contaminação de dados vindo de modelos não apropriados, que tentam remover os efeitos da ionosfera e do campo principal, e ainda, os efeitos das oscilações devido a atitude e a estabilidade do satélite em órbita. Utilizando-se de dados de satélites atrelados aos de estações terrestres, deve-se produzir uma grande melhora na separação da contribuição da magnetização litosférica, da contribuição externa nas medidas magnéticas obtidas. Um programa de longo prazo está em andamento baseado no desenvolvimento de um grande número de magnetômetros fluxgate de baixo custo, carac-

terizado pelo baixo consumo de energia, fácil manutenção, sendo mecanicamente robustos, para serem instalados nas mais adversas condições de temperatura e umidade, encontradas no continente sul americano.

Além do aprimoramento na resolução dos dados em relação aos dados de satélites, as medidas de campo magnético em estações terrestres estão sendo também utilizadas para detalhar a condutividade da litosfera por dois métodos de indução: GDS (Geomagnetic Deep Sounding) e MT (magnetotellurics).

O método GDS produz uma visão geral da distribuição da condutividade lateral da sub-superfície através de medidas magnéticas, utilizando-se de magnetômetros *fluxgates* instalados em diferentes locais por um mesmo período, medindo as variações magnéticas nos três eixos pertinentes, denominados componentes Horizontal, Declinação e Vertical (H,D,Z).

Correntes elétricas que fluem na ionosfera e magnetosfera dão origem a ondas eletromagnéticas que penetram no interior da Terra e induzem correntes em suas camadas condutoras, que em resposta, produzem seus próprios campos magnéticos de superfície, que podem ser detectados por um conjunto de magnetômetros instalados em locais previamente escolhidos. Igualmente, as profundidades das camadas condutoras podem ser estimadas da análise dos sinais telúricos e magnéticos, coletados com equipamentos MT.

Nosso atual esforço no desenvolvimento de magnetômetros tipo *fluxgate* é baseado em experiências anteriores, que começou com a construção de um magnetômetro *fluxgate* para estudos do eletrojato equatorial [1] seguido pela participação na construção de um magnetômetro *fluxgate* para o satélite de órbita polar (LEO) SACI-1, em colaboração com o grupo americano da IGPP/UCLA. A parte analógica do magnetômetro foi construída pela UCLA e a parte digital foi construída no laboratório de geomagnetismo do INPE [2]. Um ano mais tarde, nós construímos um magnetômetro *fluxgate* para o satélite de órbita equatorial SACI-2 [3].

Uma das grandes limitações pertinentes ao projeto de magnetômetros tipo *fluxgate* é a obtenção do núcleo sensor cristalino, que é um material controlado pelos governos dos países fabricantes e portanto difícil de ser adquirido. As cooperações internacionais foram as formas utilizadas inicialmente para essa aquisição, porém elas também se tornaram inacessíveis.

Para o núcleo dos magnetômetros atuais foram utilizados materiais vitrometálicos disponíveis no mercado. Vários tipos de núcleos foram confeccionados, testados e tiveram seus desempenhos comparados para serem utilizados no projeto de desenvolvimento e fabricação de 20 magnetômetros, no INPE, para serem utilizados em GDS. A utilização desses núcleos possibilitou um importante avanço e traz independência em relação à importação de núcleos cristalinos, necessários para a construção de magnetômetros de alta qualidade, tendo em vista as restrições impostas na sua comercialização pelos países fabricantes, em razão das implicações militares.

Os resultados dos testes de laboratório demonstraram o bom desempenho dos magnetômetros de núcleo amorfo de alta sensibilidade e baixo ruído, em operações de GDS. Outra aplicação dos sensores *fluxgates* em andamento relaciona-se com medidas de correntes geomagnéticas induzidas (GIC) em linhas de alta tensão, os resultados serão apresentados oportunamente.

Para este estudo, uma rede de magnetômetros foi instalada em forma de grade na região Sul do Brasil. Foram acompanhados da instalação de magnetômetros emprestados da Flinders University numa região vizinha, de modo a comparar e avaliar os dados obtidos.

2 Desenvolvimento e confecção dos núcleos dos magnetômetros tipo *fluxgate*

Os magnetômetros *fluxgate* são dispositivos de estado sólido, sem partes móveis, com capacidade de medir campos estáticos ou alternados. O seu funcionamento é baseado nas propriedades de saturação de ligas metálicas moles, que possibilitam a alternância (*chaveamento*) do fluxo magnético, devido à variação da permeabilidade magnética do material usado como núcleo.

O aparecimento de uma força eletromotriz induzida, gerada pela variação do fluxo magnético, é largamente usada na detecção de campos magnéticos. Seja um campo magnético H_{ext} que se queira medir, colocando-se uma bobina com um núcleo ferromagnético imerso nesse campo, as linhas de campo se concentram ao passarem pelo núcleo devido a sua alta permeabilidade magnética. No entanto, nenhuma força eletromotriz é gerada, devido ao fluxo magnético ser constante.

A variação do fluxo magnético pode ser espontânea, se o campo que se queira medir for variável no tempo, ou provocada, onde pode ser feita a variação do fluxo indiretamente, ou pela variação da permeabilidade magnética do meio, ou pela variação da área por onde atravessam as linhas de campo. Pode-se por exemplo rodar uma espira num campo estático que se queira medir, tornando a tensão induzida proporcional ao campo, à área da espira e à frequência de rotação. Esse tipo de magnetômetro é conhecido como magnetômetro rotativo de indução, e não é usado hoje em dia para medidas do campo geomagnético.

Outra possibilidade de termos variações do fluxo magnético consiste em variar a permeabilidade do meio que é circundado pela bobina (núcleo), ou em outras palavras, variar a permeabilidade do núcleo da bobina.

Se o núcleo tiver alta permeabilidade, o campo externo será “canalizado” para dentro dele e o fluxo que atravessa a espira será muito grande. Se por alguma razão a permeabilidade do meio diminuir repentinamente, o campo deixará de se concentrar dentro da espira e o fluxo devido ao campo externo diminuirá. Nesse instante, a variação de fluxo provoca uma tensão induzida, proporcional ao campo externo a que

se quer medir. Os magnetômetros *fluxgates* em geral possuem duas bobinas ou enrolamentos. A primeira, chamada de enrolamento primário ou excitação, é responsável apenas por provocar a variação da permeabilidade do núcleo, saturando-o periodicamente. A segunda, chamada geralmente de bobina de detecção ou enrolamento secundário, faz a detecção do campo magnético externo que se quer medir. O sinal (tensão ou corrente, dependendo da configuração do magnetômetro) que aparece no enrolamento secundário é amplificado e filtrado e é proporcional ao campo magnético externo.

Para obtenção de bons magnetômetros, é necessário materiais com características especiais, e a escolha desse material é inicialmente a parte mais importante para a obtenção de um magnetômetro de qualidade. Para essa finalidade, um parâmetro importante para a seleção do material magnético do núcleo é o ruído de Barkhausen, que na prática determina os limites de sensibilidade e precisão do sensor a ser construído [4].

Os primeiros magnetômetros deste tipo eram construídos com ligas cristalinas de níquel-ferro, denominadas μ -metal ($\text{Ni}_{77}\text{Fe}_{16}\text{Cr}_2\text{Cu}_5$). Posteriormente, surgiram vários tipos de ligas cristalinas com maior estabilidade, resolução e baixo nível de ruído. A melhor liga conhecida foi desenvolvida pela marinha americana conhecida como 6-81 Mo-Permalloy ($\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{13}\text{Mo}_6$), que foi amplamente aplicada no programa espacial da NASA. Devido ao seu caráter estratégico, a venda dessas ligas é controlada e sua obtenção é extremamente difícil.

Nos anos 80, um grupo do Instituto de Pesquisas Espaciais da Dinamarca, liderado por Fritz Primdahl, iniciou o estudo de novos materiais para compor o núcleo dos magnetômetros a partir de vidros metálicos amorfo. Na seqüência, vários trabalhos [5], [6], e [7] mostraram que algumas fitas de vidro metálico amorfo apresentam excelentes propriedades para aplicação em magnetômetros do tipo *fluxgate*. Assim, Shirae em 1984 [6] realizou com sucesso testes em um magnetômetro *fluxgate* com uma fita amorfa de composição $(\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15})_{0,93}\text{Cr}_7$ usada como núcleo do sensor. Seu único problema foi a baixa temperatura de Curie (50°C) da fita, o que limita a sua aplicação prática. Narod [7] usou uma liga de $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{18}$ obtendo ótimos resultados na construção de magnetômetros de alta qualidade. Nielsen et al. [8] demonstraram os efeitos benéficos dos tratamentos térmicos aplicados às fitas amorfas, permitindo a redução dos ruídos intrínsecos dos magnetômetros a níveis de 17pT rms numa faixa de 0,05 a 6 Hz., como também do seu *offset*.

Os materiais para aplicação em núcleos de magnetômetros *fluxgate* devem ser magneticamente macios, para que o estado de saturação possa ser obtido com uma baixa corrente de excitação. Em materiais ferromagnéticos, entretanto, o processo de magnetização é acompanhado por movimentação das paredes dos domínios magnéticos, o que produz um aumento do ruído de Barkhausen.

O processo de magnetização é altamente relacionado com a anisotropia magnética interna do material do núcleo.

Se o eixo de fácil magnetização for paralelo ao campo magnetizante, o processo de magnetização é dominado pela movimentação das paredes dos domínios magnéticos. Isso significa que se deve esperar um alto ruído de Barkhausen, cujo efeito foi descrito e analisado por Nielsen et al. [9]. Por outro lado, se o eixo de difícil magnetização for paralelo ao campo magnetizante, o processo de magnetização é dominado pelo processo de rotação coerente. Neste caso, a movimentação das paredes dos domínios é substancialmente reduzida, ocasionando baixo ruído de Barkhausen, [9].

Com processos térmicos bem definidos e controlados, consegue-se obter um material com as características magnéticas apropriadas. Um tratamento térmico sob tensão (tração mecânica) produz um eixo de difícil magnetização sem anisotropia, um fato bastante desejável, devido ao seu baixo nível de ruído. Em um processo de tratamento térmico ótimo, obtêm-se o mais baixo nível de ruído e *offset* do núcleo tratado, sendo o ruído independente do ângulo de rotação do núcleo em relação à bobina sensora.

Recentemente, surgiu uma liga amorfa vendida comercialmente com o nome VITROVAC 6025 de composição $(\text{CoFe})_{70}(\text{MoSiB})_{30}$ com resultados similares à melhor liga amorfa testada ($\text{Co}_{66,5}\text{Fe}_{3,5}\text{Si}_{12}\text{B}_{18}$), conforme relatado por Nielsen et al. [9]. Vários magnetômetros foram confeccionados com essa liga e chegou-se a conclusão que o uso do VITROVAC 6025 como núcleo produz magnetômetros *fluxgates* de alta qualidade [9] com desempenho similar ou melhor ao obtido com o uso das melhores ligas cristalinas já desenvolvidas. Foram esses resultados que justificaram a decisão tomada para, neste projeto, desenvolver um núcleo magnético utilizando-se o material amorfo Vitrovac 6025.

Devido às vantagens já conhecidas, o núcleo de material amorfo foi construído seguindo a configuração em anel. Para isso, foi desenvolvido um suporte em anel de 25mm feito de MACOR com uma fenda de 1mm de largura por 0,5mm de profundidade que foi preenchida com onze camadas de fita amorfa Vitrovac 6025 de 1mm de largura por 0,025mm de espessura. Nesse núcleo foi enrolada uma camada com 225 espiras de fio de cobre de 0,28 mm de diâmetro. Essa fita teve um tratamento térmico especial com a finalidade de se obter um eixo de difícil anisotropia magnética, o que reduz a histerese praticamente a zero. O tratamento térmico foi realizado em duas etapas, sendo a primeira com duração de uma hora a uma temperatura de 328°C para alívio de tensão do material. Logo após, foi realizado um re-cozimento sob tensão de 200Mpa, aplicado na direção longitudinal da fita, também com uma hora de duração.

A bobina detetora foi confeccionada usando como base um suporte de policarbonato sobre o qual foi enrolada uma bobina com seis camadas, totalizando 891 espiras de fio de cobre de diâmetro de 0,2mm. As figuras de 1 a 3 mostram, respectivamente, o núcleo sensor, o sensor tri-axial completo e o sensor tri-axial completo em seu invólucro externo.

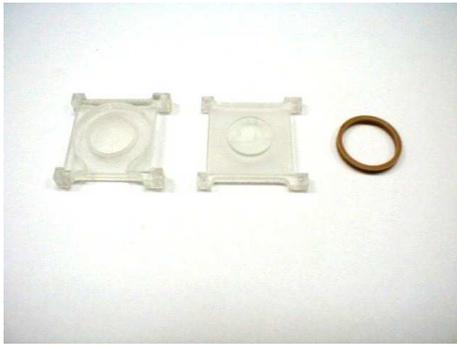


Figura 1. Foto do núcleo sensor.

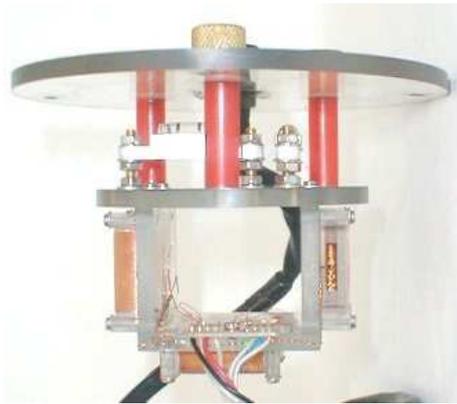


Figura 2. Foto lateral do sensor triaxial completo.



Figura 3. Fotos do sensor triaxial completo, componente eletrônico de aquisição de dados e de seu invólucro.

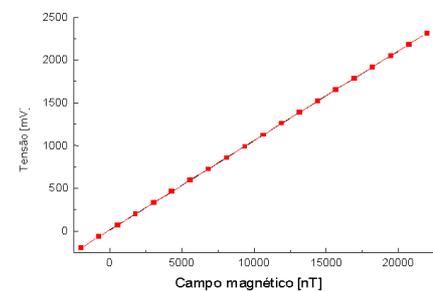
3 Testes de linearidade e ruído

No sensor desenvolvido tem-se a possibilidade de rotacionar o núcleo em anel internamente à bobina detetora, posicionando-o de tal forma a se obter o menor *offset*

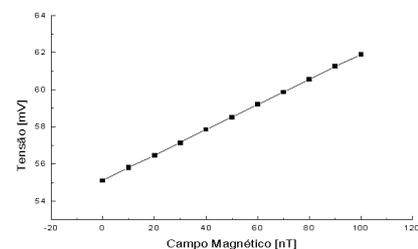
possível. Este é determinado posicionando o sensor paralelamente a um campo magnético conhecido, medindo o valor da tensão de saída, rotacionando o sensor em 180 graus e medindo novamente o valor da tensão de saída. Faz-se a média dos dois valores encontrados e o resultado é o valor correspondente ao *offset* daquele canal. Utilizando-se uma bobina de Helmholtz de tal forma a anular o campo em cada eixo do sensor, aplica-se um campo magnético conhecido, ora positivo ora negativo, para a obtenção do *offset* de cada magnetômetro. Trata-se de um procedimento bastante trabalhoso devido à necessidade de alinhamento e nivelamento do eixo do sensor com o eixo da bobina de Helmholtz. Após o procedimento para se anular os campos, há a necessidade de se fazer as medidas rapidamente para que as variações magnéticas que ocorrem no campo magnético da Terra não interfiram nas determinações.

A fonte de precisão de corrente que faz parte do conjunto de teste denominado “Bobina de Helmholtz” é ligada com antecedência de 15 minutos, para a fonte alcançar a estabilidade de corrente necessária ao teste. Esse procedimento foi repetido para todos os eixos e, aplicando valores alternados de + 1000 nT e - 1000nT, não foi observado *offset* do sensor maior que 0,5 nT para nenhum dos três canais (x,y,z) testados.

O teste de linearidade é mostrado na figura 4, onde a figura 4(a) mostra as variações para faixa de campo magnético estreita e a figura 4(b) para faixas amplas. Os resultados indicam uma ótima resposta conforme esperado em um magnetômetro *fluxgate* realimentado. A relação linear mostra uma sensibilidade do sensor de 14 nT/mV.



(a)



(b)

Figura 4. Teste de linearidade, para faixa estreita à esquerda e faixa ampla à direita.

O teste de ruído, como mostra o gráfico de densidade espectral de potência de ruído (Figura 5), confirma a expectativa do bom funcionamento do magnetômetro com núcleo de material amorfo. Para uma largura de faixa de aproximadamente 1Hz, o ruído calculado a partir do gráfico de potência de ruído é de aproximadamente 15 pT, indicando a sua alta qualidade e ruído muito baixo.

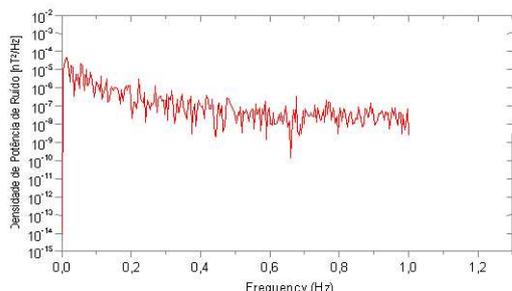


Figura 5. Densidade espectral de ruído.

4 Sistema digital de aquisição de dados

O componente digital desenvolvido para realizar as medidas GDS é um sistema digital completo de aquisição de dados e consiste de várias placas eletrônicas conectadas a um barramento de dados/endereços/controle de forma a colher dados magnético e salvá-los em uma memória portátil (Figura 3). As placas que fazem parte do sistema são: unidade de processamento e controle (UCP), conversor analógico-digital, conversor DC-DC e memória principal. Além das placas, temos duas chaves para entrada de dados e programação, e um *display* de cristal líquido.

A placa UCP utiliza o microcontrolador AT89S8252 da Atmel, a qual comanda toda a operação de controle, e é responsável por toda e qualquer decisão operacional automática do sistema. Trata-se de um *chip* que mantém compatibilidade de software/hardware com o 80C51 da família de *chips* MCS-51 da Intel Corp.. Ele apresenta as seguintes características principais: 8K *bytes* de memória *flash* reprogramável, interface serial SPI, 2K *bytes* de EEPROM, tensão de alimentação podendo variar na faixa de 4V a 6V, 256 *bytes* de RAM interna, 32 linhas programáveis de entrada/saída, um canal serial –UART, 3 temporizadores/contadores de 16 *bits* programáveis, recuperação do modo *power down* via interrupção, *watchdog timer* programável e dois ponteiros de dados. É compatível com o 80C51 pino a pino e no conjunto de instruções. Seu modo *power down* mantém o conteúdo da memória RAM, interrompe o funcionamento do relógio, desabilitando todas as outras funções do *chip* até que ocorra um *reset* de *hardware* ou uma interrupção externa. Essa função é de extrema importância devido ao equipamento necessitar permanecer “dormindo” (só com funções essenciais em funcionamento),

ou “acordado” (funcionamento pleno), para economia de energia.

O equipamento, denominado GDSU (*Geomagnetic Deep Sounding Unit*) utiliza-se de um conversor analógico/digital de 22 *bits* e filtros digitais programáveis de forma a dar melhor resolução aos dados obtidos. O equipamento permite operar com uma resolução de até 17 pT. Os dados são armazenados em cartões de memória tipo *flash*, os quais podem ser facilmente recolhidos pelo usuário sem a interrupção nem remoção do equipamento, bastando apenas ser substituído por uma novo cartão. Esse procedimento permite a continuação ininterrupta da operação.

O GDSU permite a programação para o início e fim da coleta de dados, podendo vários equipamentos serem instalados e iniciarem sua operação no mesmo instante, já que cada GDSU tem um relógio de tempo real *on board*. A frequência de amostragem também pode ser programada (para múltiplos de segundos, minutos, horas ou dias da semana), obedecendo apenas os tempos necessários para o equipamento “acordar” e estabilizar (1s), fazer as medidas e voltar a “dormir” (1s). No modo “dormir”, só áreas essenciais permanecem ligadas (basicamente memória RAM e relógio de tempo real), o que permite operar esse equipamento em campo por vários meses, utilizando-se baterias comuns.

5 Avaliação dos magnetômetros amorfos

O sensor desenvolvido apresenta uma faixa de medidas que pode ser facilmente alterada, dependendo da necessidade dos estudos a serem conduzidos. Para esta aplicação em levantamentos GDS, os magnetômetros foram calibrados para uma faixa de medidas entre -35.000 e + 35.000 nT, apropriada para as condições observadas no território nacional. A resolução dos dados também pode ser facilmente modificada, podendo funcionar de 18bits a 22 bits de resolução, o que permite medidas de 0,27nT a 0,017nT, dependendo da resolução selecionada.

Testes operacionais foram realizados com o equipamento GDSU operando continuamente por mais de 70 dias, em uma área interna do INPE e também dispostos em grade localizada no estado do Rio Grande do Sul, pelo mesmo período. O acompanhamento de seu funcionamento mostrou ser um equipamento robusto, de fácil instalação, com operação remota sem necessidade de ajustes ou manutenção durante o período instalado. Além disso, o sistema sensor, após a sua retirada, foi encontrado em perfeito estado, não tendo havido problemas com umidade e nem com perda de dados.

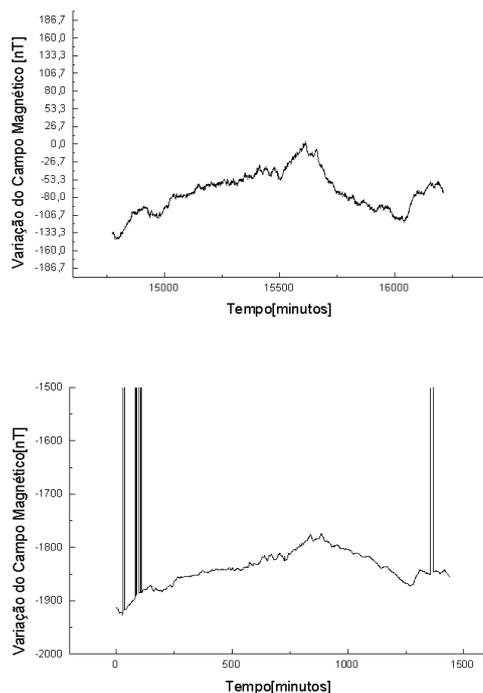


Figura 6. Dados geomagnéticos na componente H no dia 4 de março de 2003, comparando o equipamento GDSU (acima) com dados brutos do Observatório de Vassouras (abaixo).

Os dados obtidos no INPE podem ser diretamente comparados com aqueles disponíveis para o observatório de Vassouras, a uma distância de cerca de 250 km. A figura 6 mostra a comparação da componente H dos dois magnetômetros para o dia 04 de março de 2003. Observe-se que os dados de Vassouras são dados ainda sem tratamento para eliminar variações claramente artificiais (que nesse caso podem ser observadas no início e no final do dia). De qualquer forma, a comparação visual sugere um bom funcionamento do nosso equipamento, com o formato da curva e amplitude das variações bastante similares. Análises mais detalhadas de seu desempenho no campo estão atualmente sendo realizadas e brevemente seus resultados serão disponibilizados.

6 Aplicação em Sondagens Geomagnéticas Profundas

Os sistemas GDSU desenvolvidos no INPE foram instalados na forma de grade na região sul do Brasil, como mostra a figura 7. Operaram no período entre 26 de fevereiro de 2003 e 30 de maio de 2003, em conjunto com os equipamentos GDS da Flinders University da Austrália, sendo 25 estações australianas e 18 brasileiras. O mapa da figura 7 mostra a disposição e o número de identificação do equipamento instalado no local para o período referido.

Após o período da coleta, os dados armazenados em cartão de memória tipo “flash” foram recolhidos e lidos, e

os dados armazenados na forma binária foram convertidos para decimal num arquivo de quatro colunas de dados que representam os campos magnéticos H_x , H_y , H_z e a temperatura T .

A primeira inspeção nos arquivos para verificação do funcionamento dos equipamentos foi a comparação das variações diárias do campo magnético terrestre nas três direções. Essas comparações foram realizadas com dados dos equipamentos australianos instalados e também com os dados do Observatório Nacional de Vassouras (Figura 8).

A apreciação visual pode ser um bom indicativo qualidade dos dados coletados. Essa apreciação geralmente é feita utilizando-se de magnetogramas empilhados, que permitem a comparação rápida das variações diurnas entre as estações (Figura 8).

Nos magnetogramas comparativos, estão identificados os três eixos vetoriais medidos pelos sistemas GDSU (X, Y e Z) do dia 01 de abril de 2003 e representam as componentes H, D, e Z, ou seja, a componente horizontal, a declinação e a componente vertical do campo magnético. As identificações marcadas como M04, M12 e M13 referem-se aos magnetômetros GDSU brasileiros, e as identificadas como M27 e M54 aos magnetômetros australianos. A identificação VSS é do magnetômetro do observatório de Vassouras.

O comportamento do conjunto de dados dos equipamentos GDSU foi animador e mostrou muita coerência, com variações diurnas e flutuações bastantes correlacionadas nas componentes horizontais de todas as estações (H_x e H_y), já que a componente vertical (H_z) é bastante dependente da condição local onde o equipamento está instalado, como indica a figura 8.

Para estimar a função de transferência foi utilizada uma técnica de avaliação de uma função de transferência estatisticamente confiável, conhecida como técnica de regressão robusta [10], considerada por vários autores o estado da arte do processamento GDS. A técnica não assume a distribuição Gaussiana do erro, implícita no método dos mínimos quadrados, e ainda diminui o peso da influência de eventos de alta potência, que tende a dominar pelo método dos mínimos quadrados.

Utilizando-se deste método no conjunto de dados coletados no sul do Brasil, e basicamente aplicando-se uma decimação em cascata de três níveis por um fator de 4 sucessivamente aplicadas numa janela para FFT de 128 pontos com 25% de sobreposição (*overlap*), e habilitando uma estimativa de função de transferência para 13 bandas no período de 320s a 10240s, obtivemos os resultados mostrados nas figuras 9 e 10, para os magnetômetros GDSU e da Universidade Flinders, respectivamente.

As figuras 9 e 10 contêm cada uma 4 gráficos. Os primeiros três representam uma aplicação da densidade espectral de ruído em cima dos dados dos canais H, D e Z (Horizontal, declinação e vertical, respectivamente). Observando o comportamento desses gráficos é possível identificar algum sinal espúrio numa determinada frequência, que poderia comprometer a análise dos resultados gerados a partir desses dados. Qualquer sinal espúrio com alguma periodicidade apareceria na forma de um pico no gráfico de densidade espectral. Portanto, é uma ferramenta de pré análise

dos sinais, que serve para avaliar os níveis de ruído nas frequências desejadas. Nota-se um bom comportamento dos sinais medidos, aparecendo os picos das variações diurnas e nenhum outro pico comprometedor, tanto na figura 9 como na 10. Portanto verifica-se que não existe ruído coerente em algum canal de dados que possa comprometer o processamento seguinte. O quarto gráfico apresentado, tanto na figura 9 como na 10, representa o cálculo dos autovalores dos sinais medidos. Esse gráfico serve para orientar os procedimentos seguintes do processamento, podendo o processamento precisar passar por um segundo estágio, para separar o ruído coerente do sinal MT desejado. Utilizando-se um estimador de erro multivariado robusto (RMEV) no programa de processamento [11], estima-se o nível de ruído ambiente (*background noise*) e faz-se a limpeza de todos os canais, determinando a “dimensão de coerência M” das duas grades de dados. Na ausência do ruído coerente, M será igual 2, correspondendo às duas polarizações da fonte magnética de campo de ondas plana MT. Quando os dados estão fortemente contaminados por ruídos coerentes, M será

maior que 2, sendo uma clara advertência de contaminação dos dados por ruídos. Graficamente, deve ser observado se apenas dois sinais no gráfico de sinal/ruído se destacam dos demais para o período de análise desejado, caso contrário, é necessário procedimentos para descontaminação do sinal por ruído coerente. Nos gráficos de autovalores das figuras 9 e 10, notamos dois sinais se destacando dos demais (a dimensão de coerência $M=2$) indicando a descontaminação dos dados por uma outra fonte que não seja aquelas devido ao campo de onda plana MT.

Para mostrar e isolar a informação contida na função de transferência da distribuição da condutividade nas vizinhanças dos locais medidos, mapas de vetores de indução são os mais usados e ajudam a melhor visualização da representação.

As funções de transferências complexas são usadas para definir um par de vetores de indução, cada um representando, respectivamente, a parte real e a parte de quadratura. A magnitude das partes real e de quadratura dos vetores de indução foram obtidas a partir das fórmulas:

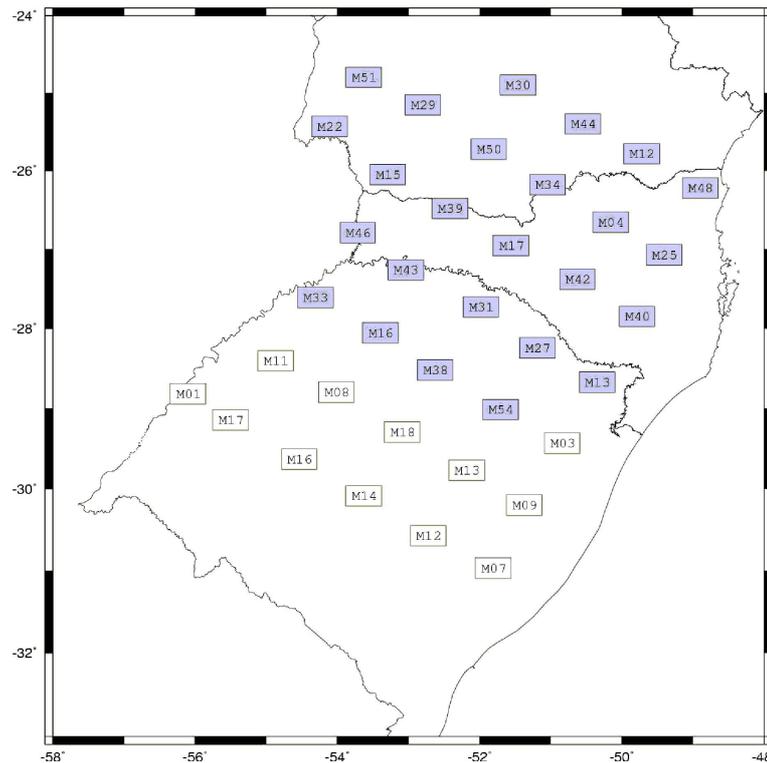


Figura 7. Distribuição Geográfica dos Magnetômetros GDSU-INPE (retângulos claros) e das Flinders University (retângulos sombreados).

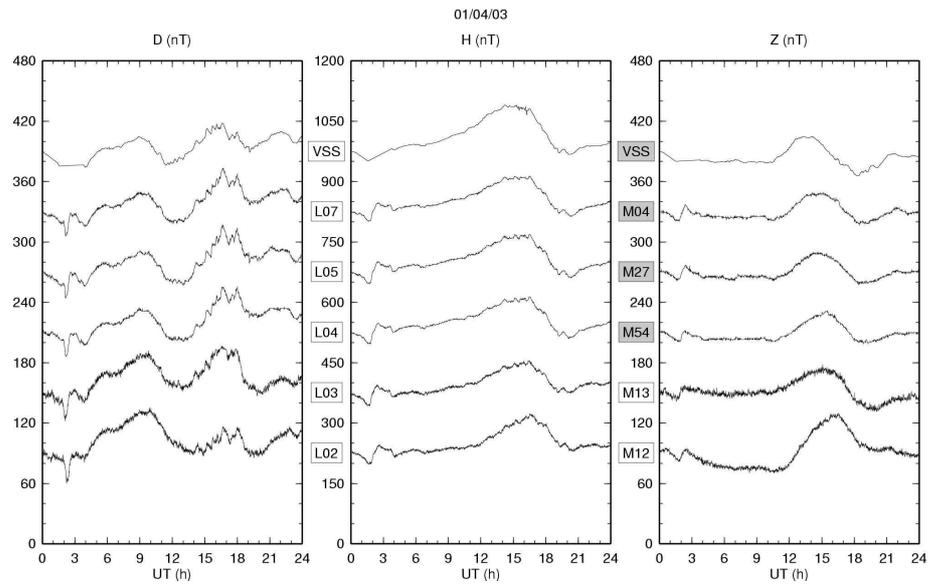


Figura 8. Magnetogramas comparativos obtidos de magnetômetros GDSU-INPE (M04, M12, M13), Flinders University (M27 e M54) e do Observatório de Vassouras (VSS).

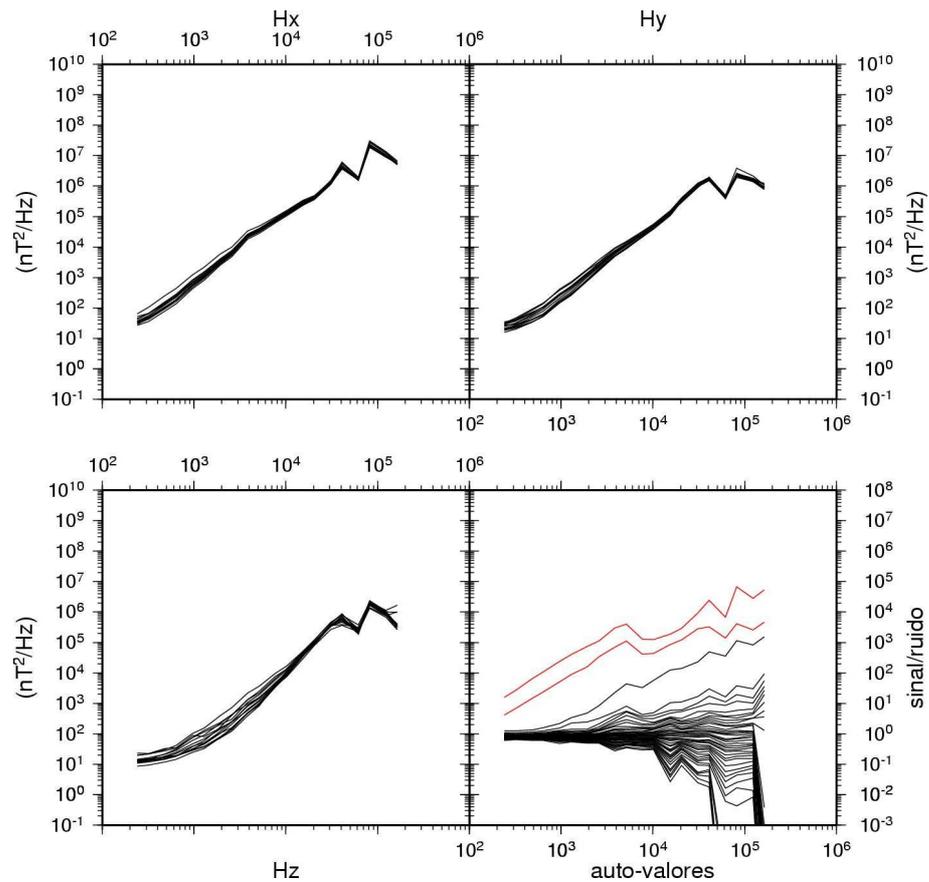


Figura 9. FFT dos dados da Universidade Flinders - Australia.

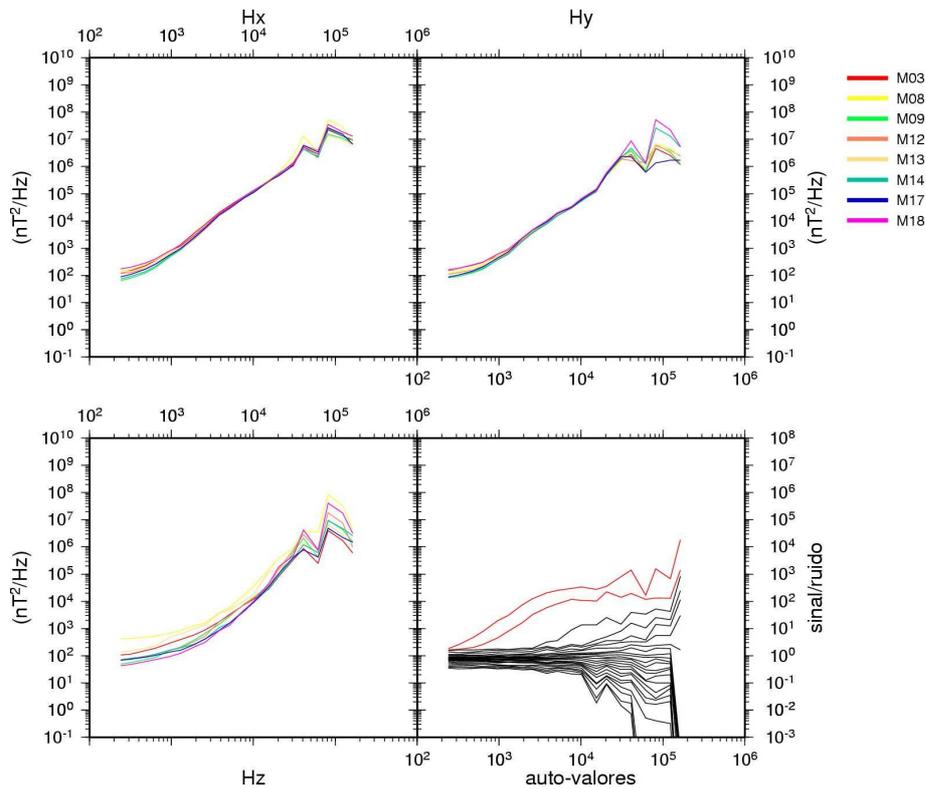


Figura 10. FFT dos dados do GDSU INPE - Brasil.

$$S_r = \sqrt{(Re(T_{zx}^2) + (Re(T_{zy}))^2}$$

$$S_i = \sqrt{(Im(T_{zx}^2) + (Im(T_{zy}))^2}$$

Para o azimute, o cálculo correspondente para cada um dos sinais (real e quadratura) é de:

$$\theta_r = \tan^{-1} \left(\frac{Re(T_{zy})}{Re(T_{zx})} \right)$$

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{Im(T_{zy})}{Im(T_{zx})} \right)$$

É uma prática usual inverter o sinal do azimute, assim numa representação gráfica, com respeito ao norte magnético, os vetores apontarão para a posição de concentração de corrente e definem a direção de estruturas geológicas que causam concentração de correntes induzidas [12]. Sua magnitude é a medida do campo anômalo vertical, normalizado com o tamanho do campo de indução. Com os dados obtidos na região sul do Brasil devidamente processados, obtiveram-se os vetores de indução mostradas nas figuras 11 e 12, para dois períodos .

7 Conclusões

Após o período da coleta, os dados armazenados em cartão de memória tipo *flash* foram recolhidos e lidos, e os dados armazenados agora na forma binária foram convertidos para decimal num arquivo de quatro colunas de dados que representam os campos magnéticos H_x , H_y , H_z e a temperatura T .

A primeira inspeção nos arquivos para verificação do funcionamento dos equipamentos foi a comparação das variações diárias do campo magnético terrestre nas três direções. Essas comparações foram realizadas com dados dos equipamentos australianos instalados e também com os dados do Observatório Nacional de Vassouras.

A apreciação visual pode ser um bom indicativo do sucesso da coleta de dados de qualidade. Essa apreciação geralmente é feita utilizando-se de magnetogramas empilhados, que permitem a comparação rápida das variações diurnas entre as estações.

O comportamento do conjunto de dados dos equipamentos GDSU foram animadores e mostram muita coerência, com variações diurnas e flutuações bastantes correlacionadas nas componentes horizontais de todas as estações (H_x e H_y), já que a componente vertical (H_z) é bastante dependente da condição de condutividade local onde o equipamento está instalado e é exatamente isso que nos mostram os dados coletados.

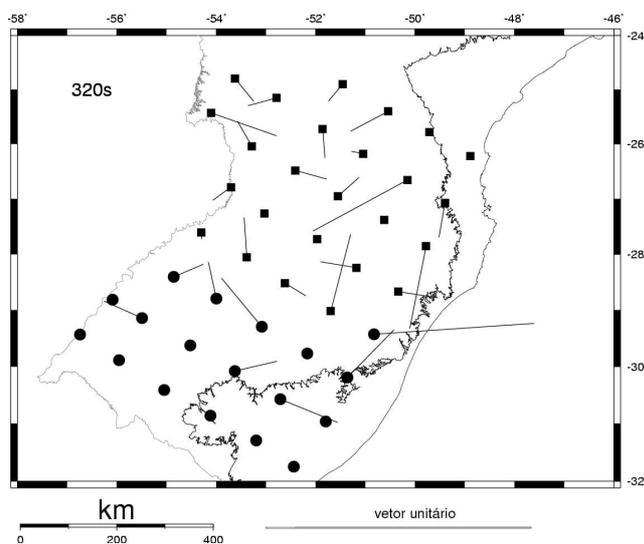


Figura 11. Vetores de indução para o período de 320 segundos.

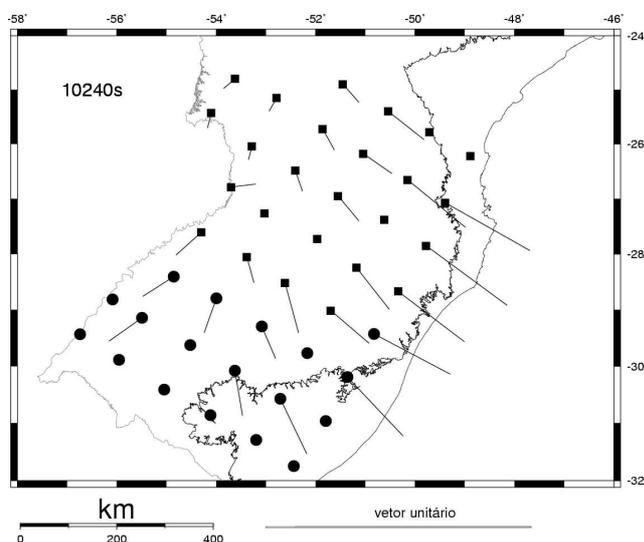


Figura 12. Vetores de indução para o período de 10240 segundos

Para períodos longos, em regiões próximas ao oceano, as flutuações de Z podem ter diferenças significativas. Existe um comportamento conhecido como “efeito costa ou efeito litoral”, que faz com que os vetores apontem para o mar, devido à concentração de correntes induzidas na água do mar, e ao contraste da condutividade entre a massa de terra e o mar [13]. Esse efeito foi utilizado na nossa escolha da grade de instalação de forma a colocar alguns magnetômetros *fluxgates* próximos à costa brasileira antecipando que eles apontassem em direção ao oceano. Isso pode ser verificado observando os magnetômetros M09, M03, M13 e M40, instalados mais próximos à costa (Figura 12), que para o período analisado (10240s) mostram vetores de indução apontando em direção ao oceano, como esperado.

De fato, a direta influência de tais correntes pode oferecer uma situação perigosa na determinação e quantificação de uma condutividade anômala interior. Entretanto, a correta estimativa e quantificação do efeito costa torna-se um

passo integrante do processamento de dados GDS e de seu modelamento numérico.

Os magnetômetros GDSU estão sendo utilizados para coleta de dados em todo território nacional e análises mais detalhadas de seu desempenho no campo estão atualmente sendo realizadas e brevemente seus resultados serão disponibilizados.

Em resumo, neste trabalho foram abordadas as principais componentes do sensor *fluxgate* desenvolvido no INPE e com interesse em aplicações geofísicas no Brasil. Não há restrições intransponíveis para a construção do sensor com o material disponível no país, tendo-se buscado desenvolver uma instrumentação com características técnicas condizentes com as variações do campo em território nacional. Outras feições importantes do sistema, tais como a escolha do par de harmônicos utilizados na saída do sensor para representar o campo externo e de uma faixa dinâmica maior para o eixo z , em relação aos horizontais estão também sendo estudados [14].

8 Agradecimentos

Este estudo está sendo desenvolvido com financiamento do Fundo Setorial CT-Mineral (Convênio FINEP/ADIMB, 2.2.01.0686.00), da FAPESP (processos 00/00806-5, 99/12381-0 e 01/02848-0) e do CNPq (processos 475615/01-8, 350683/94-8, 351398/94-5 e 381576/02-7).

Referências

- [1] Trivedi, N.B., Ogura, F.X.K., Andrade, J.C., Costa, J.M., Barreto, L.M., 1995. A ring core fluxgate Magnetometer for IEEY Program in Brazil. *Brazilian Journal of Geophysics*, **13**, 151-155.
- [2] Trivedi N.B., Kane, Russel, C.T., Barbosa, M.J.B., Dutra, S.L.G., Teixeira, N.R., Means, J.D., Neri, J.A., 2000. Geomagnetic field measurements on a polar microsatellite SACI-1. *Adv. Space Res.*, **25** (7/8)1315-1323.
- [3] Kabata, W., 2000. Magnetômetro fluxgate para satélites científicos. Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA. Tese.
- [4] Ripka, P., 1992. Review of “fluxgate” sensors. *Sensors and Actuators A*, **33**, 129-141.
- [5] Benyosef, L.C.C.; Teodosio, J.R.; Taranichev, V.E.; Zalnin, B.V. and Nemova, O. Yu., 1996. Effect of Stress on the Magnetic Properties of Amorphous Ribbons for Fluxgate Magnetometers. *Journal of Advanced Materials*, Num. **3**(2) 140-143.
- [6] Shirae, K., 1984. Noise in amorphous magnetic materials. *IEEE Trans. On Magnetics*, **MAG-20**, 1299-1301.
- [7] Narod, B.B., Bennest, J.R., Stron-Olsen, J.O., Nezil, F., Dunlap, R.A., 1985. An evaluation of the noise performance of Fe, Co, Si and B amorphous alloys in ring-core fluxgate magnetometers. *Can. J. Phys.*, **63**, 1468-1472.
- [8] Nielsen, O.V., Petersen, J.R. Hernando, B., Gutierrez, J., 1991. Analysis of a fluxgate magnetometer based on metallic glass sensors. *Meas. Sci. Technol.*, **2**, 435-440.

- [9] Nielsen, O.V., Brauer, P., Primdahl, F., Risbo, T., Jorgensen, J.L., Boe, C., Deyerler, M., Bauereisen, S., 1997. A high precision triaxial fluxgate sensor for space applications: layout and choice of materials, *Sensors and Actuators A*, **59**, 168-176.
- [10] Egbert, G.D., Booker, J.R., 1986. Robust estimation of Geomagnetic transfer functions. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **87**, 173-194.
- [11] Egbert, G.D., 1997. Robust multiple-station magnetotelluric data processing. *Geophys. J. Int.*, **130**, 475-496.
- [12] Arora, B.R., Trivedi, N.B., Vitorello, I., Padilha, A.L., Rigoti, A., Chamalaun, F.H., 1999. Overview of Geomagnetic Deep Sounding (GDS) as applied in the Parnaíba Basin, north-northeast Brazil. *Brazilian Journal of Geophysics*, **17**(1), 43-65.
- [13] Chamalaun, F.H., McKnight, J.D., 1993. A New Zealand Wide Magnetometer Array Study. *J. Geoelectr.*, **45**, 741-759.
- [14] Kabata, W., Vitorello, I., Padilha, A.L., Cunha, W.C., 2003. On the dependence of even harmonics with excitation currents in fluxgate magnetometers. *8th Int. Cong. Braz. Geophys. Soc.*, Rio de Janeiro, 4 páginas.