



Magnetômetro tipo *Fluxgate* para aplicações em Sondagens Geomagnéticas Profundas (GDS) no Brasil

Wanderli Kabata, Maria J.F. Barbosa, Kelson Batista, Marcelo B. Pádua, Maurício S. Bologna, Ícaro Vitorello, Antonio L. Padilha, INPE, Brazil
Wagner C. Cunha, ITA, Brazil

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper were reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does 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.

Resumo

Os magnetômetros construídos no INPE para aplicações em Geofísica são do tipo *fluxgate*, com núcleos de material amorfo (fitas vidro metálicas) em três eixos ortogonais, que registram as variações do segundo harmônico do campo nestas direções e são especialmente robustos para trabalhos de campo em regiões tropicais. São apresentadas discussões para a escolha do material magnético do núcleo (Vitrovac 6025), a construção desses núcleos, o desenvolvimento do sistema de aquisição de dados, as correções de temperatura, os testes de linearidade e ruído, além de comparações com dados de outras fontes. Os resultados indicam um sensor de alta sensibilidade (1,6 nT/mV), baixo ruído (ao redor de 15 pT), resolução entre 0,27 e 0,01 nT e faixa dinâmica (+/- 35.000 nT), apropriada para os valores do campo que predominam em regiões tropicais.

Introdução

Diversas técnicas geofísicas foram desenvolvidas para se obter informações do interior da Terra, fazendo uso de medidas do campo magnético terrestre. As distorções dos campos elétricos e magnéticos naturais registradas na superfície da Terra fornecem relevantes informações sobre a distribuição dos parâmetros geoeletricos na crosta e manto superior. Os modelos geoeletricos elaborados a partir dessas medidas fornecem uma visão das regiões onde se encontram zonas mais condutoras, interpretadas em função da natureza das rochas a grandes profundidades e de processos tectônicos que possam ter ocorrido sob a região estudada.

Em anos recentes, essas técnicas têm sido bastante aplicadas principalmente em estudos da litosfera, devido ao seu baixo custo relativo, associado aos avanços em equipamentos para coleta de dados e em algoritmos de tratamento e processamento desses mesmos dados.

Uma dessas técnicas faz uso de medidas das variações geomagnéticas naturais de longo período (de alguns segundos até centenas de minutos), nas suas três componentes ortogonais, através da instalação de vários magnetômetros *fluxgate* dispostos em forma de grade e operados simultaneamente. Conhecida pela sigla GDS (Geomagnetic Deep Sounding) é constituída por

sondagens geomagnéticas profundas cujos resultados são usados de forma qualitativa para localizar e mapear distribuições anômalas de condutividade elétrica, geralmente relacionadas a características geoestruturais profundas. Um outro trabalho apresenta os resultados preliminares de um levantamento GDS em andamento no sudeste do Brasil (Subba Rao et al., 2003).

A dificuldade da aplicação desse método no Brasil reside na obtenção de um número suficiente de magnetômetros tipo *fluxgate* de alta qualidade, para serem distribuídos em grade geográfica que cubra ampla região, para medir as pequenas variações do campo magnético, que em regiões tropicais têm valores bem mais baixos que nas regiões de média e alta latitude. Ao mesmo tempo, os instrumentos devem ser robustos, portáteis, leves, de baixo consumo, de fácil instalação no campo e com acesso mecânico externo, para o seu alinhamento e nivelamento, e à prova de infiltração de água.

Recursos financeiros foram obtidos do Fundo Setorial CT-Mineral, FAPESP e CNPq para o desenvolvimento e fabricação de 20 magnetômetros no INPE. O maior empecilho para a realização deste projeto de construção foi o de fabricar o núcleo do sensor com os mais recentes materiais desenvolvidos, conhecidos como materiais amorfos. O desenvolvimento desses núcleos possibilitou um importante avanço tecnológico 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 de origem dos fabricantes.

Além da construção desses núcleos, a experiência anterior adquirida pela equipe no desenvolvimento e fabricação de magnetômetros *fluxgate* com núcleos cristalinos para aplicações espaciais, foi fundamental no planejamento, desenvolvimento e calibração do magnetômetro descrito neste trabalho.

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. A escolha desse material é 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 (Ripka, 1992).

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 Prindahl, iniciou o estudo de novos materiais para compor o núcleo dos magnetômetros a partir de vidros metálicos amorfos. Na seqüência, vários trabalhos mostraram que algumas fitas de vidro metálico amorfo apresentam excelentes propriedades para aplicação em magnetômetros do tipo *fluxgate*. Assim, Shirae (1984) realizou com sucesso testes em um magnetômetro *fluxgate* com uma fita amorfa de composição $(\text{Co}_{67}\text{Fe}_3\text{Si}_{15}\text{B}_{15})_{0,93}$ 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 et al. (1985) 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. (1990; 1991) 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. Esse efeito foi descrito e analisado em Nielsen et al. (1991). 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, como também relatado por Nielsen et al. (1991).

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.

Algumas fitas amorfas de composições $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$ e $\text{Co}_{67,5}\text{Fe}_{3,5}\text{Si}_{17,4}\text{B}_{11,6}$ foram obtidas com sucesso pelo processo de "melt spinning", no Instituto de Física da Universidade de São Paulo (Benyosef et al., 1994). Esta experiência realizada no Brasil é importante para a construção de magnetômetros sem as restrições de importação destes materiais.

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. (1997). Vários magnetômetros foram confeccionados com essa liga e chegou-se a conclusão que o uso do VITROVAC 6025 como núcleo produz magnetômetros *fluxgate* de alta qualidade (Nielsen et al., 1997) 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 comentadas, 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 1 a 3 mostram o núcleo sensor, o sensor tri-axial completo e em seu invólucro externo, respectivamente.

Testes de linearidade, temperatura, ruído e calibração

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 ou 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 x , y e z , 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, indicando uma ótima resposta conforme esperado em um magnetômetro *fluxgate* realimentado. A relação linear demonstra uma sensibilidade do sensor de 1,6 nT/mV.

Testes de temperatura foram necessários para verificar o deslocamento da tensão de saída devido às variações de temperatura às quais o sensor está sujeito no campo. O teste foi realizado no Laboratório de Integração e Testes do INPE utilizando a câmara termo-climática padrão para testes ambientais. Devido aos ruídos magnéticos ambientais do laboratório serem de amplitude muito maior que as variações naturais esperadas, também foi necessário o uso da câmara de blindagem magnética neste teste. Dessa forma, o sensor foi colocado dentro da blindagem magnética e todo o conjunto foi colocado dentro da câmara térmica. Sensores de temperatura foram espalhados nos pontos considerados importantes. Nitrogênio gasoso foi inserido na câmara climática para evitar a condensação interna. Com esse procedimento, obtiveram-se os dados de variações da resposta do equipamento com a temperatura, o que permite a posterior correção dos dados a serem obtidos devido a variações locais de temperatura (observe-se que na sua utilização prática o sensor é instalado no subsolo, nos locais escolhidos para as medidas).

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.

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/controlado de forma a colher dados magnéticos 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 um 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.

Discussão e conclusões

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.

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.

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 (Kabata et al., 2003).

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

- Benyosef, L.C.C.**, 1995. Caracterização de Materiais Magnéticos Amorfos, de base Cobalto, para sensores de Magnetômetros Fluxgate. Tese de Doutorado, PE/UFRJ.
- Narod, B.B., Bennest, J.R., Stron-Olsen, J.O., Nezil, F. and 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.
- Nielsen, O. V., Gutierrez, J, Hernando, B. and Savage, H. T.**, 1990. A new amorphous ribbon fluxgate sensor based on torsional-creep induced anisotropy. *IEEE Trans. Magn.*, 26, 276-280.

Nielsen, O.V., Petersen, J.R. Hernando, B. and Gutierrez, J., 1991. Analysis of a fluxgate magnetometer based on metallic glass sensors, *Meas. Sci. Technol.*, 2, 435-440.

Nielsen, O.V., Brauer, Primdahl, F, Risbo, T., Jorgensen, J.L., Boe, C. and Ripka, P., 1995. Development, construction and analysis of the "ORSTED" fluxgate magnetometer, *Meas. Sci. Technol.*, 6, 1099-1115.

Nielsen, O.V., Brauer, P., Primdahl, F., Risbo, T., Jorgensen, J.L., Boe, C., Deyerler, M. and Bauereisen, S., 1997. A high precision triaxial fluxgate sensor for space applications: layout and choice of materials, *Sensors and Actuators A*, 59, 168-176.

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 pp.

Ripka, P., 1992. Review of "fluxgate" sensors, *Sensors and Actuators A*, 33, 129-141.

Shirae, K., 1984. Noise in amorphous magnetic materials, *IEEE Trans. On Magnetics*, MAG-20, 1299-1301.

Subba Rao, P.B.V., Padua, M.B., Bologna, M.S., Vitorello, I., Padilha, A.L., Chamalaun, F.H., Rigoti, A., 2003. Preliminary results of ongoing GDS survey in center-southeast Brazil. 8th Int. Cong. Braz. Geophys. Soc., Rio de Janeiro, 4 pp.



Figura 1 – Foto do núcleo sensor.

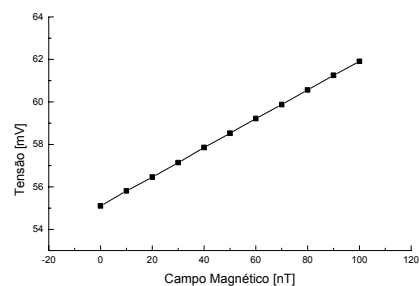


Figura 4 – Teste de linearidade (ver texto).

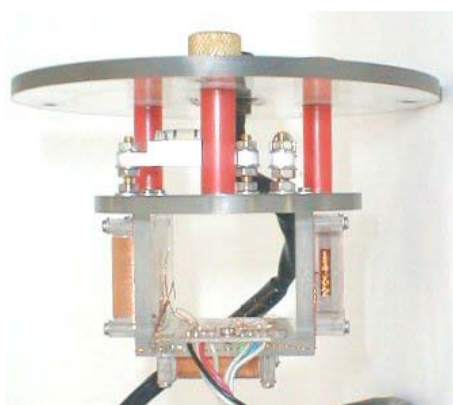


Figura 2 – Foto do sensor triaxial completo.

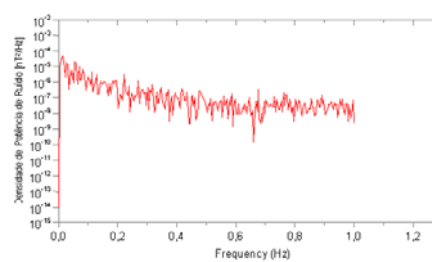


Figura 5 - Teste de ruído (ver texto).



Figura 3 – Fotos do sensor completo e de seu invólucro.

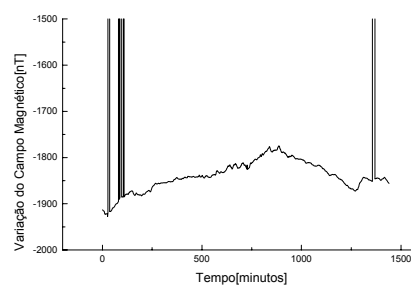
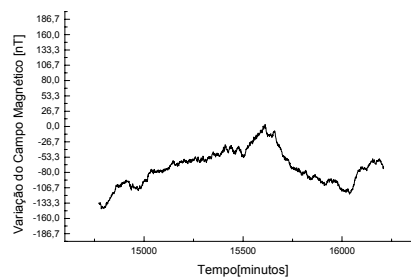


Figura 6 – Dados geomagnéticos na componente H no dia 4 de março de 2003, comparando o equipamento GDSU (parte superior) com dados brutos do Observatório de Vassouras (parte inferior).