



## Análise Espectral Aplicada à Variação Diurna Geomagnética

Luiz Muniz Barreto; MCT/Observatório Nacional/Coordenação de Geofísica

Ney A. B. Seixas; MCT/Observatório Nacional/Coordenação de Geofísica

Copyright 2003, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8<sup>th</sup> 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 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents 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

The main characteristic of diurnal geomagnetic variation is its different aspect from one to other day. However, in a crude approach of the question of diurnal variation change, it is possible to consider an average diurnal variation for a period of several months in the same season or in the same year. In fact, such simplification does not consider some additional components of that variation, such as strong disturbed days, lunar variation, the phase of the solar cycle. One-minute data from the Vassouras Magnetic Observatory, Brazil, for the years 1999 and 2000, were submitted to a spectral analysis. In this analysis, the fundamental harmonic (24 hours) and its main and conspicuous harmonics were well detected. On the other hand, their amplitudes do not present significant differences through the analyzed months. For this reason, this article must be considered as a preliminary step of a more elaborated study.

### Introdução

A variação diurna do campo geomagnético apresenta características peculiares para cada dia considerado, de forma que é impossível existirem dois registros iguais em dias diferentes, inclusive no mesmo local de observação. Tais variações, de um modo geral, levam a considerar três tipos de dias, sob o ponto de vista da atividade geomagnética: os calmos (Q days), os perturbados (D days) e os regulares (R days) (Campbell, 1997).

### Fundamentos

Segundo convenção internacional (estabelecida pela IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) há mais de três décadas) em um mês são considerados os 5 dias mais calmos e os 5 dias mais perturbados de um pequeno número de observatórios selecionados. Embora essa classificação possa ser feita para qualquer observatório, é usual adotar-se os dias Q e D internacionais. A partir deles são definidos os denominados campos SQ e SD, associados à cada grupo de 5 dias. A nomenclatura "S" refere-se ao efeito da radiação solar, responsável pela ionização dos átomos da atmosfera em altitudes próximas a 100 Km. Esta radiação resulta na circulação de elétrons livres, cujo efeito é produzir no solo uma variação do campo geomagnético que se adiciona a um campo quase estável (flat level field). Entre os dias D, podem ser

encontrados alguns com variações de grande amplitude constituindo as chamadas tempestades magnéticas. Elas afetarão qualquer média de amplitudes da variação diurna registrada.

Além destas peculiaridades, é possível constatar uma mudança em seu aspecto com a latitude geomagnética. Por isto é usual adotar o critério de divisão da Terra em zonas distintas: a polar, a equatorial e a de médias latitudes. Na equatorial, em particular, é definida uma região centrada no equador magnético, estendendo-se 6° ao norte e ao sul e formando o denominado eletroto equatorial (EEJ), de grande importância em países como o Brasil, Perú, Paraguai, África e extremo sul da Índia (Onwumechilli, 1959). Na região do EEJ a variação diurna apresenta amplitudes maiores que nas demais. Isto também ocorre nas regiões polares, gerando as denominadas ovas polares.

Outras causas de mudanças na variação diurna ainda podem ser consideradas, tais como a variação lunar e as oriundas do ciclo solar. A variação lunar se origina por efeito das marés lunares atmosféricas, que afastam para mais ou para menos as camadas onde circulam as correntes de elétrons livres. As variações do ciclo solar são causadas pela maior ou menor atividade do Sol e são caracterizadas visualmente pelas manchas solares (fenômeno bem conhecido e registrado há mais de três séculos). Tais variações possuem pequena amplitude (poucos nT) e períodos muito longos, variando de dezenas de dias à dezenas de anos.

Segundo Gama (1966), as variações lunares e do ciclo solar podem ser desprezadas na maioria das aplicações, dentre elas no processamento de dados das estações de repetição. Apesar disto, em uma pesquisa mais aprofundada, essas mudanças devem ser consideradas (o que não foi feito neste trabalho), onde, até o momento, apenas dois anos foram estudados. Nele só foram utilizados dados da componente horizontal (H), pois sua variação em latitudes como a de Vassouras é muito mais sensível que a das outras componentes. Assim, deve-se também levar em conta num estudo mais amplo, o efeito das tempestades magnéticas. Ele afeta a componente H por alguns dias após o máximo da ocorrência, o que é conhecido como fase de recuperação. Certamente ela também afeta os valores das médias mensais. Será interessante pesquisar futuramente um possível relacionamento entre os períodos de repetição das tempestades e o da variação lunar, que são bem próximos.

### Instrumentação, Dados e Considerações Gerais

Foram utilizados dados do sistema INTERMAGNET. No Brasil ele encontra-se no Observatório Magnético de Vassouras (VSS), cujos registros são amostrados com uma taxa de 1 minuto. A metodologia desenvolvida Rangarajan & Barreto (1999), foi previamente aplicada aos dados, visando prepará-los para serem submetidos à análise espectral, detalhada adiante.

O Observatório Magnético de Vassouras (VSS):

	Geográfica	Geomagnética
Latitude	22° 24' S	12° 54'
Longitude	43° 39' W	26° 35'
Altitude acima do nível do mar	460 m	

As coordenadas geomagnéticas são relativas à posição do dipolo geomagnético centrado, de coordenadas geográficas de 79.32° N e 71.83° W, calculadas pelo IGRF-1995, para a época 1999.5.

Variômetro

Orientação do magnetômetro : H , D e Z

Faixa dinâmica : ± 8000 nT

Resolução : 0.1 nT

Tempo de amostragem : 1 segundo

Precisão : 1 nT (ou melhor)

Tipo de filtro : gaussiano, 9 pontos

GIN(Centro Internacional de Recepção de Dados) :  
Golden, CO, USA

Satélite de conexão : GOES E

Medidas absolutas

DI-flux Bartington MATG-01, com teodolito Zeiss 010 (1")

Magnetômetro de precessão de prótons :

PPM Geometrics G-856

Equipamento de reserva

Ruska Observatory Patterns n° 419 e 5502

QHM 534

Earth Inductor Toepfer 86

DI-flux EDA com teodolito Zeiss 020 (0.1')

PPM Geometrics G-816

O equipamento de reserva é usado em situações de eventual interrupção (ou paradas para manutenção) do principal. Um aspecto relevante à seu respeito é o fato de que os magnetogramas analógicos foram submetidos à varredura (scanning). A comparação destes dados com os do INTERMAGNET mostrou uma notável coincidência entre ambos, independentemente de peculiaridades do equipamento analógico, como por exemplo, o movimento de rotação do tambor do papel fotográfico (Carvalho et al. 2000). A figura 1 apresenta a coincidência. Na maioria dos casos ela não ultrapassa 5nT, salvo quando o dia é afetado por tempestade, ou a "variação D" é de grande intensidade. A linha (1c) representa as diferenças entre os registros. Pode-se perceber a presença de uma leve tendência declinante, que é removida com procedimentos estatísticos. Em breve a coerência espectral entre estes sinais também será investigada.

**A Análise Espectral**

É conveniente fazer algumas considerações preliminares sobre aspectos físicos e matemáticos da variação diurna, visando melhor entendimento de suas particularidades. Estudos geofísicos envolvendo dados reais, onde a análise espectral é utilizada como ferramenta para obtenção das informações desejadas, podem ser classificados em duas categorias: os processos estocásticos, resultantes de fenômenos físicos aleatórios e os determinísticos, onde os fenômenos que lhes dão origem são conhecidos e as variáveis aleatórias tornam-

se menos importantes, com participação secundária (ou praticamente desprezível) no efeito resultante.

A variação diurna não pode ser rigorosamente enquadrada em nenhuma destas duas categorias. Rangarajan (1992) afirmou que ela nunca se repete, de modo que o registro de um dia, em diferentes locais, é único. Por outro lado, como será visto adiante, após a realização da análise espectral em uma série temporal com uma dada duração (um mês, por exemplo), tem-se como resultado que a principal frequência corresponde ao período de 24 horas. Além dela, aparecem sempre harmônicos de ordem superior (12, 8, 6 horas,...), dependendo da duração do registro. Eventualmente pode ainda surgir mais alguns a mais.

Considerando os aspectos discutidos anteriormente, tem-se a impressão de "algo contraditório" : não existem dois registros iguais. Entretanto, seu conteúdo espectral apresenta períodos de pico que praticamente repetem um padrão. A explicação para este "impasse" é, simples: a variação pode ser interpretada como um fenômeno físico (ou um sinal) "puro". Contudo, ela não está livre de "contaminações externas", que, em sua maior parte, são espúrias. Por outro lado, tais "contaminações" podem ocasionalmente conter informações associadas a processos físicos relevantes, que se mesclam ao sinal original.

A breve discussão acima serve a dois propósitos: primeiramente mostrar que, mesmo com grande parte dos processos físicos conhecidos, o campo geomagnético varia não só diariamente, mas também com outros intervalos (ou ciclos), que podem ser parecidos, mas não idênticos. Em seguida, justificar a abordagem matemática a ser aplicada: a análise espectral clássica de Fourier, porém considerando a variação diurna como um processo estocástico. Isto permite estimar seus harmônicos com mais precisão, além da reduzir a forte variância existente no espectro.

Quando lida-se com processos estocásticos, é importante ter sempre claro que não existe a *determinação* de uma grandeza física. O que se tem é o seu *estimador*. A obtenção de um bom estimador envolve questões como resolução espectral, tendência, variância e consistência do mesmo, além da técnica de análise utilizada.

A metodologia aplicada, também conhecida na literatura como técnica de Welch (Marple, 1987), tem como objetivo obter estimadores com as menores tendências e variâncias possíveis e maior consistência. Para atingir esta meta, suas 3 etapas podem ser resumidas da seguinte forma: segmentação do registro original em "n" partes iguais, utilização de janela e de um percentual de sobreposição (overlap) aplicado à cada segmento. A figura 2 resume o procedimento. Após vários testes, visando obter um procedimento único para todos os meses estudados, foram adotados:

- 32 graus de liberdade, implicando em 16 segmentos com 4096 minutos de duração cada um.
- janela de Hamming.
- 50% de sobreposição (overlap), significando que cada ponto do espectro é o resultado de uma média de 31 valores.

Um importante detalhe desta metodologia consiste em que cada etapa requer a introdução de fatores de normalização, para que a energia total do espectro seja preservada.

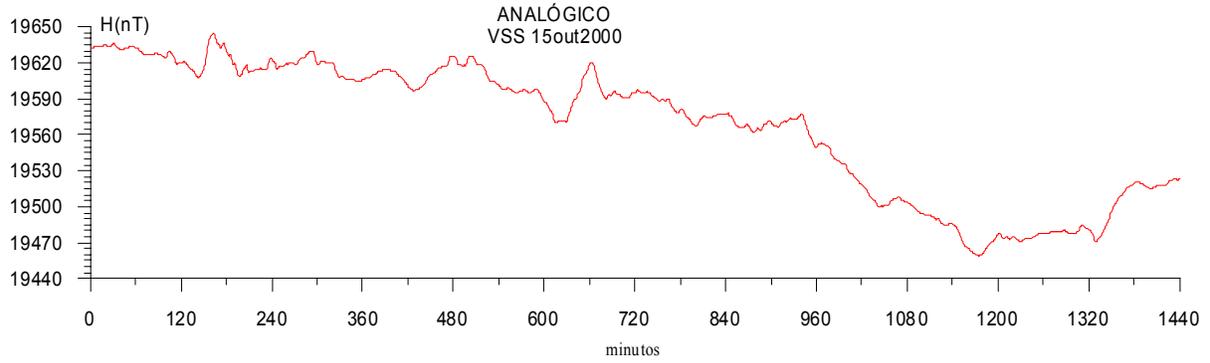


Figura 1a: Registro do equipamento analógico (variômetro).

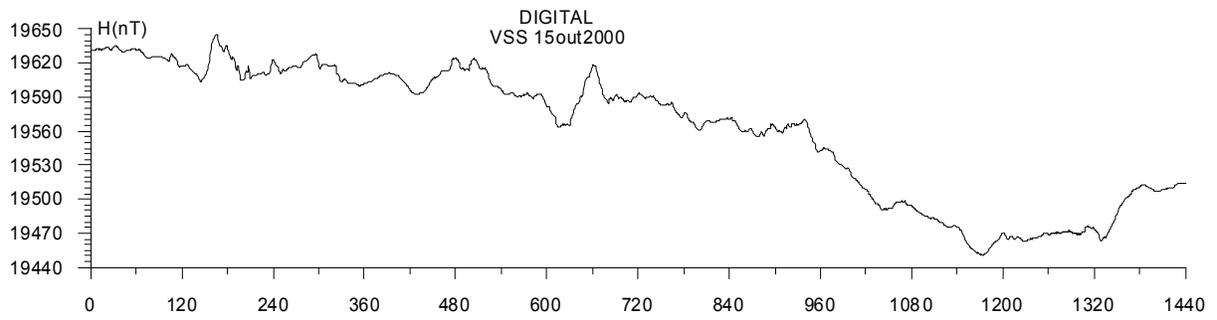


Figura 1b: Registro do equipamento digital (INTERMAGNET).

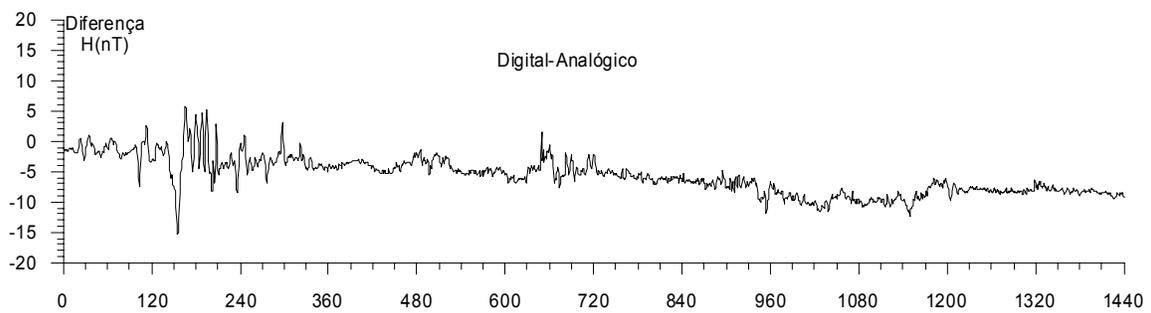


Figura 1c: Diferença entre ambos.

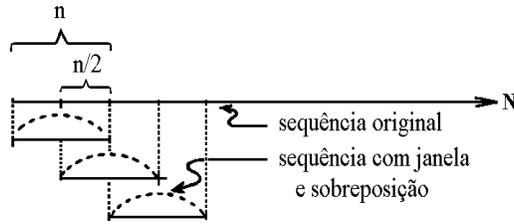


Figura 2: Técnica de Welch: segmentação, janela e sobreposição.

Resultados

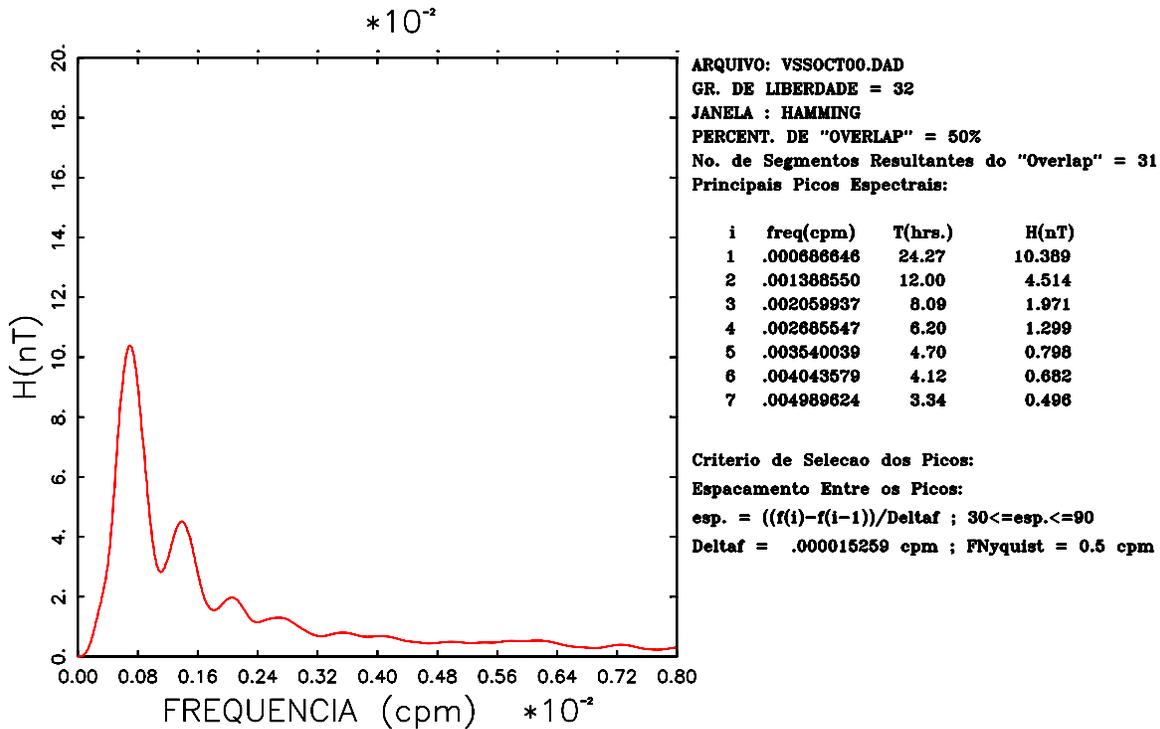


Figura 3: Espectro da variação diurna de Outubro/2000.

A figura acima serve como exemplo para representar os resultados obtidos ao longo dos meses de 1999 e 2000. Antes de considerações a respeito, cabem comentários referentes às informações apresentadas ao lado: inicialmente tem-se a identificação do arquivo (isto é, do mês) processado, onde os 3 primeiros caracteres referem-se ao observatório (VSS), os 3 seguintes ao mês (OCT) e os 2 últimos ao ano (00). As quatro linhas abaixo indicam como a análise espectral de Fourier foi aplicada aos dados, seguindo os procedimentos da técnica de Welch, descritos anteriormente e na figura 2 (graus de liberdade, janela, percentual de sobreposição ou "overlapping"), além do número de segmentos resultantes. Deste modo, cada ponto do espectro representa a média de 31 valores. Na sequência tem-se a relação dos 7 principais picos presentes no espectro, com suas frequências, períodos e amplitudes (em ordem decrescente). Continuando, é apresentado o critério utilizado em sua seleção: picos adjacentes possuem

entre si um espaçamento (denominado "esp"), que obedece a relação descrita na penúltima linha ao lado da figura. Complementando, tem-se "Δf" e o valor da frequência de Nyquist: 0.5 cpm.

Há ainda alguns comentários adicionais visando melhor compreensão dos resultados:

- 1) Devido à falta de alternativas reconhecidamente consolidadas para seleção dos picos espectrais, o critério descrito acima foi adotado por ser aplicável à diferentes situações.
- 2) Na técnica de Welch, a resolução espectral (Δf) é definida através da equação:

$$\Delta f = \frac{gl}{2N\Delta t} \tag{1}$$

onde *gl* é o número de graus de liberdade, *Δt* o intervalo temporal de amostragem (1 minuto) *N* o total de pontos

contidos no registro. Em meses de 31 dias existem 44640 amostras. Como uma das etapas do processamento envolve o uso da transformada rápida de Fourier (FFT), é empregado o procedimento padrão para tais casos, ou seja, completar a série temporal com zeros até a potência de 2 mais próxima de  $N$  (neste caso  $65536 = 2^{16}$ ).

A equação (1) ainda merece mais alguns comentários: esta é a forma mais correta e abrangente de definir a resolução espectral. Para entendê-la melhor basta levar em conta que cada variável no domínio do tempo (quase sempre real), tem como resultado no domínio da frequência duas variáveis linearmente independentes, que são, respectivamente, as partes real e imaginária da transformada. Por isto, o numerador da equação (1) aparece definido como uma divisão por 2. Se, por hipótese, a técnica de Welch não fosse aplicada ao problema, haveria apenas um só segmento com 65536 amostras, isto é, o registro completo, resultando em 2 variáveis linearmente independentes na frequência e reduzindo a equação (1) à:

$$\Delta f = \frac{1}{N\Delta t} \quad (2)$$

Logo, é fácil concluir que a técnica de Welch possui uma relação de compromisso quando empregada em processos estocásticos: ela permite obter estimadores confiáveis (com tendência e variância minimizadas e maior consistência). Por outro lado, perde-se resolução (isto é,  $\Delta f$  aumenta). Comparando-se as equações (1) e (2) e levando em conta a adoção de 32 graus de liberdade, tem-se que  $\Delta f$  calculado com a equação (1) é 16 vezes maior que o calculado com a equação (2). Contudo, apesar das implicações na resolução, as vantagens da técnica de Welch superam suas desvantagens.

Na figura 3 os valores da componente H não são rigorosamente valores inteiros, ou seja, 24, 12, 8, etc., devido às médias realizadas em cada segmento. Todos os harmônicos que constam nesta figura correspondem ao teoricamente esperado, exceto o quinto, cujo período é de 4.7 horas. Apenas uma investigação mais detalhada poderá revelar a razão de sua presença dentre os demais.

## Conclusões

A análise espectral aplicada aos dados do INTERMAGNET provou que os principais harmônicos da variação diurna foram bem detectados: 24, 12, 8 e 6 horas. Os de 4 e 3 horas também podem ser considerados harmônicos de ordem superior: O de 4 horas corresponde a uma oitava acima do harmônico de 8 horas (uma oitava é o intervalo entre duas frequências, onde a maior delas é exatamente o dobro da menor). A mesma relação vale entre os harmônicos de 3 e 6 horas. As amplitudes da componente H não apresentaram diferenças significativas ao longo dos meses estudados, nos anos de 1999 e 2000. Em uma pesquisa mais refinada, seria necessário separar os dias Q, D e R, e aplicar a análise espectral em cada grupo. Além disto, seria importante considerar pelo menos um ciclo solar

completo. Gama (1960) analisou os dados de Vassouras, usando médias mensais para um período superior a 20 anos. Foi constatada não só a existência da variação cíclica secular, assim como os efeitos da mudança da polaridade na atividade solar. O mesmo será feito em relação à variação diurna. Logo, os presentes resultados devem ser considerados como a primeira etapa de uma pesquisa mais ampla, que já está em curso. Além disto, outras técnicas não clássicas de análise espectral serão testadas num futuro próximo, como por exemplo, máxima entropia, wavelets, dentre outras.

## Referências

Campbell, W.H.- 1997. Introduction to Geomagnetic Fields. Cambridge Univ. Press. Cambridge, UK

Carvalho, R.M., Lima, E.C., Santos, A.G.F., Motta, C.M.- 2000. Resultados do Observatório Magnético de Vassouras em 1999. Obs. Nacional. Rio de Janeiro, Brasil.

Gama, L.I.- 1960- Fluctuations of Secular Variation. Obs. Nacional. Rio de Janeiro, Brasil.

Gama, L.I. – 1966 – Campo Magnético Normal e sua Variação Secular em 545 pontos geográficos no Brasil. (1880/1960). Obs. Nacional. Rio de Janeiro, Brasil.

Marple Jr., S. L.; Digital Analysis With Applications; Prentice Hall Signal Processing Series; 1987.

Rangarajan, G.K.-1992.- Magnetometry for Geomagnetic Observatories, in "Geomagnetic Studies at Low Latitudes". Indian Institute of Geomagnetism. Bangalore, India.

Rangarajan, G.K. & Barreto, L.M.- 1999 – Manual of Instructions for Processing Data from the Intermagnet System at Vassouras Magnetic Observatory. Obs. Nacional, Rio de Janeiro, Brasil.

Onwumechilli, A. – 1959 – The Relation between H and D variations, near the EEJ. Journal of Atm. and Terrest. Physics. 16.

## Agradecimentos

Aos técnicos integrantes do grupo de geomagnetismo do Observatório Nacional: Ronaldo Marins de Carvalho, Elisabeth da Cunha Lima, Alberto Geraldo Farias dos Santos e Constantino M. Mota, que, de diferentes formas, contribuíram na realização deste trabalho.