

FERRAMENTA MULTIESCALA PARA IDENTIFICAÇÃO DE TEMPESTADES GEOMAGNÉTICAS: UM ESTUDO PRELIMINAR

Marize Corrêa Simões¹, Varlei Everton Menconi², Margarete Oliveira Domingues³, Odin Mendes Jr.²

¹CAP/INPE, São José dos Campos, Brazil, marize@lac.inpe.br

²DGE/CEA/INPE, São José dos Campos, Brazil, odin,varlei@dge.inpe.br

³LAC/CTE/INPE, São José dos Campos, Brazil, margarete@lac.inpe.br

Among the major challenges of the Space Weather community is the comprehensive knowledge of the electrodynamical processes occurring due to the Solar-wind and the magnetosphere coupling, in which substantial transfers of energy, moment and particles occur. As direct consequence of the enhancement of this kind of coupling, magnetic disturbances at the Earth surface related to a magnetosphere-ionosphere current system can be produced and they are possible to be recorded by magnetometers.

This work aims to implement a tool to identify the behavior of the energy, i.e. impulsive variations, during the main phase of geomagnetic storms which are related to this complex current system. Instead of the use of a pos-processed index available the most of the time with a delay of months, for instance, equatorial geomagnetic index Dst, a real-time diagnosis has been proposed in order to identify geomagnetic storms. This diagnosis is based on a wavelet analysis technique to deal directly with raw data from a chosen magnetometer station.

1. INTRODUÇÃO

Eventos que ocorrem na superfície do Sol, como as explosões solares, estruturas de plasma magnetizado propagantes no meio interplanetário, como as ejeções coronais de matéria interplanetárias, e perturbações geomagnéticas, como as tempestades magnéticas, constituem alguns aspectos de uma cadeia complexa de eventos da área Física da interação Sol-Terra [1]. Essa situação física leva a criação de um novo domínio de investigação científica e de terminologias próprias.

Nas últimas décadas, o interesse e os estudos voltados para a questão de um clima espacial cresceram significativamente. Entende-se por ambiente espacial o meio em que um conjunto de condições ou circunstâncias de processos físicos ou fenômenos espaciais ocorrem. Enquanto o Clima Espacial diz respeito a variabilidades de comportamento desse meio consideradas em uma maior escala de tempo, claramente de ordem, no mínimo, de várias rotações do Sol. Por conseguinte, eventos ou transientes nesse meio podem ser considerados como referentes a um tempo espacial [2].

Existem várias razões importantes para monitorar os eventos e, principalmente, estudar, entender e buscar prever o clima espacial. Pois, encorajando sobretudo abordagens práticas, constata-se que efeitos do Sol e do vento solar sobre a magnetosfera e atmosfera terrestres podem afetar as tecnologias humanas (quer no espaço quer na superfície da Terra), pôr em risco a saúde ou mesmo a vida em nosso planeta e mesmo transtornar o ambiente em que a vida se desenvolve [2] [3]

Como um exemplo significativo de região física mais próxima e de larga escala sujeita ao clima espacial, há a ionosfera, que é a porção ionizada da atmosfera terrestre localizada entre 2000 e 70 km de altitude, sendo formada por íons e elétrons livres. Sabe-se que o plasma ionosférico é fortemente afetado pelas alterações nos níveis de radiação solar, principalmente os raios ultravioletas e raios-X, como também afetado pelos períodos de tempestades geomagnéticas. Essa região tem importância para as telecomunicações e serviços na superfície da Terra [4].

No entanto, existem vários equipamentos para medir as variações do campo geomagnético, instalados tanto na Terra como no espaço. O monitoramento do comportamentos do ambiente e as transmissões de alertas geofísicos são muito importantes para que providências possam ser tomadas com antecedência

contra os efeitos nocivos das tempestades geomagnéticas. Um aviso antecipado de uma eminente tempestade geomagnética permite, por exemplo, que as distribuidoras de energia elétrica evitem danos em suas redes e que satélites, naves espaciais e astronautas possam ser protegidos. Há também sensores na Terra e no espaço que observam continuamente porções específicas do espectro de energia do Sol para monitorar os seus níveis e indicações de eventos significativos. Uma importante ferramenta de monitoramento é o satélite Soho, que atua na posição intermediária entre a Terra e o Sol e detecta as explosões na superfície solar, avisando com antecedência a possibilidade da chegada a Terra de agentes solares ou gerados no meio interplanetário [5].

Entre esse conjunto de recursos, os magnetômetros são instrumentos práticos e versáteis de medidas de campos magnéticos, podendo medir campos magnéticos de intensidade mínima e monitorar suas variações. Com base nessa tecnologia, uma das maneiras de quantificar o grau de perturbação do campo magnético na superfície da Terra é a utilização do índice geomagnético Dst (*Disturbance Storm Time*). Esse índice monitora a atividade geomagnética relacionada essencialmente a um anel de corrente elétrica na região do equador magnético terrestre e é construído por meio da componente horizontal do campo magnético de estações em médias e baixas latitudes, porém disponível após dias ou mesmo meses [6].

A medida obtida pelo índice Dst diz que quanto mais negativo ele for, mais intensa é a tempestade geomagnética devida às variações na corrente anelar que flui na direção leste-oeste no plano equatorial. O anel de corrente surge devido a diferença de deriva entre íons (sentido leste-oeste) e elétrons (sentido oeste-leste), que gera uma corrente resultante na direção leste-oeste. Esses efeitos são fortemente intensificados por aumento da população das partículas aprisionadas em regiões de órbitas geossíncronas durante as tempestades geomagnéticas.

Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia de identificação em tempo real por meio de técnica wavelet, com base na análise de características tempo-frequência, de sinais de magnetômetros relacionados às ocorrências de tempestades geomagnéticas e fazer a implementação de uma ferramenta útil ao Programa de Clima Espacial [7], estabelecendo potencialmente um produto a ser utilizado. Apresenta-se inicialmente a base de dados a ser utilizada (Seção 2); a seguir a metodologia matemática (Seção 3); a metodologia e o sistema a serem implementados (Seção 4); um exemplo de resultado da análise de sinal com as identificações (Seção 5); e por fim algumas considerações do trabalho já em desenvolvimento (Seção 6).

2. BASE DE DADOS

A ideia de previsão, parte do trabalho futuro, relaciona-se ao uso de dados de satélite em posição adequada entre o Sol e Terra. Pois a transmissão do sinal identificado pelo satélite se faz na velocidade da transmissão da radiação eletromagnética e o tempo de trânsito do fenômeno interplanetário até a Terra se faz com mais tempo, da ordem de dezenas de minutos a poucas horas. Um dos dados a serem considerados são o do ACE (*Advanced Composition Explorer*), que é um satélite de coleta de dados situado entre a Terra e o Sol. Sua função é enviar dados do plasma acoplado ao vento solar que flui em direção ao planeta, assim como as medidas das componentes do campo magnético interplanetário. Essas medidas físicas relacionam-se ao processo de reconexão magnética, responsável pela produção de tempestades geomagnéticas [2].

Por outro lado, considerando fase presente do trabalho que é o diagnóstico das tempestades geomagnéticas de forma automática e em tempo real, far-se-á o uso de dados de magnetômetros na superfície da Terra. Há em alguns lugares do mundo, estações de coletas de dados de magnetômetros, que estão espalhados pela América do Sul, Europa, Ásia, entre outros. Essas estações são mantidas por universidades e institutos de pesquisa e os equipamentos medem o comportamento do campo geomagnético. Além das medições, os arquivos contêm, para cada ponto, o registro do ano, do dia Juliano, da hora, do minuto e dos segundos em que foi realizada a coleta [6].

Os dados que caracterizam o acoplamento eletrodinâmico são os do plasma solar de satélites no meio

interplanetário, que podem ser encontrados na página do *Advanced Composition Explorer (ACE)* ¹ e os índices geomagnéticos (Kp, Dst e AE) e dados de magnetômetros na base de dados do Observatório Nacional (ON) ² e do *World Data Center for Geomagnetism, Kyoto*. ³.

A base de dados utilizada, como exemplo, neste trabalho é a da estação de Vassouras (VSS) no período de abril de 2001, que corresponde a um período de alta atividade solar. Esses dados estão no seguinte formato "vssanomesdia.min", em que vss é a estação de referência, ano-mês-dia é o período a ser estudado e a sua resolução temporal está em minutos. Assim, para cada dia tem-se 1440 medidas. Todos os arquivos têm cabeçalhos com informações sobre formato utilizado, fonte dos dados, latitude e longitude e elevação geodésicas na estação de medidas, as componentes medidas do campo geomagnético (que são componente horizontal (H), declinação magnética (D), componente vertical (Z) e magnitude (F). No cabeçalho das medidas propriamente ditas há indicação Date (Data), Time (Tempo), DOY (dia sequencial do ano) e as componentes geomagnéticas já mencionadas para a estação especificada (VSSH, VSSD, VSSZ e VSSF). A Tabela 1 exemplifica como os arquivos de dados estão organizados, nesse caso a base de dados da estação de Vassouras, Rio de Janeiro, mantida pelo Observatório Nacional.

Tabela 1 – Exemplo dos dados de um magnetograma da base do Observatório Nacional

Format	IAGA-2002					
Source of Data	Observatorio Nacional					
Station Name	Vassouras					
IAGA CODE	VSS					
Geodetic Latitude	-22.400					
Geodetic Longitude	316.348					
Elevation	457					
Reported	HDZF					
Sensor Orientation						
Digital Sampling						
Data Interval Type	Average 1-Minute (00:30-01:29)					
Data Type	Definitive					

DATE	TIME	DOY	VSSH	VSSD	VSSZ	VSSF
2001-04-01	00:00:00.000	091	19210.60	-1281.70	-13137.30	23273.00
2001-04-01	00:01:00.000	091	19205.50	-1282.10	-13139.20	23269.90
2001-04-01	00:02:00.000	091	19204.30	-1282.10	-13140.20	23269.50
2001-04-01	00:03:00.000	091	19207.00	-1281.90	-13139.50	23271.30
2001-04-01	00:04:00.000	091	19212.00	-1281.70	-13137.70	23274.40

3. TRANSFORMADA WAVELET

A análise desses dados é feita por meio da transformada wavelet discreta utilizando as funções de Daubechies de ordem 2, que também é empregada usualmente, em outras aplicações espaciais, como na compressão de imagens. Na transformada discreta de wavelets, o parâmetro de escala **a** e o de deslocamento **b** assumem valores discretos. Mais detalhes podem ser obtidos em [1]. Outras funções wavelets e outras ordem também pode ser utilizadas nesse processo e algumas já estão também implementadas para teste neste estudo.

¹<http://www.srl.caltech.edu/ACE/>

²<http://www.on.br/>

³<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/>

Essa transformada é construída por uma Análise Multirresolução do $\mathbb{L}^2(\mathbb{R})\{V^j, \phi\}$, designada Amr $\{V^j, \phi\}$. Um resumo mais detalhado dessa teoria é apresentada a seguir baseada no trabalho de [8]. Uma Amr é uma sequência de sub-espços lineares V^j de $\mathbb{L}^2(\mathbb{R})$ e uma função associada ϕ , conhecida como função escala, satisfazendo as seguintes condições:

1. $\dots \subset V^{-2} \subset V^{-1} \subset V^0 \subset V^1 \subset V^2 \subset \dots$,
 $\bigcap_{j \in \mathbb{Z}} V^j = \{0\}$,
 $\mathbb{L}^2(\mathbb{R}) = \overline{\bigcup_{j \in \mathbb{Z}} V^j}$,
2. $f(x) \in V^j \Leftrightarrow f(2x) \in V^{j+1}$;
3. $f(x) \in V^0 \Leftrightarrow f(x - k) \in V^0, \forall k \in \mathbb{Z}$;
4. $\phi(x - k)_{k \in \mathbb{Z}}$, forma uma base de Riesz de V^0 .

Como consequência dessas propriedades, têm-se que:

- Existe uma sequência $h \in \ell^2$ tal que

$$\phi(x) = 2 \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(k) \phi(2x - k) \quad (\text{Relação de Escala}). \quad (1)$$

em que $h(k)$ são os coeficientes do filtro escala.

- Para cada inteiro j , a família

$$\phi_k^j(x) = 2^{j/2} \phi(2^j x - k), \quad k \in \mathbb{Z}, \quad (2)$$

forma uma base de Riesz de V^j .

No domínio da frequência, a relação de escala é expressa como

$$\hat{\phi}(\xi) = H(\xi/2) \hat{\phi}(\xi/2), \quad (3)$$

em que $H(\xi) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(k) e^{-ik\xi}$ é o filtro de escala associado a ϕ . Os filtros H são do tipo passa-baixa, i.e., $H(0) = 1$ e $H(\pi) = 0$. Um maior detalhamento das principais propriedades de uma Amr pode ser encontrada em [10].

A grande contribuição da teoria wavelet é a caracterização de espaços complementares entre dois espaços encaixados $V^j \subset V^{j+1}$, através de somas diretas

$$V^{j+1} = V^j + W^j.$$

Neste sentido, os espaços W^j contêm a diferença de informação entre o nível de resolução j e o nível mais refinado $j+1$, ou seja, os detalhes entre um nível e o seguinte. Essa representação em soma direta não é única.

Definindo as funções ψ como

$$\psi(x) = 2 \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(k) \phi(2x - k), \quad (4)$$

(5)

em que $g(k) = (-1)^{k+1} h(-k+1)$, prova-se que as famílias

$$\psi_k^j(x) = 2^{j/2} \psi(2^j x - k), \quad (6)$$

(7)

são bases de Riesz de W^j . A escolha de g apresentada é a mais usual. O filtro $G(\xi) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} g(k) e^{-ik\xi}$ é do tipo passa-banda, i.e., $G(0) = 0$ e $G(\pi) = 1$.

Uma Amr é uma ferramenta muito útil para o estudo de funções do $\mathbb{L}^2(\mathbb{R})$. Funções $f \in \mathbb{L}^2(\mathbb{R})$ podem ser aproximadas pelas suas projeções em V^j

$$\mathcal{P}^j f(x) = \sum_k \langle f, \phi_k^j \rangle \phi_k^j(x).$$

As projeções em W^j ,

$$Q^j f(x) = \sum_k \langle f, \psi_k^j \rangle \psi_k^j(x),$$

contêm a diferença de informação entre os níveis j e $j+1$, i.e.,

$$Q^j f(x) = [\mathcal{P}^{j+1} - \mathcal{P}^j] f(x).$$

Assim,

$$\mathcal{P}^{j+1} f(x) = [\mathcal{P}^j + Q^j] f(x), \quad (8)$$

que corresponde à decomposição,

$$V^{j+1} = V^j + W^j.$$

Em multinível para $j_0 < j$, têm-se:

$$\mathcal{P}^{j+1} f(x) = [\mathcal{P}^{j_0} + Q^{j_0} + \dots + Q^j] f(x), \quad (9)$$

que está associado à decomposição

$$V^{j+1} = V^{j_0} + W^{j_0} + \dots + W^j.$$

Definindo

$$c_k^j = \langle f, \phi_k^j \rangle, \quad d_k^j = \langle f, \psi_k^j \rangle, \quad (10)$$

a Equação 8 pode ser escrita como

$$\sum_k c_k^{j+1} \phi_k^{j+1}(x) = \sum_k c_k^j \phi_k^j(x) + \sum_k d_k^j \psi_k^j(x). \quad (11)$$

Em multinível passa-se a ter a seguinte fórmula

$$\sum_k c_k^{j+1} \phi_k^{j+1}(x) = \sum_k c_k^{j_0} \phi_k^{j_0}(x) + \sum_{m=j_0}^j \sum_k d_k^m \psi_k^m(x), \quad (12)$$

que corresponde à mudança de base

$$\{\phi_k^{j+1}\} \leftrightarrow \{\phi_k^{j_0}\} \cup \{\psi_k^{j_0}\} \dots \cup \{\psi_k^j\}.$$

Para efetuar essas operações, têm-se as transformada wavelet discreta $DWT = DWT_{j_0}^{j+1}$ e sua inversa $IDWT = IDWT_{j_0}^{j+1}$, i.e.,

$$\{c^{j+1}\} \begin{matrix} DWT \\ \rightleftharpoons \\ IDWT \end{matrix} \{c^{j_0}, d^{j_0}, \dots, d^j\}$$

No processo de decomposição da DWT, os coeficientes c_k^j e d_k^j são obtidos dos coeficientes c_k^{j+1} por meio de algumas manipulações das Equações 10 e das relações de escala de ϕ e ψ de tal forma que

$$c_k^j = \sqrt{2} \sum_m h(m - 2k) c_m^{j+1} \quad (13)$$

e

$$d_k^j = \sqrt{2} \sum_m g(m - 2k) c_m^{j+1}. \quad (14)$$

Esse algoritmo é esquematizado pela estrutura de bancos de filtros apresentada na Figura 1. Nessa figura, o quadrado indica convolução com um filtro. O nome do filtro está indicado no interior do quadrado. O símbolo $2 \downarrow$ indica uma *downsampling* ou decimação, i.e., são eliminados os elementos de índice ímpar. O símbolo $2 \uparrow$ indica uma *upsampling*, i.e., são acrescentados componentes com valor zero entre as componentes do vetor original. Assim, dado um vetor $c^{j+1} = (c_k^{j+1})$, obtém-se um novo vetor c^j pela aplicação de uma convolução entre c^{j+1} e o filtro h seguida de decimação. A diferença de informação entre c^j e c^{j+1} , ou seja, os detalhes de alta frequência, ficam contidos no vetor d^j obtido pela convolução entre c^{j+1} e o filtro g seguida de uma decimação. Os d_k^j correspondem aos coeficientes das expansões nas bases wavelet. Esse processo pode ser repetido outras vezes para se obter os coeficientes $d_k^{j-1}, d_k^{j-2}, d_k^{j-3}, \dots$.

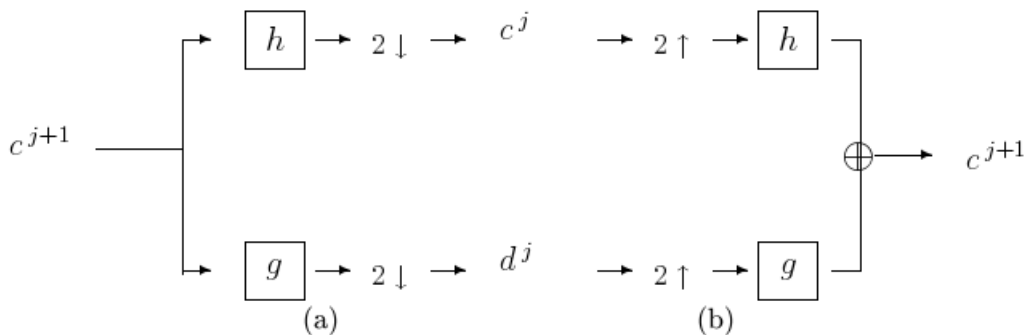


Figura 1 – Arquitetura piramidal para a transformada wavelet biortogonal unidimensional: (a) decomposição em um nível e (b) um nível de reconstrução. Em que $2 \downarrow$ indica o *downsampling* e $2 \uparrow$ indica o *upsampling*.

FONTE ADAPTADA: [9]

4. SISTEMA DE DETECÇÃO

Neste trabalho propõe-se o uso de uma ferramenta multiescala para, por meio da localização de transientes no sinal dos magnetômetros, identificar o período de ocorrência de tempestades geomagnéticas.

Esse trabalho pretende colaborar com o Projeto REBOM (Rede Brasileira de Observatórios Magnéticos) conduzido pelo ON e que desenvolve cooperação com o INPE. O objetivo da rede é fazer uma cobertura de medições magnéticas no Brasil, contando com uma malha de estações fixas e algumas estações móveis [13]. Grosso modo, o Sistema REBOM consiste de instrumentos de detecção e aquisição de dados geofísicos e transmissão (1), armazenamento dos dados (2), e disseminação de informação (3), como esquematizado na Figura 2.

Com o presente trabalho, em que há a implementação de um Sistema de Análise em Tempo Real do sinal de magnetômetro (SisReal), após a aquisição e transmissão do dado (1), haverá o processamento do sinal magnético (2), incluindo ajuste dos dados (a), análise por técnica wavelet (b), representação visual do resultado (c) e cálculo de alerta (d), e disseminação da informação pela web (3), como esquematizado na Figura 3.

Dentro do projeto de análise em tempo real, além do desenvolvimento dos scripts de automatização de tarefas no ambiente de desenvolvimento escolhido GNU/Linux, essas análises são efetuadas com recursos de uma ferramenta computacional livre que calcula a Transformada Wavelet Discreta, desenvolvida pelos autores. Faz-se, após o acesso aos dados de magnetômetro, o ajuste prévio desses dados (considerando

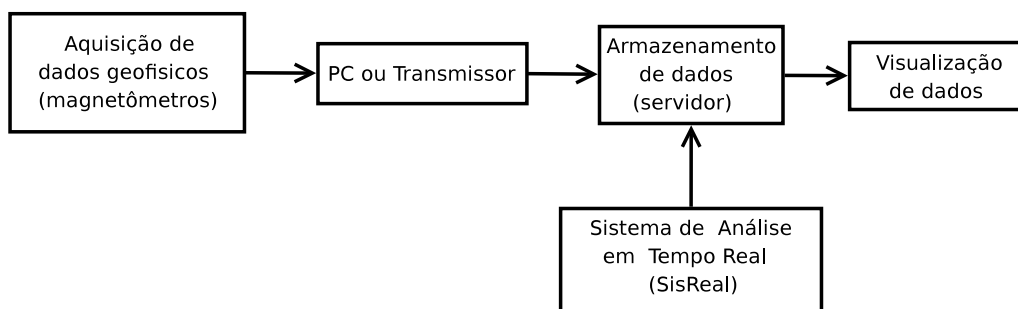


Figura 2 – Sistema da Rede Brasileira de Observatórios Magnéticos (REBOM): medidas e transmissão de dados, armazenamento em base de dados e disseminação de informação.

lacunas, ruídos, saturações de sinal, etc), quando então eles são analisados. Por fim, os resultados são transformados em uma visualização gráfica. O sistema interpreta e gera um código de alerta, auxiliando na análise do resultado, com a indicação de uma tempestade geomagnética em ocorrência, sendo esse diagnóstico enviado para uma página de divulgação, via website. Na Figura 3 um esquema do sistema de análise em tempo real elaborado é apresentado. Esta ferramenta completa foi utilizada nos trabalhos de [12] aplicada à análise de dados de magnetômetros e de [11] aplicado a dados do magnetômetro embarcado no satélite ACE.

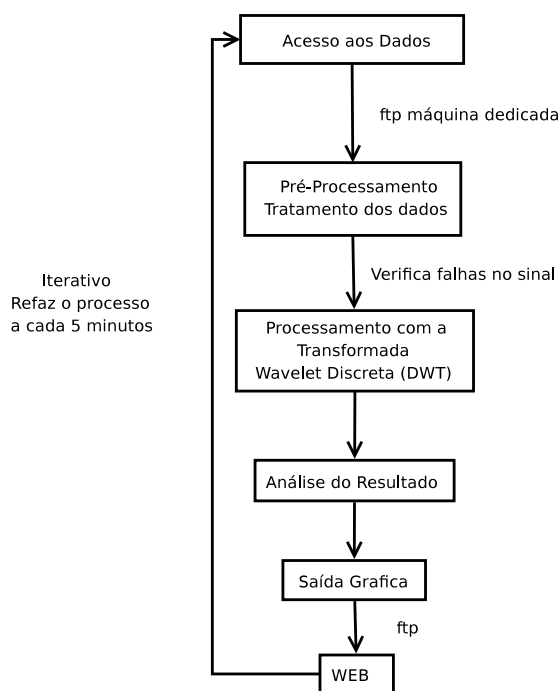


Figura 3 – Sistema de análise em tempo “quasi” real dos sinais obtidos por magnetômetro, com as etapas: acesso aos dados, tratamento preliminar, análise wavelet, interpretação de resultados, geração de gráfico e disseminação na web.

5. RESULTADOS

Com o uso do sistema foi exemplificado neste trabalho utilizando a transformada wavelet família Daubechies de ordem 2, fez-se a análise da componente horizontal medida pelo magnetômetro de Vasouras, simulando um desempenho preliminar do sistema planejado.

Como um primeiro resultado produzido pelo sistema, visualizado na Figura 4, mostram-se as series

temporais contendo inclusive o índice Dst (para propiciar imediata comparação do período da fase principal da tempestade identificado), a componente H do campo geomagnético e os coeficientes wavelets em 3 níveis de decomposição, respectivamente de cima para baixo. Os coeficientes estão relacionados à variabilidade de energia do sinal, ou seja, aos transientes relacionados a ocorrência das tempestades geomagnéticas, referente à fase principal.

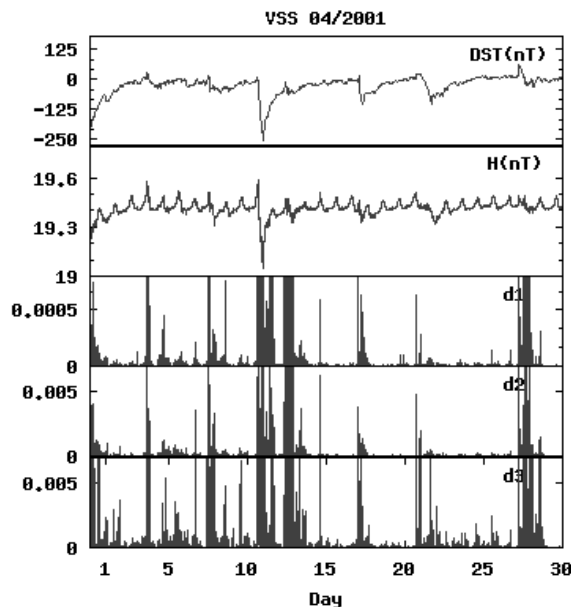


Figura 4 – Visualização do resultado mostrando os coeficientes da análise wavelet do sinal geomagnético da estação de Vassouras, Rio de Janeiro, no período de abril de 2001, para exemplo. De cima para baixo, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a componente horizontal do campo geomagnético e os coeficientes wavelets em 3 níveis de decomposição, em que os coeficientes relacionam-se à fase principal das tempestades geomagnéticas.

O desenvolvimento desse sistema exige uma atenção aos detalhes do processo físico e computacional como um todo: desde o acesso aos dados, como o tratamento é feito, até o envio via web. Vários requisitos são necessários para atender a qualidade satisfatória e a eficiência na análise dos dados.

Esse período analisado também serviu para exemplificar a importância do método de análises por wavelet. Neste período, ocorreram lacunas nos dias 4, 7 e 20 por alguns minutos. Essas falhas são representadas nos arquivos originais por valores fora da escala, como "99999", sendo que computacionalmente, para o programa escolhido, Octave, essas falhas são marcadas como "NAN"(not a number), permitindo na saída gerada observar os períodos de ausência de dados. Nesse caso especificamente de Vassouras não fica visível, por que, o intervalo de ausencia é bem pequeno comparado a quantidade de dados presentes. Contudo, a forma de análise por wavelet, diferente de outro método mais clássico, permite evoluir o cálculo por todo o intervalo dos dados, sem ser afetado por lacunas presentes em pontos distantes do intervalo onde o cálculo wavelet está sendo feito. Ressalta-se que há um método de descarte em torno das lacunas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema proposto permite a análise automática e em tempo real de séries temporais da componente horizontal do campo geomagnético, estabelecendo um diagnóstico. E, se aplicado a medidas magnéticas no meio interplanetário, revela-se uma ferramenta promissora no auxílio à previsão das tempestades geomagnéticas.

Para validar a ferramenta, uma base de dados maior temporalmente e também de outras estações

escolhidas estarão sendo analisadas. Um dos propósitos dessa análise detalhada é poder definir como computacionalmente um alerta de tempestade pode ser emitido, que se traduziria qualitativamente pelas identificações: verde, para "período calmo"; amarelo, para "atenção: possibilidade de distúrbio"; e o vermelho, para "distúrbio geofetivo em ocorrência".

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à CAPES/PAEP (proc. número:0880/086), ao CNPQ(Proc. número:486165/2006-0, 308680/2007-3 e 309017/2007-6) e à FAPESP (proc. número 2007/07723-7).

Referências

- [1] Mendes, O. Jr.; Mendes da Costa, A.; Domingues, M. O. Introduction to planetary electrodynamics: a view of electric fields, currents and related magnetic fields. *Advances in Space Research*, 35(5):812-828,2005.
- [2] Mendes, O. Jr.; Dutra, S. L. G.; Dal Lago, A.; Duarte, J. R. *O ambiente espacial e a física solar-terrestre*. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009. (Publicação em preparação).
- [3] Muralikrishna, A., *Previsão do índice Geomagnético DST Utilizando Redes Neurais Artificiais e Árvore de Decisão*. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009.(em publicação)
- [4] Hargreaves, J. K. *The solar-terrestrial environment*. Cambridge, Cambridge University Press, 1992.
- [5] Kivelson, M. G.; Russell, C. T. *Introduction to space physics*. Cambridge, Cambridge University Press, 1995.
- [6] Campbell, W. H. *Introduction to geomagnetic fields*. Cambridge, Cambridge University Press, 2003.
- [7] INPE, *Plano Diretor do INPE 2007-2011: Planejamento estratégico do INPE*. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007. 33p. (IN7P).
- [8] Domingues, M. O. ; Mendes, O. JR. ; Costa, A. M. . On wavelet techniques in atmospheric sciences . *Advances in Space Research*, Elsevier, v. 35, n. 5, p. 831-842, 2005.
- [9] Domingues, M. O. . Análise wavelet na simulação numérica de equações diferenciais parciais com adaptabilidade espacial. Tese de doutorado. 2001.
- [10] Daubechies, I. "Ten Lectures on wavelets," in CBMSNSF Regional Conference Series in Applied Mathematics, SIAM, Philadelphia, PA, Vol.61, 1992.
- [11] Ojeda A., Correa M.S., Klausner, V., Domingues M.O., Mendes O. Jr., and Papa A.R.R. *Orthogonal Discrete Wavelet Decomposition. Part 1: using ACE Satellite Data. Dincon'09*.(2009).
- [12] Klausner, V., Correa M.S., Ojeda A.G., Domingues M.O., Papa A.R.R., and Mendes O. Jr. *Discrete Wavelet Decomposition. Parte 2: Analysis os Magnetogram Data. Dincon'09*.(2009).
- [13] Trivedi, N. B. *REBOM*. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009. (Comunicação privada).