

ESPECTRO CRUZADO DE ONDELETA APLICADA NA VARIAÇÃO SOLAR MEDIDA PELO SATÉLITE SOHO

Paulo César Vieira¹, Mauricio José Alves Bolzan²

¹ Aluno (Mestrado em Física e Astronomia), Universidade do Vale do Paraíba, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova, São José dos Campos, SP, 12244-000, email: vieirapc@uol.com.br

² Orientador, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova, São José dos Campos, SP, 12244-000, email: bolzan@univap.br

Resumo - Neste trabalho foi utilizado o Espectro Cruzado de Ondeleta (CWP) aplicado a dados geofísicos obtidos pelo satélite SOHO. O objetivo foi estudar a correlação tempo-escala entre velocidade do vento solar e densidade de prótons, no período de 2001-2002, e averiguar se os distúrbios solares ocorridos neste período aumentam a correlação entre ambas as variáveis. Resultados preliminares confirmam esta hipótese. Além disso, uma explicação em termos de Estruturas Coerentes na turbulência será apresentada.

1 Introdução

O estudo das relações Sol-Terra tem se tornado importante recentemente devido às conseqüências que os chamados distúrbios solares podem trazer para os sistemas de comunicação via satélite, queda de energia e etc. Tais relações são proporcionadas por fenômenos não lineares com características intermitentes que tornam difíceis estudos que utilizam abordagens convencionais tais como o uso da Transformada de Fourier (TF). Por isso, uma maneira de estudar estes fenômenos não lineares, que provocam a não estacionaridade de séries temporais de variáveis do sistema Sol-Terra, se dá através da Transformada em Ondeleta (TO) iniciada na década de 80 por Morlet (Morettin, 1999). Tal ferramenta se mostrou bastante robusta na análise de séries temporais como o trabalho de Lui (2002) e referências internas deste trabalho. No Brasil, recentes análises realizadas com TO aplicada a componente H do campo geomagnético, mostraram que os distúrbios solares são importantes fontes de intermitência para o sistema geomagnético (Bolzan et al., 2005). Com o objetivo de estudar estes fenômenos intermitentes originados pelos distúrbios solares, este trabalho utilizará séries temporais do meio interplanetário de velocidade do vento solar e densidade de prótons, ambos medidos por satélite. Para isso, será utilizado o Espectro Cruzado de Ondeleta, aplicada em ambas as variáveis, para averiguar se há correlação e em quais períodos ocorrem. Tal estudo proporcionará uma visão útil não somente da TO como também o uso dela para análises mais complexas como o Espectro Cruzado de tais variáveis de um sistema ainda pouco estudado.

2 Dados Utilizados

O uso de dados obtidos por satélites tem proporcionado importantes estudos sobre o ambiente espacial. Um dos satélites importantes para a realização destes estudos é o satélite SOHO (sigla do inglês para *Solar and Heliospheric Observatory*) que foi lançado ao espaço em 2 de dezembro de 1995. Este satélite foi fruto de uma colaboração internacional entre a ESA (Agência Espacial Européia) e a NASA (Agência Espacial Norte Americana) e teve, por objetivo, fornecer dados para estudos sobre o Sol desde suas camadas mais profundas até a coroa e o vento solar. Para maiores detalhes sobre este satélite, acesse o endereço eletrônico <http://sohowww.nascom.nasa.gov/about/about.html>.

Portanto, para este trabalho foram utilizadas uma série temporal da velocidade do vento solar e densidade de prótons, medidas por este satélite, a uma taxa de amostragem de uma medida por hora, durante o período 2001-2002. Foi escolhido este período devido à enorme atividade solar com grande concentração de distúrbios solares.

3. Metodologia

Como mencionada na introdução, a TO é útil para análise de séries temporais não estacionárias, ou seja, séries cujos momentos estatísticos (média, variância e momentos superiores) variam ao longo do tempo (Bolzan, 2006). Por isso, é interessante fazer uma breve introdução teórica desta ferramenta matemática. As Ondeletas indicam um conjunto de funções no formato de pequenas ondas criadas por dilatações, $\Psi(t) = \Psi(2t)$, e translações, $\Psi(t) = \Psi(t+1)$, da simples função geradora, $\Psi(t)$, chamada Ondeleta

Mãe. Matematicamente, a função de Ondeleta na escala a e posição b é dada por:

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

onde a e b são reais e a > 0. A Transformada de Ondeleta é definida por:

$$W_\psi f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

onde f(t) é uma função temporal qualquer.

Existem dois tipos para as funções de Ondeleta: a contínua e a discreta, cada qual responsável para uma dada necessidade (Torrence e Compo, 1998; Bolzan, 2004). Neste trabalho, utilizou-se a função de Morlet que é dada por:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} e^{i\varpi_0 t} e^{-t^2/2} \quad (3)$$

onde $\varpi_0 = 5$. A Figura 1 mostra o gráfico da parte real desta função ondeleta.

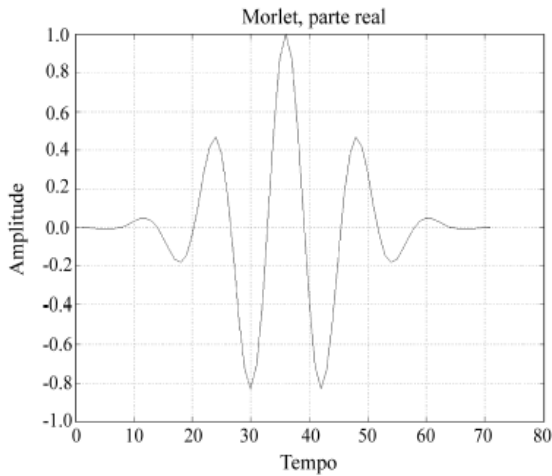


Figura 1: Função Ondeleta de Morlet.

O Espectro Cruzado de Ondeletas (*Cross-Wavelet Spectrum*, CWP, em inglês) de duas séries temporais x_n e y_n é definida como $W_{xy} = W_x W_y^*$, onde * denota o complexo conjugado. Assim, utilizou-se a definição da CWP como $|W_{xy}|$ dada por Grinsted et al. (2004).

4 Resultados

Nos dois gráficos acima da Figura 2, são apresentadas, respectivamente, séries temporais do vento solar e densidade de prótons para o período 2001-2002. No gráfico de baixo da mesma Figura, é apresentado o chamado periodograma do CWP onde, o eixo x denota-se a escala temporal em dias, o eixo y denota-se os períodos presentes nas séries-temporais e, finalmente, a barra de cor indica a intensidade da correlação entre ambas as variáveis. A linha branca é chamada de cone de influência, onde se consideram apenas os acontecimentos ocorridos na região de dentro do cone. Qualquer acontecimento fora deste não tem confiança estatística.

No gráfico do periodograma CWP pode-se notar duas características distintas, são elas: primeiro, uma alta correlação (10-15 $km/s cm^3$) entre as variáveis no período de 11 dias em todo o ano de 2001 até fevereiro de 2002, decaindo posteriormente para 8-10 $km/s cm^3$ até o final de 2002; Segundo, no período de 27 dias há uma correlação moderada, em torno de 8-10 $km/s cm^3$, no intervalo entre abril de 2001 à janeiro de 2002 para, em seguida, ocorrer uma alta correlação neste mesmo período que começa em fevereiro à novembro de 2002. É interessante notar que este período de 27 dias corresponde ao que se chama em geofísica de período de rotação solar, ou seja, período de revolução do Sol em torno de seu próprio eixo. Isso mostra que, em épocas onde a atividade solar é menor, ou seja, ocorrem poucos distúrbios solares (todo o ano de 2001 até fevereiro de 2002) a correlação entre ambas as variáveis é maior na escala de 11 dias. Quando a atividade solar aumenta (fevereiro de 2002 até o final) a correlação torna-se predominante na escala de 27 dias.

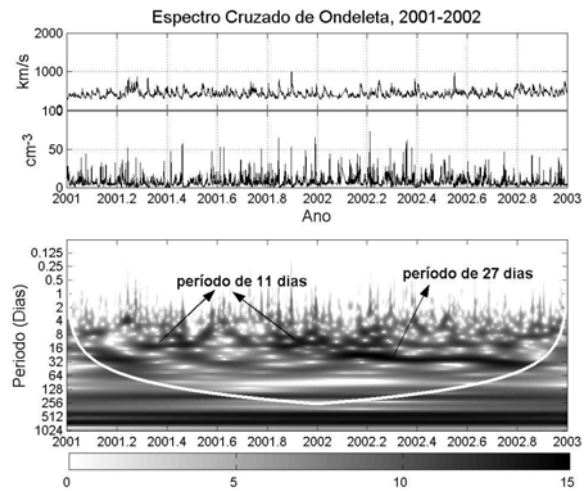


Figura 2: Dois gráficos acima mostram a presença do vento solar e densidade de prótons, abaixo o periodogram do Espectro Cruzado de Ondeleta (CWP).

O comportamento acima pode ser explicado em termos da teoria estatística da turbulência, proposta inicialmente por Kolmogorov (1941). Quando ocorre um evento (distúrbio solar), a energia gerada nas grandes escalas se transfere para as pequenas escalas em um processo conhecido como cascata de energia. Segundo Kolmogorov, a energia gerada nas grandes escalas (conhecida como região de produção) é transferida para as pequenas escalas (região de dissipação) passando por uma região intermediária conhecida como subdomínio inercial. É nesta região intermediária que os fenômenos não lineares e intermitentes se manifestam. Robinson (1991), definiu Estruturas Coerentes (EC) como sendo uma correlação forte entre uma mesma variável ou com outra do escoamento turbulento. Por isso, é possível conjecturar que tais manifestações de EC estejam provocando aumento da correlação entre ambas variáveis estudadas. Esta seria uma maneira eficiente do sistema para o retorno ao estado básico (sem distúrbio) como mencionado por Bolzan et al. (2005).

5 Conclusão

Através do Espectro Cruzado de Ondeleta (CWP) aplicada as séries-temporais da velocidade do vento solar e densidade de prótons, obtidas no período de 2001-2002, observou-se que ambas as variáveis tiveram aumento nas correlações, em torno de $10-15 \text{ km/s cm}^3$, em período em torno de 11 dias ao longo do ano de 2001 para, posteriormente, ter aumento na correlação no período entre 27 dias com a mesma intensidade, $10-15 \text{ km/s cm}^3$ ao longo do ano de 2002. As correlações neste período de 27 dias podem ter sido promovidas por distúrbios solares ocorridos entre fevereiro a novembro deste ano. Estes distúrbios solares podem ter criado as chamadas Estruturas Coerentes (CS) que seriam um mecanismo que transferiria energia das grandes escalas para as pequenas escalas de maneira mais eficiente, promovendo o sistema Sol-Terra ao retorno do estado básico.

6 Agradecimentos

Aos pareceristas pelas sugestões que contribuíram para a melhora do trabalho e aos editores da revista pela paciência no envio da versão final deste trabalho. O autor M. J. A. Bolzan agradece a FAPESP e ao CNPq pelo auxílio.

Referências

[1] M. J. A. Bolzan, Revista Brasileira para o Ensino de Física, 26, 37 (2004).

[2] M. J. A. Bolzan, Y. Sahai, P. R. Fagundes, R. R. Rosa, F. M. Ramos & J. R. Abalde 2005, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 67, 1365 (2005).

[3] M. J. A. Bolzan, Revista Brasileira de Ensino de Física, 28, 563 (2006).

[4] A. Grinsted, J. C. Moore & S. Jevrejeva, Nonlinear Processes in Geophysics, 11, 561 (2004).

[5] A. N. Kolmogorov, Dokl. Acad. Nauk. SSSR, 30, p.301 (1941).

[6] A. T. Y. Lui. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 64, 125 (2002).

[7] P. A. Morettin. Ondas e Ondeletas: Da Análise de Fourier à Análise de Ondeletas. 1ª ed., Edusp, São Paulo, 1999.

[8] S. K. Robinson, 1991, Annual Review of Fluid Mechanics, 23, 601 (1991).

[9] C. Torrence & G. P. Compo, 1998, Bulletin of the American Meteorological Society, 79, 61 (1998).

[10] MTOF/PM Data by Carrington Rotation, endereço na Internet: <http://umtof.umd.edu/pm/crn/> acessado em 01/03/2005.