

**Universidade do Vale do Paraíba  
Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento**

**PAULO CÉSAR VIEIRA**

**ANÁLISE ESTATÍSTICA E ONDELETAS APLICADA AO VENTO  
SOLAR E DENSIDADE DE PRÓTONS.**

**São José dos Campos, SP  
2006**

**PAULO CÉSAR VIEIRA**

**ANÁLISE ESTATÍSTICA E ONDELETAS APLICADA AO VENTO SOLAR E  
DENSIDADE DE PRÓTONS.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Mestre em Física e Astronomia.

Orientador: Prof. Dr. Maurício José Alves Bolzan

**São José dos Campos, SP  
2006**

V717a

Vieira, Paulo César

Análise Estatística e Ondeleta Aplicada ao Vento Solar e  
Densidade de Prótons / Paulo César Vieira. São José dos  
Campos: Univap, 2006.

89f.: il.; 30cm.

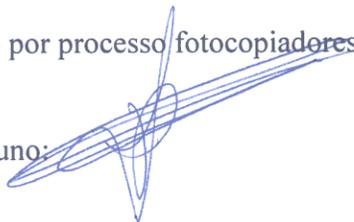
Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-  
Graduação em Física e Astronomia do Instituto de Pesquisa  
e Desenvolvimento-Universidade do Vale do Paraíba,  
2006.

1. Vento Solar 2. Densidade de Prótons I. Bolzan,  
Maurício José Alves, Orient. II. Título

CDU:52

Autorizo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial  
desta dissertação por processo fotocopiadores ou transmissão eletrônica.

Assinatura do aluno:

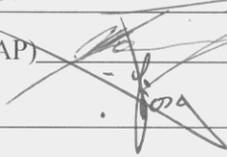


Data: 29 de agosto de 2.006

**“ANÁLISE ESTATÍSTICA E ONDOLETAS APLICADA AO VENTO SOLAR E DENSIDADE DE PTÓTONS”**

Paulo César Vieira

Banca Examinadora:

Prof. Dr. **YOGESHWAR SAHAI** (UNIVAP)   
Prof. Dr. **MAURÍCIO JOSÉ ALVES BOLZAN** (UNIVAP)   
Prof. Dr. **REINALDO ROBERTO ROSA** (INPE) 

Prof. Dr. Marcos Tadeu Tavares Pacheco  
Diretor do IP&D - UniVap

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho ao meu filho, Paulo Henrique, à minha irmã, Carmem Lúcia e sobrinhos, Rafael, Jéssica e Karina, responsáveis pela inspiração em busca de novas descobertas.

## **Agradecimentos**

Agradeço ao Dr. Mauricio José Alves Bolzan, pelo incentivo e o empenho com que dedicou seu tempo na orientação deste trabalho e, aos valores na qual impensavelmente me ensinou, onde o esforço, o compromisso e a dedicação ao emprego e a transmissão do conhecimento levarei como exemplos para a vida.

À Universidade do Vale do Paraíba, que através do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento (IP&D) forneceu infra-estrutura científica e condições materiais e humanas que contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao grupo de Física e Astronomia, que contribuiu com o excelente quadro de professores dedicados em compartilhar seus conhecimentos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela bolsa de estudo concedida.

Aos meus amigos, em especial à Deidimar Alves Brissi, Tomás Ferreira de Freitas e Valdir Gil Pillat, pelo apoio e pelas horas de estudos.

Finalmente, agradeço a **Deus**, pela minha existência, pois sem ela nada disso seria possível.

# ANÁLISE ESTATÍSTICA E ONDELETAS APLICADA AO VENTO SOLAR E DENSIDADE DE PRÓTONS

## RESUMO

Este trabalho tem, por objetivo, investigar como as propriedades estatísticas de duas variáveis solares sofrem a influência do ciclo de atividade solar. Para tal, foram obtidas séries temporais de velocidade do vento solar e densidade de prótons do período de 1996 até 2004, excetuado o ano de 1998, e submetidas a algumas técnicas estatísticas. Além disso, a transformada em ondeletas foi utilizada não somente como uma ferramenta de apoio para as técnicas estatísticas, mas principalmente para permitir compreender a presença da intermitência e das chamadas estruturas coerentes que introduzem a questão da não-estacionariedade nas séries temporais estudadas. Os resultados indicaram que, para ambas as variáveis, os dois momentos estatísticos (coeficiente de assimetria e achatamento) sofreram importante aumento em seus valores em direção as menores escalas para o período de máxima atividade solar, se comparado com a atividade moderada. Este resultado também pode ser notado através da variabilidade do espectro, de ambas as variáveis, obtidos via Espectro Global em Ondeletas, mostrando a influência da atividade solar nestas. Além disso, mostraram uma primeira diferença entre ambas as variáveis utilizadas aqui. Esta diferença é interessante, pois é o primeiro ponto que reflete as peculiaridades entre ambas as variáveis. Este aspecto também foi notado no estudo do coeficiente de correlação entre as grandes e pequenas escalas,  $r_{(w,\Delta w)}$ . Neste estudo notou-se um máximo de correlação entre os períodos de 1 a 3 dias para a densidade de prótons e, entre 5 a 10 dias para a velocidade do vento solar. Além disso, apenas o vento solar foi sensível ao ciclo solar, corroborando o fato do item anterior mostrando a diferença entre ambas as variáveis. O uso do Espectro Cruzado em Ondeleta de ambas as variáveis mostraram uma forte correlação entre ambas no intervalo de 25 a 40 dias, sem uma distinção clara para ambos os ciclos de atividade solar. Esta correlação forte entre as variáveis no intervalo de 25 a 40 dias pode estar revelando a importância de fenômenos de grande escala no escoamento turbulento. Dada a esta importância destes fenômenos, foram calculados os momentos estatísticos nas séries temporais filtrados Passa-Alta (PA) e Passa-Baixa (PB) além das séries originais de ambas as variáveis solares. O resultado mais importante ocorreu para o vento solar, ou seja, apresentaram elevados valores da curtose para  $r < 1000$  na componente PB em relação às outras duas. Além disso, os valores do coeficiente de assimetria sofreram aumentos também para a componente PB. Tal comportamento reflete o fato da presença de ECs nesta componente PB e que estas contribuem de algum modo para a intermitência. Estes resultados também foram observados para os dois ciclos de atividade solar, porém, em menor intensidade no período CA para ambos os momentos estatísticos. Este resultado para o vento solar não foi encontrado para a densidade de prótons em nenhuma das duas condições do ciclo solar, revelando outra importante diferença entre ambas as variáveis solares.

**Palavras-chave:** Turbulência, vento solar, densidade de prótons, intermitência, Transformada em Ondeletas.

# STATISTICAL ANALYSIS AND WAVELET APPLIED TO THE SOLAR WIND AND PROTON DENSITY.

## ABSTRACT

The objective of this work was investigate how the statistical properties from two solar variables act in function of the solar cycle. For this, we applied some statistical approach on the time series of the solar wind velocity and proton density from 1996 to 2004 period, except the 1998 year. Furthermore, the wavelet transform was used not only as aim to statistical approach, but mainly to promote the understanding of the intermittence and the coherent structures which introduces the non-stationarity in the time series studied. The results indicated that, for both variables, the two statistical parameters (skewness and kurtosis coefficient) had been important increase in smaller scales for maximum solar activity period, when compared with the moderate one. This behavior also was noted through of the spectral variability for both variables obtained from Global Wavelet Spectrum, showing the influence of the solar activities. Further, the results showed the first differences between the both variables where, this results is interesting because is the first point that indicate the peculiar characteristics from the variables. This aspect also point out in the coefficient correlation study between small and large scales,  $r_{(w,\Delta w)}$ . In this study, we noted the maximum correlation in interval of the 1 to 3 days for proton density and, 5 to 10 days for solar wind velocity. Also, only the solar wind was sensible to solar cycle. The use of the Wavelet Cross Spectrum of the both variables showed the strong correlation into the interval of the 25 to 40 days, without a clear distinction with respect of the solar cycle. This strong correlation in this interval may be showing the importance of the large scale in turbulent flow. Due the importance of these phenomena, we calculated the statistical parameters in the High-Pass (HP), Low-Pass (LP) filtered and original time series of the both solar variables. The most important result occurred for solar wind, i.e., this variable presented elevated values to kurtosis for  $r < 1000$  in the LP component. Furthermore, the values of the skewness also had been elevated values for the same component. This behavior may be an indicative of the coherent structures presence in this component. The result mentioned above also was observed for the two solar cycles, however, in lower intensity to the higher solar cycle. It is important point out that this result for the solar wind do not was observed for the proton density in any solar cycle, showing another important difference found between the both solar variables.

**Keywords:** Turbulence, solar wind, próton density, intermittence, Wavelet Transform

## Lista de ilustrações

<b>Figura 1.1:</b> Série temporal do número de manchas solares medido desde o ano de 1749 até 2002. ....	5
<b>Figura 1.2:</b> Série temporal do número de manchas solares medido desde o ano de 1996 até 2005. ....	5
<b>Figura 1.3:</b> Plasma Solar e Campo Magnético Interplanetário. ....	8
Fonte: <a href="http://ssdoo.gsfc.nasa.gov/education/lectures/magnetosphere/index.html">http://ssdoo.gsfc.nasa.gov/education/lectures/magnetosphere/index.html</a> .....	8
<b>Figura 1.4:</b> Funções de Densidade de Probabilidade do mês de julho de 2000 calculadas para quatro espaçamentos entre pontos (mostrados na legenda). ....	13
<b>Figura 2.1:</b> Séries-temporais de velocidade do vento solar e densidade de prótons para o ano de 1998, obtidos pelo SOHO. Note as grandes lacunas de ausência de dados. ....	17
<b>Figura 2.2:</b> Gráfico superior mostra uma série-temporal de 1999 de densidade de prótons com dados espúrios e, gráfico inferior mostra a mesma série-temporal após o processo de interpolação spline. ....	18
<b>Figura 2.3:</b> Gráfico superior: Velocidade do vento solar do ano de 1999 e; Gráfico inferior: densidade de prótons do ano de 2000. ....	19
<b>Figura 3.1:</b> Parte real da função ondeleta de Morlet. ....	30
<b>Figura 3.2:</b> Função ondeleta de Haar. ....	32
<b>Figura 4.1:</b> Relação da Densidade de Prótons entre os períodos 1996-1997 e 1999-2004. 38	
<b>Figura 4.2:</b> Relação da Velocidade do Vento Solar entre os períodos 1996-1997 e 1999-2004. ....	38
<b>Figura 4.3:</b> Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtidos para os dados de densidade de prótons de 1996-1997. ....	42
<b>Figura 4.4:</b> Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtido para os dados de densidade de prótons de 1999-2004. ....	43
<b>Figura 4.5:</b> Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtido para os dados de velocidade do vento solar de 1996-1997. ....	44
<b>Figura 4.6:</b> Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtido para os dados de velocidade do vento solar de 1999-2004. ....	46
<b>Figura 4.7:</b> Coeficiente de Correlação calculado para a densidade de prótons para o período de 1996 – 1997 e 1999 - 2004. ....	48

<b>Figura 4.8:</b> Coeficiente de Correlação calculado para a velocidade do vento solar para o período de 1996 – 1997 e 1999 - 2004. ....	49
<b>Figura 4.9:</b> Os dois gráficos superiores mostram a série temporal da velocidade do vento solar e densidade de prótons, respectivamente e; o gráfico inferior mostra o periodograma do Espectro Cruzado de Ondeleta (ECO), para o período 1996-1997. ....	51
<b>Figura 4.10:</b> Os dois gráficos superiores mostram a série temporal da velocidade do vento solar e densidade de prótons, respectivamente e; o gráfico inferior mostra o periodograma do Espectro Cruzado de Ondeleta (ECO), para o período de 1999-2004. ....	52
<b>Figura 4.11:</b> Sinal original (gráfico superior), componente filtrada passa-alta (gráfico do meio) e componente filtrada passa-baixa (gráfico inferior). Referente a uma série temporal da velocidade do vento Solar para o período de 1999-2004. ....	54
<b>Figura 4.12:</b> Curtose (gráfico superior) e Coeficiente de Assimetria (gráfico inferior) da Alta e Baixa Frequência do Vento Solar para o período de 1996-1997. ....	55
<b>Figura 4.13:</b> Curtose (gráfico superior) e Coeficiente de Assimetria (gráfico inferior) e da Alta e Baixa Frequência do Vento Solar para o período de 1999-2004. ....	57
<b>Figura 4.14:</b> Coeficiente de Assimetria e Curtose da Alta e Baixa Frequência da Densidade de Prótons para o período de 1996-1997. ....	58
<b>Figura 4.15:</b> Coeficiente de Assimetria e Curtose da Alta e Baixa Frequência da Densidade de Prótons para o período de 1999-2004. ....	59

## Lista de tabelas

<b>Tabela 4.1:</b> Valores de energia para cada período para os dois períodos de atividade solar. Resultados para a densidade de prótons. ....	43
<b>Tabela 4.2:</b> Valores de energia para cada período para os dois períodos de atividade solar. Resultados para o vento solar. ....	46

## **Lista de abreviaturas e siglas**

- ACE** – Advanced Composition Explorer
- ASA** – Atividade Solar Alta
- ASB** – Atividade Solar Braca
- ASM** – Atividade Solar Moderado
- CA** – Ciclo de atividade Solar Ativo
- CAO** – Criticalidade Auto-Organizada
- ECs** – Estruturas Coerentes
- ECO** – Espectro Cruzado de Ondeletas
- ECT** – Energia Cinética Turbulenta
- EGO** – Espectro Global de Ondeletas
- ESA** – Agência Espacial Européia
- H** – Componente Horizontal
- HD** – Hidrodinâmica
- K41** – Trabalho de Kolmogorov de 1941
- K62** – Trabalho de Kolmogorov de 1962
- MHD** – Magnetohidrodinâmica
- NASA** – Agência Espacial Norte Americana
- ON** – Observatório Nacional
- PA** – Filtro Passa-Alta
- PB** – Filtro Passa-Baixa
- PDFs** – Funções de Densidade de Probabilidade
- Re** – Números de Reynolds
- SOHO** – Observatório Solar e Heliosférico
- TEG** – Termoestatística Generalizada
- TF** – Transformada de Fourier
- TO** – Transformada em Ondeletas
- UA** – Unidade Astronômica

## Lista de símbolos

### Latinos

$a$  – Real

$b$  – Real

$dt$  - Diferencial no tempo

$dx$  - Diferencial no espaço

$e$  - Exponencial

ECO – Espectro Cruzado de Ondeleta

$E(k)$  - Espectro de Energia

$f(t)$  - Série temporal qualquer

$f(x)$  - Série Temporal

$i$  – Unidade Imaginária

$k$  – Número de onda

$K_r$  - Curtose

$L$  – Escala Integral

$M(a)$  - Espectro Global de Ondeleta

$r$  - Incremento

$T$  - Período

$u_r$  - Incremento de Velocidade

$u(x)$  - Velocidade

$u(x+r)$  - Velocidade mais incremento

$x_n$  – Série Temporal

$|W(a,t)|$  - Energia em cada período

$W_n^X(s)$  - Transformada em Ondeleta da série temporal de  $x_n$

$W_n^Y(s)$  - Transformada em Ondeleta da série temporal de  $y_n$

$W_n^{Y*}(s)$  - Complexo Conjugado da Transformada de Ondeleta

$(w(x) - \langle w(x) \rangle)$  - Pequenas Escalas do Escoamento

$y_n$  – Série Temporal

$(\Delta w(x,r) - \langle \Delta w(x,r) \rangle)$  - Grandes Escalas do Escoamento

## **Gregos**

$\mathbf{r}_{(w,\Delta w)}$  - Coeficiente de Correlação

$\mathbf{s}_w$  - Desvio Padrão da Série  $w$

$\mathbf{s}_x$  - Desvio Padrão da Série  $x_n$

$\mathbf{s}_y$  - Desvio Padrão da Série  $y_n$

$|F(\mathbf{v})|$  - Espectro de Amplitude

$\mathbf{q}(\mathbf{v})$  - Espectro de Fase

$\mathbf{v}$  - Frequência Fundamental

$\Psi_{a,b}(t)$  - Função de Ondeleta

$\mathbf{p}$  - Número Pi

$\Psi(t)$  - Ondeleta Mãe

$F(\mathbf{v})$  - Transformada de Fourier

$W_\Psi f(a,b)$  - Transformada de Ondeleta

$\mathbf{e}_r(x,t)$  - Dissipação de Energia no tempo e espaço

$\Delta u(x,r)$  - distribuições dos incrementos de velocidade

$d\nu_r$  - PDF

$\nu(x+r)$  - série temporal mais incremento

$\nu(x)$  - Série temporal qualquer

$\varepsilon$  - Taxa de dissipação de Energia Cinética

## **Símbolos Especiais**

\* - Complexo Conjugado

## Sumário

1 INTRODUÇÃO TEÓRICA.....	1
1.1 O SOL .....	2
1.2 OS CICLOS SOLARES .....	4
1.3 AS RELAÇÕES SOL-TERRA.....	7
1.4 A PROBLEMÁTICA DA TURBULÊNCIA HD.....	9
1.5 A PROBLEMÁTICA DA TURBULÊNCIA MHD .....	11
1.6 OBJETIVO DO TRABALHO .....	14
2 DADOS E CONTROLE DE QUALIDADE.....	16
2.1 DADOS.....	16
2.2 CONTROLE DE QUALIDADE DOS DADOS .....	16
3 METODOLOGIAS UTILIZADAS .....	20
3.1 DESCRIÇÃO ESTATÍSTICA DA TURBULÊNCIA.....	20
3.1.1 HIPÓTESES DE KOLMOGOROV.....	20
3.1.2 ESTRUTURAS COERENTES E TURBULÊNCIA.....	24
3.1.3 INTERMITÊNCIA NOS ESCOAMENTOS TURBULENTOS.....	25
3.2 MOMENTOS ESTATÍSTICOS .....	27
3.3 TRANSFORMADA DE FOURIER .....	27
3.4 TRANSFORMADA EM ONDELETA.....	29
3.5 ESPECTRO GLOBAL DE ONDELETA (EGO).....	32
3.6 ESPECTRO DE ONDELETA CRUZADA .....	33
3.7 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO .....	34
4 ANÁLISES DOS RESULTADOS .....	36
4.1 MOMENTO DE TERCEIRA E QUARTA ORDEM.....	36
4.2 ESPECTRO GLOBAL DE ONDELETAS (EGO) .....	40
4.3 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO .....	47
4.4 ESPECTRO CRUZADO EM ONDELETAS (ECO).....	50
4.5 INFLUÊNCIA DAS ECS E INTERMITÊNCIA NAS ALTAS E BAIXAS FREQÜÊNCIAS .....	53

5 CONCLUSÃO .....	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

## 1 INTRODUÇÃO TEÓRICA

As relações Sol-Terra têm atraído um grande interesse nos últimos anos devido às conseqüências que diversos fenômenos físicos de origem solar, tais como ejeções de massa coronal, nuvens magnéticas, vento solar, entre outros (DASSO et. al., 2005) trazem diretamente para a Terra através de sua magnetosfera. Dentre essas conseqüências podem ser citadas as perturbações que ocorrem em sistemas de comunicação via satélite, queda de linhas de transmissão de energia (GONZALEZ ; TSURUTANI, 1987). Tais fenômenos físicos supramencionados interagem de maneira não linear com a magnetosfera terrestre ainda muito pouco compreendida. Neste sentido, diversos estudos têm sido realizados para compreender como ocorrem estas interações, pois como mencionado por Valdivia et al. (2005), a magnetosfera terrestre é um sistema complexo, com comportamento multiescala no espaço e no tempo. Estes mesmos autores mencionam que o estudo da relação entre teorias como criticalidade auto-organizada (CAO) e dinâmica espaço-temporal caótica com a turbulência é um assunto de vanguarda na pesquisa espacial e astrofísica.

Entretanto, antes de concentrar esforços para o estudo da magnetosfera terrestre é necessário compreender alguns aspectos físicos do meio interplanetário tais como o estudo das características da turbulência do vento solar. É neste aspecto que este trabalho está sendo focado, por isso, há a necessidade de estudá-las através de métodos estatísticos apropriados, muito utilizados em grandezas físicas obtidas da turbulência Hidrodinâmica (HD). Por isso, para compreender a turbulência Magnetohidrodinâmica (MHD) se faz necessário compreender algumas abordagens utilizadas para a turbulência HD e sua problemática. Este capítulo está dividido da seguinte maneira, as primeiras seções têm o objetivo de realizar uma breve

caracterização física do sistema Sol-Terra, bem como alguns aspectos da relação entre eles. Em seguida, devido a abordagem estatística da turbulência, será feita uma introdução da turbulência HD e toda sua problemática para, posteriormente, realizar uma revisão de alguns trabalhos sobre a turbulência MHD.

## 1.1 O SOL

O Sol, astro gasoso e centro do sistema solar, concentra 99% da massa de todo o sistema solar ( $2,19 \times 10^{27}$  toneladas) e o 1% restante é dividido entre as massas dos planetas, asteróides e cometas (TASCIONE, 1998). Pelo fato de ser um astro gasoso apresenta diferentes taxas de rotação, variando desde 34 dias nos pólos até 24,7 dias no equador e fazendo uma combinação com a rotação do planeta Terra, obtém-se um período de rotação solar de aproximadamente 27 dias. O seu estudo se faz presente através de instrumentos científicos situados no solo e também a bordo de satélites, como o satélite SOHO. Tais plataformas científicas permitem realizar medidas desde comprimentos de ondas eletromagnéticas em amplo espectro de frequência, até medidas de velocidade de partículas ionizadas e campos magnéticos interplanetários em função dos chamados períodos de atividade solar que devido a sua importância e implicações físicas, será dado um enfoque mais detalhado em seção própria.

Continuando com suas propriedades físicas, o Sol é dividido nas seguintes classes para facilitar o seu estudo e compreensão de fenômenos inerentes a estas características:

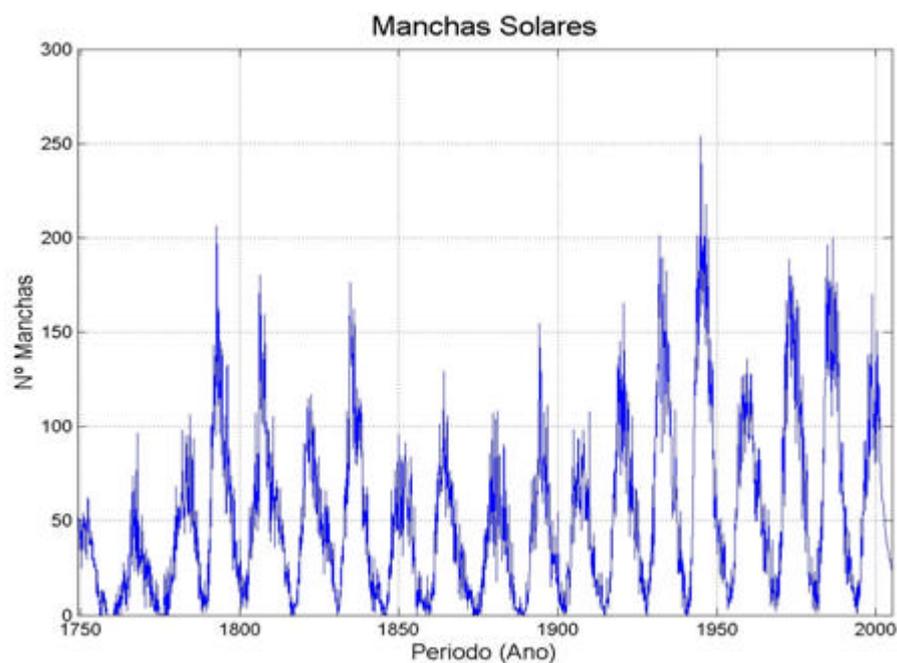
1. O **núcleo** possui um volume pequeno (1/64 do volume total) no entanto, é onde se concentra 50% da massa solar. É nesta região que ocorrem as chamadas reações termonucleares de fusão do hidrogênio em hélio, sendo a principal fonte de energia do Sol. Esta energia é transportada para as

camadas mais exteriores de três diferentes formas: condução, radiação e convecção;

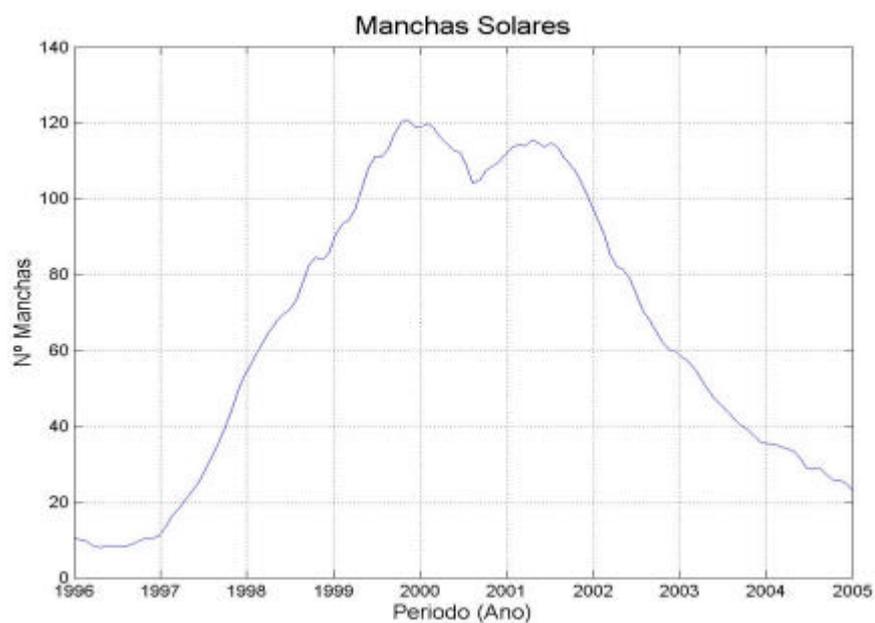
2. A **zona radiativa** é região que sucede o núcleo. A energia produzida no núcleo na forma de radiação eletromagnética é aqui transportada lentamente pela absorção e emissão de fótons. Uma fina camada entre a zona radiativa e convectiva (a "tachocline") é a região onde se imagina que o campo magnético do Sol é gerado (Tascione, 1998);
3. A **zona convectiva** é região que sucede a zona radiativa. O transporte de energia é feito através do movimento de grandes quantidades de matéria através do processo convectivo propriamente dito;
4. A **fotosfera**, que é a região visível, é uma camada com cerca de 300 km de espessura com um gradiente negativo de temperatura, ou seja, de  $10^4 K$  para  $5 \times 10^3 K$  ;
5. A **cromosfera** é uma camada com cerca de 15.000 km, e apresenta um gradiente positivo de temperatura de  $5 \times 10^3 K$  para  $5 \times 10^5 K$  ;
6. A **corona** é a camada mais externa do sol e é aquela que apresenta as maiores temperaturas, o gradiente de temperatura é positivo de  $5 \times 10^5 K$  para  $5 \times 10^{10} K$  . É nesta camada que ocorre alguns dos principais fenômenos solares de grande repercussão para a Terra tal como as ejeções de massas coronais. Estas ejeções de plasmas magnetizados são expulsas devido a desestabilização de configuração magnética (DASSO et al., 2005).

## 1.2 OS CICLOS SOLARES

Uma característica importante no Sol é a presença de pequenas regiões mais escuras sobre a superfície solar. Tais estruturas passaram a ser chamadas de manchas solares e a explicação física para a distinção visual destas é dada, pelo fato de serem regiões mais frias que a região circundante, ou seja, a temperatura destas manchas é da ordem de 3000 K em contraste com 6000 K da região circundante. Geralmente, elas tendem a aparecer em grupos e sobrevivem pelo período de algumas rotações do Sol e são denominadas regiões ativas. Em 1852, Heinrich Schwabe mostrou que o número de manchas solares apresenta um período bem definido de aproximadamente 10 anos (TASCIONE, 1988). Estudos posteriores (MOUSSAS et al., 2005) mais precisos, revelaram que este ciclo é na realidade de  $(11 \pm 2)$  anos, sendo por isso utilizado a classificação de ciclo de máxima e mínima atividade solar. A Figura 1.1 mostra a presença do ciclo solar de 11 anos na série temporal de manchas solares desde o ano de 1748 até o ano de 2005.



**Figura 1.1:** Série temporal do número de manchas solares medido desde o ano de 1748 até 2002.



**Figura 1.2:** Série temporal do número de manchas solares de 1996 até 2005.

O ciclo de 11 anos mencionado acima permitiu criar uma seguinte classificação, baseada em dois períodos distintos do ciclo solar: o período ativo e o período fraco. Entretanto, devido à

época de escolhas dos dados utilizados para este trabalho, serão convencionadas as seguintes nomenclaturas: atividade solar baixa (ASB), atividade solar moderada (ASM) e atividade solar alta (ASA). Cada uma destas classificações tem características físicas próprias e de grande importância para o estudo das relações Sol-Terra como, por exemplo, o vento solar. Devido a esta importância se faz necessário uma descrição detalhada sobre este aspecto, em particular, o vento solar e as manchas solares.

Hargreaves (1992) define o Vento Solar como sendo a emissão contínua de partículas ionizadas provenientes da coroa solar. Medidas efetuadas através de satélites demonstraram que a velocidade do vento solar varia desde 400 km/s para o período ASB até 1200 km/s para o período ASA e sua densidade se aproxima de 10 partículas por centímetros cúbicos. Estas variações, na velocidade e densidade, são devido a presença de fenômenos na coroa solar que por sua vez, sofrem a ação da rotação solar. Estes fatos fazem com que o vento solar torna-se variável e instável, criando uma característica não-estacionária, inerente ao sistema. Tal característica é percebida diretamente em campos magnéticos interplanetários e planetários, as chamadas magnetosferas, pois defletem as partículas impedindo-as de chegar às superfícies dos planetas (TASCIONE, 1988). Por isso, o estudo de séries temporais da velocidade do vento solar e de densidade de partículas, permite analisar a fenomenologia inerente destes sistemas e procura compreender melhor as suas consequências diretas na Terra como, por exemplo, problemas na propagação das ondas de rádio, quedas de linhas de transmissão, etc.

Toda a problemática oriunda de peculiaridades físicas do Sol, mostradas anteriormente, demonstra a importância não somente em caracterizá-las, mas também em como estas podem afetar diretamente a Terra. Esta importância tem aberto um campo novo de investigação que se refere ao estudo das relações Sol-Terra. Por isso, é de grande valia dedicar a próxima seção para uma descrição de como ocorre estas relações.

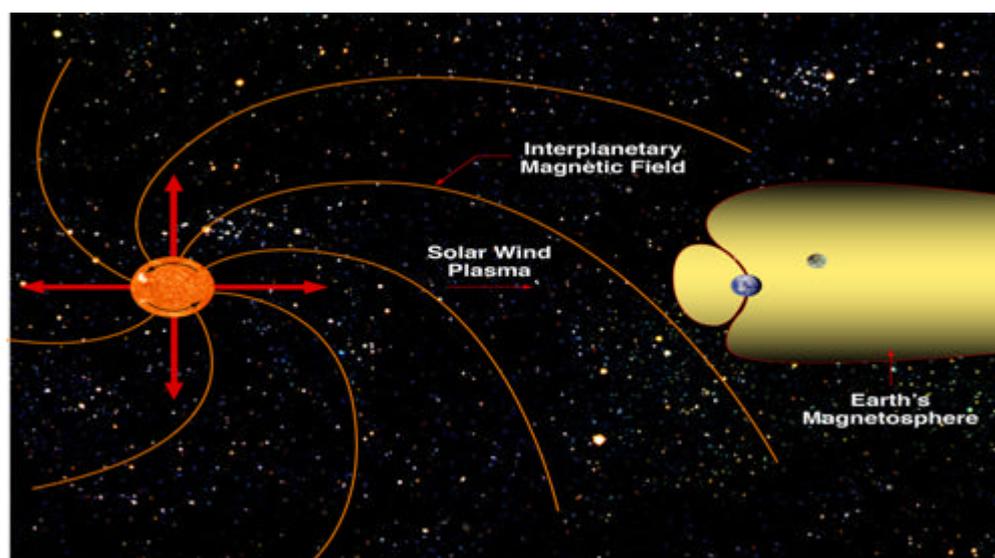
### 1.3 AS RELAÇÕES SOL-TERRA

Para facilitar o estudo das relações Sol-Terra se faz necessária uma abordagem dinâmica deste acoplamento. Entretanto, em tal abordagem é necessário que se compreenda cada um de seus componentes de modo separado, para posteriormente, entender o seu funcionamento como um todo. Deste modo, o principal componente deste sistema dinâmico, o Sol, foi previamente descrito, desde suas estruturas internas até suas principais manifestações no meio interplanetário, como o vento solar e densidade de partículas. Agora, há a necessidade de uma breve descrição de algumas características da Terra de modo a propiciar melhor entendimento do acoplamento entre ela e o Sol.

O planeta Terra possui em seu interior materiais metálicos em estado líquido, o chamado magma, em movimento rotacional que cria o campo magnético terrestre. Este fenômeno é o resultado de que toda a Terra se comporta como um enorme ímã. Apesar de a Terra ter um comportamento de um grande ímã, seus pólos magnéticos não coincidem com os pólos geográficos. Além disso, as posições dos pólos magnéticos não são constantes e mostram mudanças observáveis de ano para ano. A medida da intensidade do campo magnético é realizada através dos magnetômetros, que determinam a intensidade do campo e as intensidades na direção horizontal e vertical. A intensidade do campo magnético varia para os diferentes pontos da superfície do planeta.

O campo geomagnético controla a magnetosfera, que é a região que fecha a Terra, apenas acima da ionosfera. Para uma compreensão básica da forma da magnetosfera terrestre, discutiremos primeiro os fenômenos causados pelo Sol. Na Figura 1.2 é mostrada a magnetosfera terrestre e as linhas do campo magnético solar. O vento solar comprime o lado diurno da

magnetosfera para uma distância de 6 a 10 raios terrestres, e arrasta o lado noturno da magnetosfera para mais ou menos 1000 raios da Terra.



**Figura 1.3:** Plasma Solar e Campo Magnético Interplanetário <sup>1</sup>.

Fonte: <http://ssdoo.gsfc.nasa.gov/education/lectures/magnetosphere/index.html>

Como visto, o Sol exerce um papel crucial na relação propriamente dita, como sendo a única principal fonte de energia do sistema. Entretanto, toda a transferência desta energia produzida pelo Sol até a Terra ainda é alvo de estudos (KIRCHHOFF, 1991). Neste aspecto várias abordagens têm sido empregadas para estudar cada parte desta problemática, desde estudos de fenômenos de maiores escalas como estudos de escoamento de correntes (stream flows) até fenômenos de menores escalas, justamente àqueles envolvidos com a Turbulência, em particular a Turbulência MHD. Para isso, diversos pesquisadores buscaram compreender fenômenos comuns à turbulência HD para posterior entendimento da turbulência MHD. Este assunto, em particular, tem sido muito investigado na literatura na tentativa de procurar realizar a modelagens dos chamados fenômenos intermitentes e estruturas coerentes (KOVÁCS, 2001). Porém, o fato

---

<sup>1</sup> Figura fora de escala, meramente ilustrativa.

de ainda não ter sido dada atenção especial a estes fenômenos quanto a sua fenomenologia, a tentativa de modelá-las torna-se um trabalho bastante árduo. Devido ao fato de empregar a turbulência como metodologia deste trabalho, serão descritos nas próximas seções assuntos dedicados a esta teoria e pesquisas que foram realizadas sobre este assunto.

#### 1.4 A PROBLEMÁTICA DA TURBULÊNCIA HD

Dada a impossibilidade de estudar a turbulência através das equações de Navier-Stokes, um dos métodos de estudá-la se faz através da averiguação de possíveis desvios da Gaussianidade das chamadas Funções de Densidade de Probabilidade (PDFs) aplicadas a algum sinal medido no tempo. Em geral, qualquer série temporal  $v(x)$  gerada por um processo linear tem uma PDF Gaussiana através da operação:

$$dv_r = \langle |v(x+r) - v(x)| \rangle \quad (1)$$

Este conceito de PDF Gaussiana é uma hipótese básica do famoso trabalho de Kolmogorov (1941). Kolmogorov supôs que as forças externas de geração de energia cinética turbulenta (ECT) atuarem apenas nas escalas maiores do escoamento enquanto as forças de fricção viscosa atuam apenas nas menores escalas, o que, no limite de grandes números de Reynolds (Re), conduz à existência de um intervalo intermediário de escalas, o subdomínio inercial. Neste, a energia seria conservada, sendo apenas transferida das escalas maiores para as menores segundo uma taxa constante  $\epsilon$ ). Kolmogorov também propôs que os escoamentos turbulentos são estatisticamente homogêneos e isotrópicos no subdomínio inercial, além de

apresentarem momento de terceira ordem constante. Assim, Kolmogorov foi o primeiro a propor homogeneidade local e isotropia do escoamento turbulento atmosférico. Entretanto, resultados experimentais mostraram que as PDFs mudam com a escala analisada (ANSELMET et al., 1984; FRISCH, 1995; WARHAFT, 2000).

Toda esta problemática das PDFs sofrerem variações com o incremento  $r$ , foi associada a fenômenos rápidos e sem nenhuma periodicidade. A estes fenômenos ficaram conhecidos como intermitência. Fisicamente, a intermitência está relacionada com a presença de raros, mas fortes gradientes de velocidade ou de escalares com acentuada localização no espaço ou no tempo, que são gerados por estruturas altamente coerentes (ECs) (KINNEY; McWILLIAMS, 1995), Camussi e Guj, (1997) quase sempre não estacionárias, que não preenchem todo o espaço do escoamento e aumentam fortemente a taxa de dissipação local de energia cinética turbulenta (STULL, 1988). A existência da intermitência coloca sérios problemas estatísticos para a estimação correta dos parâmetros turbulentos, tendo em vista as dificuldades de amostragem inerentes a tais processos, o que foi discutido por Katul et al. (1994), dentre outros.

Uma outra abordagem para estudar a intermitência foi adotada por autores tais como Gagne et al. (1994) para a turbulência HD, que tentaram representar a evolução dos expoentes da lei de potência dos momentos de ordem elevada dos incrementos de velocidade ou de escalares, como uma função de ordem  $p$  e comparar esta evolução com as formulações teóricas. Muitas destas formulações estão baseadas nas idéias fenomenológicas sobre a turbulência baseadas no conceito de cascata de energia que admitem que os vórtices maiores se quebram em vórtices menores e procuram quantificar a distribuição de energia em cada etapa deste processo. Entre estes modelos, os mais realísticos são aqueles que utilizam ajustes baseados em distribuições com cauda, como é o caso da lognormal (KOLMOGOROV, 1962), ou se baseiam nas propriedades da fractalidade ou multifractalidade (PARISI ; FRISCH, 1985). Podem ser citadas aqui, estatísticas

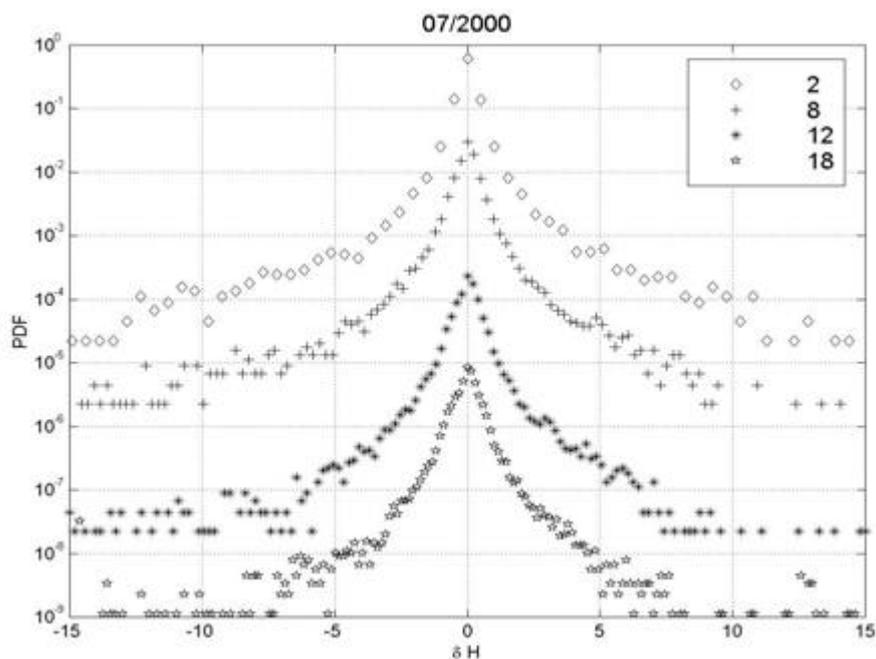
mais refinadas baseadas na distribuição log-Poisson (SHE ; LEVEQUE, 1994) e (SHE ; WAYMIRE, 1995), modelos baseados nas propriedades da distribuição de Lévy (PAINTER, 1996) e ainda modelos baseados em propriedades termoestatísticas não-extensivas (RAMOS et al., 1999; 2001a; BECK, 2000; TSALLIS, 2002). Portanto, a compreensão do comportamento das PDFs passa necessariamente pelo estudo mais detalhado dos fenômenos que as influenciam, como os da intermitência e das chamadas estruturas coerentes.

## **1.5 A PROBLEMÁTICA DA TURBULÊNCIA MHD**

Estudos iniciais da turbulência MHD procuraram averiguar também a proposta de homogeneidade local e isotropia do escoamento turbulento proposto por Kolmogorov (1941), entre estes se destacam Burlaga, (1991), Marsch e Tu, (1994), Kinney e McWilliams, (1995), Marsch e Tu, (1997). Estes trabalhos indicaram o mesmo problema da turbulência HD, ou seja, detectaram a presença da intermitência. Por isso, a análise da intermitência de pequena escala e o estudo de suas características estatísticas tornou-se uma questão essencial associada à validade da hipótese da turbulência MHD isotrópica (BISKAMP ; MÜLLER, 2000), pois, a existência da intermitência coloca sérios problemas estatísticos para a estimação correta dos parâmetros turbulentos, tendo em vista as dificuldades de amostragem inerentes a tais processos, o que foi discutido por Katul et al. (1994), dentre outros.

Kovács et al. (2001), estudaram o problema da intermitência no sistema geomagnético utilizando a hipótese de que a Magnetosfera comporta-se como um sistema magneto-hidrodinâmico ideal, onde vórtices de plasma coerente podem envolver uma variedade de escalas espaciais, gerando uma cascata tal que o sistema transfira energia da escala de produção até a dissipação, igualmente a cascata de Kolmogorov. Com isso, estes autores estudaram-na através

das Funções de Densidade de Probabilidade (PDFs), onde obtiveram PDFs com o formato próximo de uma função Cauchy, além de elas mudarem de acordo com a escala. Tal comportamento indica, segundo eles, a presença de intermitência no sistema Magnetosfera. No Brasil, resultados preliminares de Bolzan et al. (2003), utilizando dados da componente horizontal (H) do campo geomagnético, medido através de magnetômetro instalado em Vassouras (RJ) e operado pelo Observatório Nacional (ON), indicaram também forte presença de intermitência para uma série tomada durante um período em que ocorreu uma forte tempestade magnética. A Figura 1.4 mostra PDFs da componente H para o mês de julho de 2000, onde ocorreu uma forte tempestade magnética. Entretanto, ainda não há uma análise sistemática de como se comporta as PDFs do campo geomagnético antes, durante e depois de uma tempestade. Outros estudos de Bolzan et al. (2005a) mostraram alguns indicativos de comportamentos distintos nestas três fases de um distúrbio geomagnético, necessitando ainda de um melhor aprimoramento.



**Figura 1.4:** Funções de Densidade de Probabilidade do mês de julho de 2000 calculadas para quatro espaçamentos entre pontos (mostrados na legenda).

Uma outra abordagem para estudar a intermitência foi adotada por autores tais como Biskamp e Müller (2000), que tentaram representar a evolução dos expoentes da lei de potência dos momentos de ordem elevada dos incrementos de velocidade ou de escalares como uma função de ordem  $p$  e comparando esta evolução com as formulações teóricas.

Muitas destas formulações estão baseadas nas idéias fenomenológicas sobre a turbulência baseadas no conceito de cascata de energia que admitem que os vórtices maiores se quebram em vórtices menores e procuram quantificar a distribuição de energia em cada etapa deste processo. Entre os modelos para a turbulência da MHD são aqueles que utilizam ajustes baseados em distribuições com cauda, como é o caso da função kappa muito utilizada em Física Espacial, mas sem qualquer fundamento físico (MAKSIMOVIC et al., 1997), e ainda modelos baseados em propriedades Termoestatística Generalizada (TEG) de Tsallis (LEUBNER 2002; BURLAGA;

VIÑAS, 2004; BOLZAN et al., 2005b). Entretanto, esta abordagem baseada na entropia não-extensiva ainda está apenas no início, necessitando averiguar se a mesma funciona sob diferentes condições de atividade solar, como iniciado por Bolzan et al. (2005a). Além disso, se esta abordagem pode ser realizada também em outras variáveis, como o campo geomagnético. Portanto, a compreensão do comportamento das PDFs das várias grandezas físicas do sistema Sol-Terra passa necessariamente pelo estudo mais detalhado dos fenômenos que as influenciam, como os da intermitência e das chamadas Estruturas Coerentes (ECs).

A existência de forte intermitência coloca também sérios problemas para a aplicação da análise de Fourier aos sinais turbulentos (FARGE, 1992). Efetivamente, as estruturas com contornos abruptos complicam as estimativas dos espectros e coespectros das grandezas turbulentas, introduzindo nestas, distorções fisicamente falsas (FARGE, 1992). Portanto, a compreensão das propriedades estatísticas da intermitência, particularmente a explicação física para os valores dos momentos turbulentos, constitui um problema da turbulência desenvolvida (WARHAFT, 2000). Dada esta problemática de análise de Fourier se faz necessário à utilização de métodos mais sofisticados para estudos destes sinais. Dentre estas análises está a utilização da Transformada em Ondeletras e que, portanto, merecerá oportuna atenção em capítulo futuro.

## **1.6 OBJETIVO DO TRABALHO**

Com o objetivo de estudar o efeito do ciclo solar sobre as variáveis obtidas através do satélite SOHO, ou seja, como o ciclo solar afeta estatisticamente as séries temporais de velocidade do vento solar e densidade de prótons? Para responder a isso, abaixo estão alguns sub-objetivos que devem ser seguidos:

1. Qual é o comportamento estatístico dos parâmetros do coeficiente de assimetria (skewness) e curtose (kurtosis) de ambas as variáveis em função do ciclo solar? Será necessário calcular ambos os momentos estatísticos nos seguintes incrementos  $r$ , dados em horas: 4; 16; 648; 2047. Para uma análise estatística melhor, houve a necessidade de se adicionar cinco incrementos entre os principais, ficando a série da seguinte forma: 4; 6; 8; 10; 12; 14; 16; 121; 226; 331; 436; 541; 648; 881; 1114; 1347; 1580; 1813; 2047. Os incrementos foram adicionados sempre com espaçamentos de horas iguais entre si;
2. Em quais escalas (ou períodos) a energia dada pelo ciclo solar se manifesta para ambas as variáveis? Para isso, será necessário o uso da Transformada em Ondeletas, na sua forma contínua, para averiguar se o ciclo solar provoca um aumento de energia e em quais escalas;
3. Existe diferença entre ambas as variáveis em função da variabilidade solar? Se há, qual deve ser o sentido físico?;
4. Também, se existir esta diferença, em quais escalas estas variáveis têm diferenças? Neste item se fará necessário utilizar a abordagem da correlação cruzada dada por Katul et al. (1995);

Além disso, é possível obter a informação de como esta diferença se manifesta em função do tempo? Para isso, será necessário utilizar a abordagem da correlação cruzada através da Transformada em Ondeletas.

## **2. DADOS E CONTROLE DE QUALIDADE**

### **2.1 DADOS**

Neste trabalho serão utilizados dados referentes à velocidade do Vento Solar (Solar Wind) e Densidade de Prótons (Próton Density) obtidos pelo satélite SOHO, com uma amostragem de uma medida por hora, o que corresponde a uma frequência de amostragem de  $2,78 \times 10^{-4} \text{ Hz}$ . Esses dados estão disponibilizados por “MTOF/PM Data by Carrington Rotation” no endereço eletrônico: <http://umtof.umd.edu/pm/crn/>.

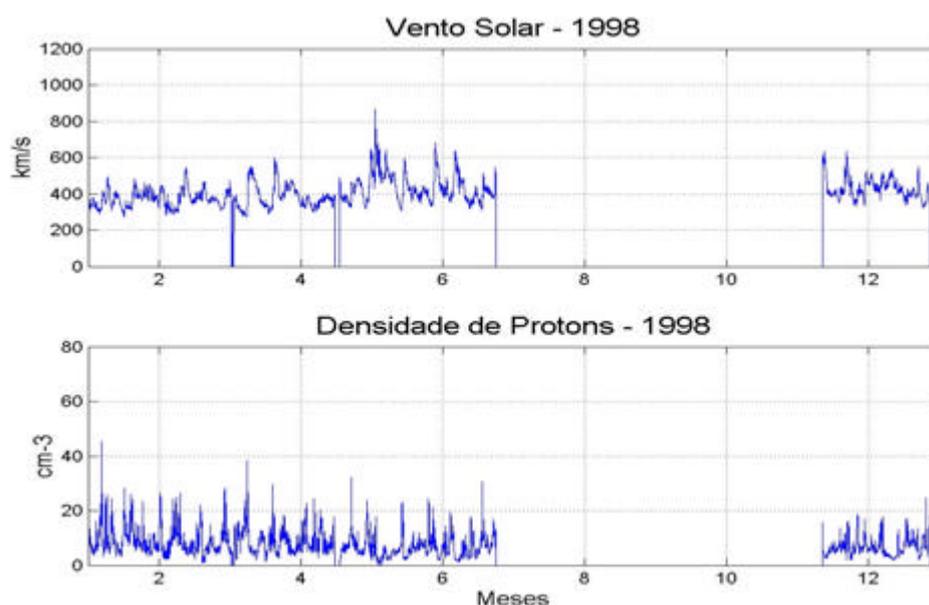
O Observatório Heliosférico e Solar (SOHO), é um projeto de cooperação internacional entre a ESA e a NASA para o estudo do Sol, desde seu centro ao exterior da corona e vento solar. Inicialmente o SOHO foi projetado para operar apenas durante dois anos, mas já está completando dez anos de atividade, com uma boa confiabilidade de seus dados.

Para este trabalho, foram tomados dados que contemplaram duas situações distintas para o período de atividade solar: atividade solar baixa (de 1996 e 1997) e atividade solar alta e moderada (de 1999 a 2004).

### **2.2 CONTROLE DE QUALIDADE DOS DADOS**

O objetivo desta seção é descrever a metodologia empregada para a verificação da qualidade dos diversos dados, obtidos através do SOHO. Existem várias metodologias empregadas para o controle de dados disponíveis na literatura, sendo uma das mais importantes o trabalho de Vickers e Mahrt (1996). Estes autores compilaram diversos métodos de controle de

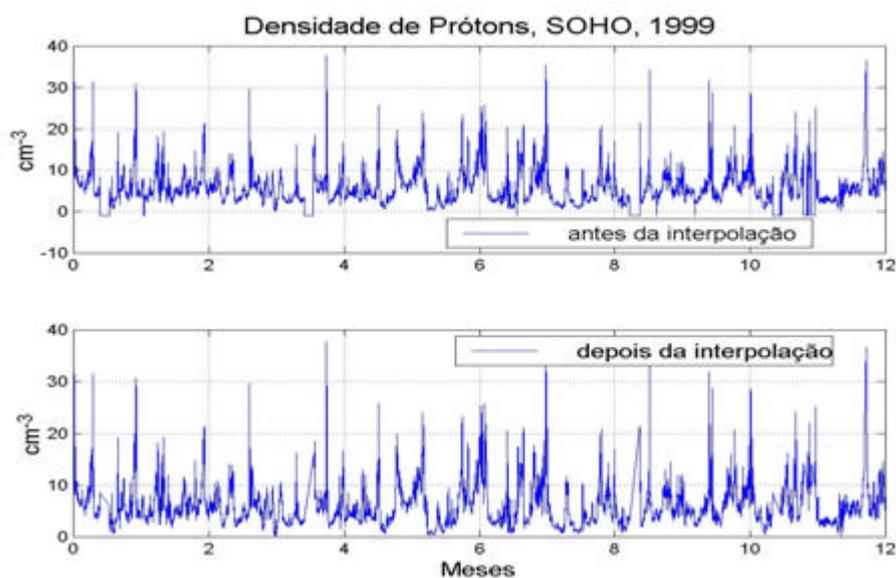
qualidade de dados, propostos por vários autores e aplicaram a dados dos experimentos micrometeorológicos intitulados RASEX, Microfronts95 e BOREAS, tendo obtido resultados satisfatórios. Entretanto, o único processo utilizado neste trabalho para averiguação da qualidade dos dados, consistiu em uma inspeção visual de todas as séries-temporais utilizadas. Tal procedimento foi suficiente desde que foi retirada, deste estudo, unicamente a série-temporal de velocidade do vento solar e densidade de prótons do ano de 1998, por apresentarem grandes lacunas na aquisição de dados, conforme mostrado na Figura 2.1. Procurou-se utilizar métodos de interpolação para suprir as lacunas nos dados mas, tal procedimento não teve sucesso devido a dimensão das lacunas de dados.



**Figura 2.1:** Séries-temporais de velocidade do vento solar e densidade de prótons para o ano de 1998, obtidos pelo SOHO. Note as grandes lacunas de ausência de dados.

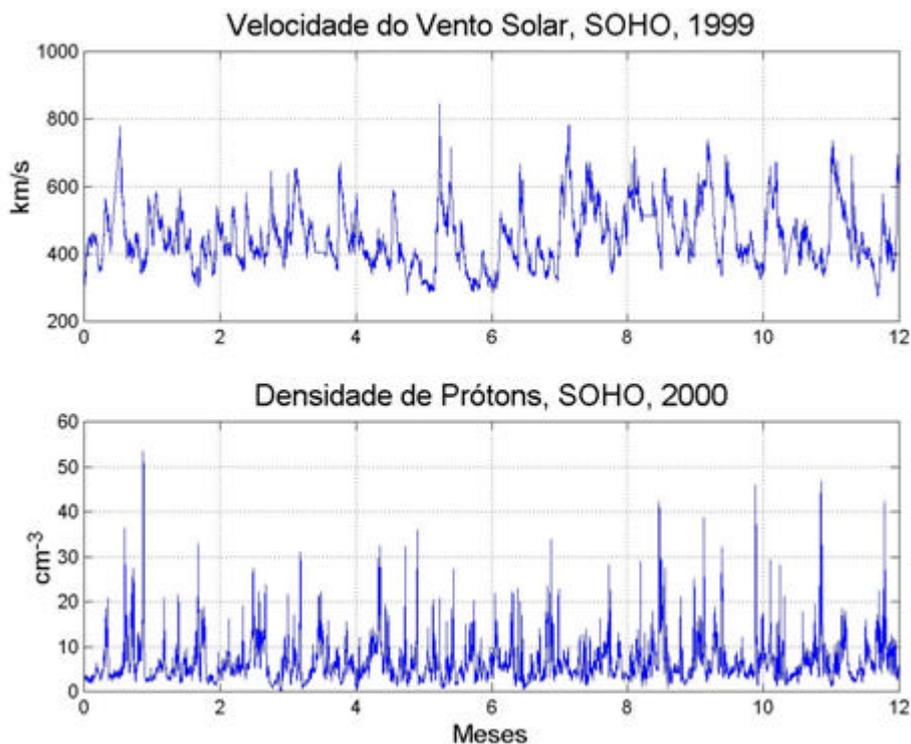
O procedimento de interpolação foi também aplicado em outras séries-temporais de modo a substituir valores espúrios presentes. Para isto, foi desenvolvido um programa em MATLAB

baseado em interpolação “spline” para a remoção destes dados espúrios. A Figura 2.2 mostra um exemplo do processo de remoção.



**Figura 2.2:** Gráfico superior mostra uma série-temporal de 1999 de densidade de prótons com dados espúrios e, gráfico inferior mostra a mesma série-temporal após o processo de interpolação spline.

A seguir, são mostrados na Figura 2.3 apenas dois exemplos característicos das séries-temporais do vento solar e densidades de prótons.



**Figura 2.3:** Gráfico superior: Velocidade do vento solar do ano de 1999 e; Gráfico inferior: densidade de prótons do ano de 2000.

Após esta descrição dos cuidados tomados com as séries temporais utilizadas neste trabalho, fatos este imprescindíveis para qualquer trabalho experimental, serão abordadas no capítulo seguinte, as metodologias empregadas sobre estas séries, começando com uma breve introdução estatística da turbulência dada primeiramente por Kolmogorov em 1941, e terminando com uma metodologia baseada na correlação entre as pequenas e as grandes escalas do escoamento turbulento, assunto este já utilizado para a turbulência hidrodinâmica, mas ainda não empregada para séries temporais como as utilizadas aqui.

### **3. METODOLOGIAS UTILIZADAS**

#### **3.1 DESCRIÇÃO ESTATÍSTICA DA TURBULÊNCIA**

Dada a impossibilidade de uma abordagem totalmente analítica da turbulência, uma parte considerável de seu estudo tem-se dado com auxílio de métodos estatísticos (MONIN; YAGLOM, 1971). Um dos primeiros métodos estatísticos foi dado por Taylor (1921; 1935) que, sob a influência de Norbert Wiener, propôs caracterizar os campos turbulentos através de suas funções-correlação, em particular, pela transformada de Fourier da função correlação da mesma variável obtida entre dois pontos afastados um do outro no espaço ou no tempo (função autocorrelação), a qual fornece seu espectro de energia. Para simplificar os cálculos das funções autocorrelação, Taylor formulou as hipóteses de homogeneidade estatística e de isotropia dos escoamentos turbulentos, ou seja, que as médias de "ensemble" são invariantes sob translação e rotação, respectivamente. Kolmogorov estudou a maneira pela qual a equação de Navier-Stokes em três dimensões distribui energia entre os graus de liberdade do escoamento. Propôs as suas duas hipóteses em 1941 e acrescentou uma terceira em 1962. Tais hipóteses ficaram conhecidas como a teoria K41 e K62, respectivamente (FRISCH, 1995). Para uma melhor compreensão das hipóteses de Kolmogorov (K41 e K62), far-se-á a seguir uma breve discussão sobre as mesmas.

##### **3.1.1 HIPÓTESES DE KOLMOGOROV**

Em 1941, Kolmogorov supôs que as forças externas de geração de energia cinética turbulenta (ECT), atuam apenas nas escalas maiores do escoamento enquanto as forças de fricção

viscosa atuam apenas nas menores escalas, o que no limite de grandes números de Reynolds ( $Re$ ), conduz à existência de um intervalo intermediário de escalas, o subdomínio inercial. Neste, a energia seria conservada, sendo apenas transferida das escalas maiores para as menores segundo uma taxa constante ( $\epsilon$ ). Esta cascata de energia, foi concebida a partir de raciocínio baseado exclusivamente em análise dimensional (FRISCH, 1995). Kolmogorov também propôs que os escoamentos turbulentos são estatisticamente homogêneos e isotrópicos no subdomínio inercial, além de apresentarem momento de terceira ordem constante.

A hipótese da homogeneidade citada anteriormente, implica que as características do escoamento não variam em todas as direções horizontais para a turbulência HD (WARHAFT, 2000). Assim, Kolmogorov foi o primeiro a propor homogeneidade local e isotropia do escoamento turbulento atmosférico. A idéia de cascata de energia concebe três regiões distintas no espectro turbulento e admite um sentido para o fluxo espectral: das escalas maiores para as menores. A primeira região, denominada de Região de Produção (de energia cinética turbulenta), é aquela em que se encontram os maiores vórtices da turbulência e onde toda a energia cinética turbulenta é produzida a partir do cisalhamento vertical do escoamento médio. É uma região anisotrópica devido à existência de taxa de deformação do escoamento médio que gera a ECT injetada no mesmo (TENNEKES ; LUMLEY, 1972). Uma outra região do espectro turbulento é o já mencionado subdomínio inercial. É a parte central da cascata de energia, em que a ECT é conservada. Kolmogorov definiu-a como sendo a região onde o espectro de energia possui inclinação de  $-5/3$  em gráfico do tipo loglog, através de uma relação do tipo:

$$E(k) \cong e^{2/3} k^{-5/3}, \quad 3.1$$

obtida via análise dimensional, em que  $\varepsilon$  é a taxa de dissipação média de energia cinética turbulenta, por unidade de massa e  $k$  é um número de onda. Por último, o espectro turbulento possui a Região de Dissipação, onde a energia cinética é convertida em calor através da dissipação viscosa.

De acordo com Frisch (1995), a primeira hipótese de Kolmogorov assume a seguinte forma matemática:

**H1:** As distribuições dos incrementos de velocidade  $\Delta u$  são funções isotrópicas e homogêneas:

$$\Delta u(x, r) = u(x + r) - u(x) \approx u_r \quad 3.2$$

A segunda hipótese é formulada como:

**H2:** Dentro das mesmas considerações de H1, o escoamento turbulento tem uma taxa média de dissipação finita,  $\varepsilon$ , por unidade de massa.

Isso implica que todas as propriedades estatísticas de pequena escala são únicas e universalmente determinadas pela escala  $r$  e por  $\varepsilon$ .

Em 1949, Landau fez uma objeção à universalidade das proposições de Kolmogorov referentes à constância de  $\varepsilon$ . Segundo ele, em um campo turbulento, os gradientes intensos de velocidades deveriam estar confinados em regiões bastante limitadas do escoamento, o que seria refletido no fenômeno da intermitência, uma característica da turbulência desenvolvida em suas menores escalas (FRISCH, 1995).

Como consequência dessas críticas, em 1962, Kolmogorov modificou suas hipóteses iniciais, resultando em uma terceira hipótese, na qual supôs que:

**H3:**  $e_r(x,t)$  teria uma PDF cujo o comportamento obedeceria a uma distribuição lognormal para  $e \ll r \ll L$ , onde  $L$  é a chamada escala integral.

Novamente, esta hipótese mereceu forte crítica de Kraichnan (1974) que questionou o empirismo da sua formulação, indagando se chegara à hipótese de lognormalidade exclusivamente a partir de um simples ajuste desta distribuição aos dados. Desde então, numerosos pesquisadores tentaram comprovar a validade deste refinamento. Mas, este continua sendo um problema aberto da mecânica dos fluidos (LUMLEY, 1992; NELKIN, 1992; FRISCH, 1995; WARHAFT, 2000).

Na prática, muitos trabalhos indicaram que os modelos baseados nas distribuições lognormais, aplicados a dados turbulentos, não mostraram uma adequação satisfatória às situações reais. Castaing, (1990), Frisch (1995), entre outros, notaram que as PDFs dos incrementos de velocidade no subdomínio inercial mudam continuamente com a escala  $r$ . Além do mais, embora esteja implícito na teoria K41 que os momentos de terceira e quarta ordem devem ser constantes e independentes do número de Reynolds, na prática isto tem sido contestado por trabalhos como o de Antonia (1981), dentre outros. Segundo Sreenivasan (1997), a razão disso seria a forte variabilidade de  $\varepsilon$ , ou seja, a intermitência no escoamento. Um caminho para analisar o comportamento da intermitência nas flutuações turbulentas tem sido o de estudar suas PDFs. O fato de estas mudarem de comportamento com a escala  $r$  é de grande relevância para a caracterização da turbulência. Isto porque as PDFs são muitas vezes consideradas como

Gaussianas para as flutuações de velocidade e são aplicadas com satisfatória aproximação na caracterização estatística das grandezas turbulentas, como indica a teoria K41. Também é possível que o afastamento das PDFs da Gaussianidade possam estar associadas à existência das chamadas estruturas coerentes no escoamento turbulento, as quais parecem constituir ilhas de ordem em um meio desordenado. Elas merecerão atenção a seguir.

### **3.1.2 ESTRUTURAS COERENTES E TURBULÊNCIA**

Os primeiros estudos sobre as chamadas estruturas coerentes procuraram defini-las a partir de estudos da turbulência hidrodinâmica (ROBINSON, 1991; FARGE et al., 1999; RUPPERT-FELSOT et al., 2005; TOH e ITANO, 2005) sendo um assunto exaustivamente estudado inclusive para a turbulência magnetohidrodinâmica (KINNEY et al. 1995; KINNEY e McWILLIAMS, 1998). A maioria dos estudos se concentrou principalmente em suas propriedades estatísticas (CAMUSSI E GUJ, 1997; FARGE et al., 1999; BOLZAN, 2005) em ambas as turbulências, mas alguns outros buscaram determinar suas propriedades geométricas através de simulação numérica direta (RUPPERT-FELSOT et al., 2005; SUNDKVIST et al., 2005), revelando a dificuldade de caracterizar tanto estatisticamente como geometricamente este fenômeno. Ainda hoje não há uma definição precisa do que sejam estas estruturas, entretanto, este trabalho se apoiará na definição dada por Robinson (1991) que consistiu em “... as ECs como sendo uma região tridimensional onde pelo menos uma das variáveis fundamentais do escoamento (componente da velocidade, massa específica, temperatura, etc.) apresenta uma significativa correlação com ela mesmo ou com outra variável num intervalo temporal que é significativamente maior do que as menores escalas locais do escoamento”. As ECs estão associadas fortemente à dissipação de energia cinética turbulenta nos campos de velocidade. Isto

inspirou Prigogine (1996), a sugerir que tais sistemas dinâmicos dissipativos agiriam como fontes de ordem, ou de criação de informação. As estruturas coerentes parecem constituir fonte de instabilidade para o sinal turbulento, pelo menos em algumas de suas escalas. A escolha desta definição de estruturas coerentes, oriunda da turbulência hidrodinâmica, é razoável pois, este trabalho procurar-se-á caracterizar estatisticamente este fenômeno, não havendo a necessidade de uma definição que defina melhor suas propriedades geométricas.

### **3.1.3 INTERMITÊNCIA NOS ESCOAMENTOS TURBULENTOS**

Uma vez caracterizadas as Hipóteses de Kolmogorov e discutidos aspectos gerais das estruturas coerentes, passar-se-á a apresentar o problema da intermitência. Fisicamente, a intermitência está relacionada com a presença de raros mas fortes gradientes de velocidade ou de escalares com acentuada localização no espaço ou no tempo, que são gerados por estruturas altamente coerentes (CAMUSSI, 1997) quase sempre não estacionárias, que não preenchem todo o espaço do escoamento (MENEVEAU, 1991) e aumentam fortemente a taxa de dissipação local de energia cinética turbulenta (STULL, 1988).

Após a divulgação das hipóteses de similaridade refinada de Kolmogorov em 1962 (teoria K62), a análise da intermitência de pequena escala e o estudo de suas características estatísticas tornou-se uma questão essencial associada à validade da hipótese da turbulência isotrópica. Segundo (FRISCH, 1995), a intermitência pode ser quantificada quando o campo turbulento pode ser representado por uma função aleatória e estacionária. Aqui, uma função aleatória é intermitente nas pequenas escalas se a curtose, definida da seguinte maneira:

$$K_r = \frac{\langle u_r^4 \rangle}{\langle u_r^2 \rangle^2} \quad 3.3$$

crescer com  $r \rightarrow 0$ , sendo  $u_r(t) = u(t+r) - u(t)$  e  $r$  é o incremento ou separação entre pontos de uma série temporal.

Outra abordagem para estudar a intermitência na turbulência HD foi adotada por autores tais como Anselmet (1984) e Antonia (1984) que tentaram representar a evolução dos expoentes da lei de potência dos momentos de ordem elevada dos incrementos de velocidade ou de escalares como uma função de ordem  $p$  e comparar esta evolução com as formulações teóricas. Muitas destas formulações estão baseadas nas idéias fenomenológicas sobre a turbulência baseadas no conceito de cascata de energia que admitem que os vórtices maiores se quebram em vórtices menores e procuram quantificar a distribuição de energia em cada etapa deste processo. Entre estes modelos, os mais realísticos são aqueles que utilizam ajustes baseados em distribuições com cauda, como é o caso da lognormal (KOLMOGOROV, 1962); (MONIN; YAGLOM, 1971), ou se baseiam nas propriedades da fractalidade ou multifractalidade (PARISI; FRISCH, 1985). Podem ser citadas aqui, estatísticas mais refinadas baseadas na distribuição log-Poisson (SHE; LEVEQUE, 1994) e (SHE; WAYMIRE, 1995), modelos baseados nas propriedades da distribuição de Lévy (PAINTER, 1996) e ainda modelos baseados em propriedades termoestatísticas não-extensivas tanto para a turbulência HD (RAMOS et al., 1999; RAMOS et al., 2001a; BECK, 2000; TSALLIS, 2002) como para a turbulência MHD (BURLAGA; VIÑAS, 2004; BOLZAN et al., 2005b). Portanto, a compreensão do comportamento das PDFs passa necessariamente pelo estudo mais detalhado dos fenômenos que as influenciam, como os da intermitência e das chamadas estruturas coerentes.

### 3.2 MOMENTOS ESTATÍSTICOS

Como já mencionado anteriormente, dois momentos estatísticos são importantes para o estudo da Turbulência, são eles: o momento de terceira ordem ou coeficiente de assimetria (skewness) e o momento de quarta ordem ou coeficiente de achatamento (kurtosis)

De acordo com Frisch (1995), o coeficiente de assimetria mede o grau de estiramento do vórtice. O vórtice é um escoamento turbulento giratório onde as linhas de corrente apresentam um padrão circular ou espiral. São movimentos espirais ao redor de um centro de rotação. Tecnicamente um vórtice pode ser qualquer escoamento circular ou rotacional que possui vorticidade. Vorticidade é um conceito matemático utilizado na dinâmica dos fluidos que pode ser entendida como a quantidade de circulação ou rotação de um fluido por unidade de área de um ponto no campo de escoamento.

O momento de quarta ordem, também chamado de curtose (kurtosis), utilizado por Frisch (1995) está relacionado com fenômenos intermitentes. Fenômenos intermitentes são aqueles que ocorrem raramente. Uma maneira de quantificar tais fenômenos é através da seguinte equação (3.3) já mostrada.

### 3.3 TRANSFORMADA DE FOURIER

A existência de forte intermitência coloca também sérios problemas para a aplicação da análise de Fourier aos sinais turbulentos como já mencionado por Farge (1992). Efetivamente, as estruturas com contornos abruptos complicam as estimativas dos espectros e coespectros das grandezas turbulentas, introduzindo nestas, distorções fisicamente falsas (FARGE, 1992;

FARGE, 2001). Por isso, é de extrema importância a utilização de ferramentas matemáticas robustas de análises de sinais como a Transformada em Ondeletas (TO). Entretanto, a compreensão desta ferramenta passa necessariamente pela Transformada de Fourier (TF). Deste modo, na seção seguinte será feita uma breve introdução sobre a TF para, posteriormente, ficar fácil a compreensão da TO.

A Transformada de Fourier se aplica em sinais estacionários devido à utilização de funções trigonométricas: as funções senos e cossenos. O objetivo da TF é fornecer a contribuição de cada termo da combinação linear da série de Fourier, para a energia total do sinal em análise através da seguinte expressão matemática:

$$F(\mathbf{v}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i\mathbf{v}x} dx, \quad 3.4$$

onde  $\mathbf{v} = \frac{2\mathbf{p}}{T}$  é frequência fundamental e  $f(x)$  é uma série qualquer.

Como  $F(\mathbf{v})$  é, em geral, complexo ela pode ser escrita como:

$$F(\mathbf{v}) = |F(\mathbf{v})| e^{i\mathbf{q}(\mathbf{v})}, \quad 3.5$$

onde  $|F(\mathbf{v})|$  e  $\mathbf{q}(\mathbf{v})$  são, respectivamente os espectros de amplitude e de fase de  $f(x)$ .

### 3.4 TRANSFORMADA EM ONDELETA

É interessante vermos uma breve introdução teórica sobre a Transformada de Ondeletas. A Ondeleta exprime uma função ajustada com pequenas ondas criada por dilatações  $\Psi(t) = \Psi(2t)$  e translações  $\Psi(t) = \Psi(t+1)$ , de uma função geradora  $\Psi(t)$ , chamada Ondeleta Mãe. Matematicamente, a Função de Ondeleta na escala  $a$  e posição  $b$  é dada por:

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad 3.6$$

onde  $a$  e  $b$  são reais e  $a > 0$ . A Transformada em Ondeleta será definida como:

$$W_{\Psi} f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad 3.7$$

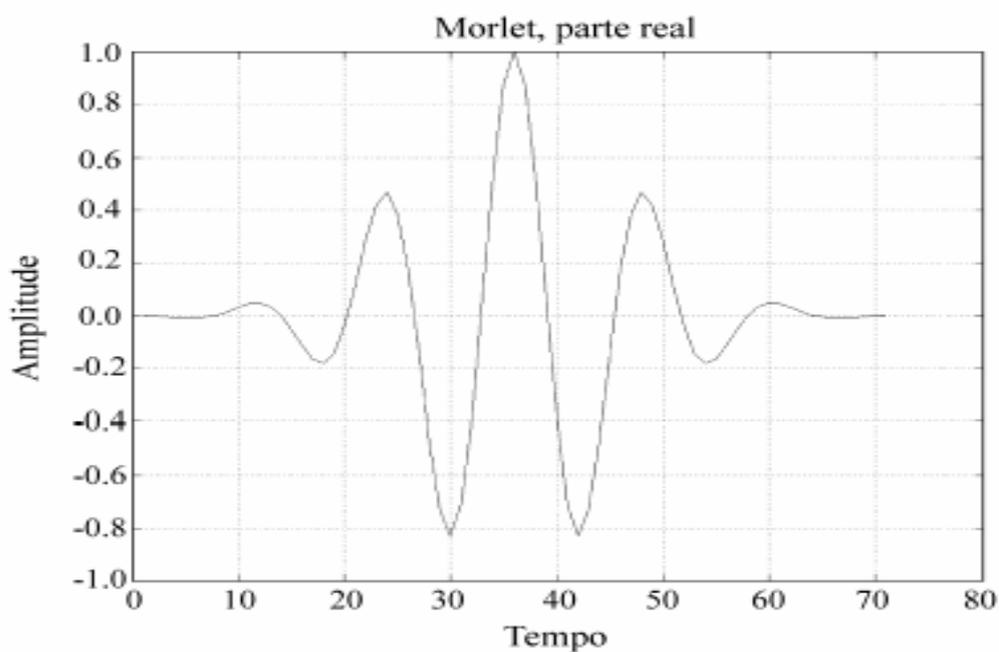
onde a função temporal  $f(t)$  é qualquer série temporal.

O fato de as funções ondeletas serem localizadas no tempo (ou espaço), contrariamente ao que ocorre com as funções trigonométricas, torna-as ideais para analisar sinais com características não-estacionárias, contendo transitoriedades e/ou estruturas tipo fractais (MORETTIN, 1999). Além disso, há duas classificações para as funções de ondeletas, cada qual com determinadas características específicas, são elas: as ondeletas contínuas e as discretas, Bolzan (2004). Para isso, far-se-á uma descrição de uma função ondeleta de cada tipo.

Neste trabalho, foi utilizada a função Ondeleta de Morlet, que é dada por:

$$y_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{p}} e^{i\nu_0 t} e^{-t^2/2}, \quad 3.8$$

onde  $\nu_0 = 5$ . A Figura 3.1 mostra apenas parte real da função de Morlet.



**Figura 3.1:** Parte real da função ondaleta de Morlet.

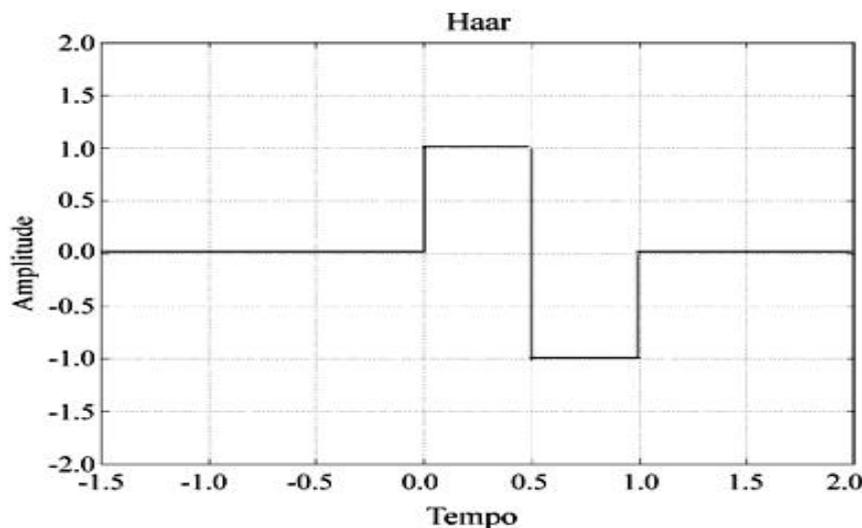
A ondaleta de Morlet, por ser contínua, é útil para estudar a variabilidade temporal da energia de cada componente de frequência presente na série temporal. Para isso, a TO de Morlet permite a construção do chamado Periodograma em Ondaleta, que consiste em um gráfico tridimensional cujo eixo y representa as escalas (ou frequências) da série, o eixo x representa o comprimento temporal da série e por último, as cores representam a energia associada a cada

escala (BOLZAN, 2004). Este tipo de informação tem demonstrado de grande importância para estudar séries temporais com propriedades não estacionárias obtidas em diversos sistemas físicos. Além disso, a sua implementação computacional é relativamente simples nos dias de hoje, sendo que alguns trabalhos como de Torrence e Compo (1998) fornecem os programas gratuitamente em diversas linguagens de programação, inclusive o MATLAB. Também, estes autores demonstram a utilidade desta ferramenta matemática aplicando-a em dados geofísicos que possibilitaram a compreensão de fenômenos relacionados ao “El Niño” a fim de entender e prever as variações climáticas causadas por ele.

A função ondeleta de Haar é a mais comum das funções discretas (BOLZAN, 2004). Por essa característica, ela é muito útil para realizar processos de decomposição e filtragens de qualquer série temporal. A categoria na qual esta ondeleta se enquadra trabalha com sinais temporais que possuem comprimentos da ordem de potência de base 2 (dois) mais próxima, ou seja,  $2^n = s$ , onde  $s$  é o comprimento total da série, e  $n$  é o número de frequências possíveis para a decomposição. A expressão matemática para a função de Haar é dada abaixo:

$$\Psi(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < 0.5 \\ -1, & 0.5 < t < 1, \\ 0 & \forall t \end{cases} \quad 3.9$$

e seu gráfico é mostrado na Figura 3.2.



**Figura 3.2:** Função ondaleta de Haar.

Para este trabalho a função de Ondaleta de Haar foi utilizada para filtragem das séries temporais em altas e baixas frequências, como utilizada por Bolzan (2005).

### 3.5 ESPECTRO GLOBAL DE ONDELETA (EGO)

A TO também permite fornecer a mesma informação da TF através da redução de uma de suas três dimensões, ou seja, se for retirado a variabilidade temporal de sua transformada, obtém-se o chamado Espectro Global de Ondaleta (EGO) (Global Spectral Wavelet – em inglês). O EGO é obtido através do cálculo da variância em cada período dada pela TO e tem como objetivo, identificar as componentes de frequências mais energéticas (TORRENCE e COMPO, 1998). Para isso, soma-se a energia associada em cada período da escala, de acordo com a equação:

$$M(a) = \int |W(a, t)|^2 dt \quad 3.10$$

### 3.6 ESPECTRO DE ONDELETA CRUZADA

Uma metodologia muito útil para averiguar o grau de relação entre dois sistemas físicos, é dada através de uma análise de correlação entre uma serie temporal de cada um destes sistemas, permitindo averiguar até que ponto dois processos físicos têm influência um sobre outro. Neste sentido, métodos como Correlação Cruzada (WEYNGAND et al., 2005), Espectro de Fourier Cruzado (CRANE, 2001), dentre outros, têm sido muito utilizados para tal objetivo em diversos campos de pesquisa. Entretanto, devido ao surgimento da Transformada em Ondeleta com suas características que permitem a análise em tempo-escala, tem se tornada muito apropriada para a análise de variabilidade temporal da correlação cruzada de duas séries temporais. Com isso, Grinsted et al. (2004) e Labat (2005) têm definido o chamado Espectro Cruzado de Ondeletas (ECO) de duas séries temporais  $x_n$  e  $y_n$  como sendo dado por:

$$ECO = \frac{|W_n^X(s)W_n^{Y*}(s)|}{|W_n^X(s)||W_n^Y(s)|}, \quad 3.11$$

onde  $W_n^X(s)$  e  $W_n^{Y*}(s)$  são as transformadas em ondeletas das séries temporais de  $x_n$  e  $y_n$ , respectivamente e  $*$  denota o complexo conjugado. Neste trabalho, devido a questão de rapidez computacional e estabilidade nos resultados, optou-se pela seguinte forma da equação (3.11):

$$ECO = \frac{|W_n^X(s)W_n^{Y*}(s)|}{\mathbf{S}_X \mathbf{S}_Y}, \quad 3.12$$

onde  $s_x$  e  $s_y$  são os respectivos desvios-padrões obtidos pela matriz dos coeficientes em ondeletas de ambas as séries temporais.

Em conclusão, a introdução do espectro cruzado da ondeleta permite uma rápida identificação do grau de correlação entre dois processos físicos em uma dada escala (LABAT, 2005).

### 3.7 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO

O fato de a Correlação Cruzada em Ondeleta permitir estudar a variabilidade temporal da correlação entre duas séries temporais, ainda não permite realizar uma análise de quais escalas (ou frequências) de cada série influencia nas demais. Este tipo de análise, realizada unicamente em uma série de cada vez, possibilita compreender em qual(is) escala(s) está(ão) ocorrendo a máxima correlação entre elas, ou seja, aonde está ocorrendo a maior parte da troca de energia entre elas. Em 1995, Katul e colaboradores (KATUL et al., 1995) desenvolveram uma metodologia para poder realizar tal análise aplicada a dados de turbulência HD com expressivo sucesso. Desde então, alguns trabalhos a têm aplicado em dados exclusivamente oriundos da turbulência HD (BOLZAN, 2002), sendo que alguns propuseram ligeiras modificações na metodologia inicial de Katul (OSBORNE et al, 2005). Por isso, este trabalho é o primeiro a utilizar esta metodologia em dados da turbulência MHD. Basicamente, esta metodologia propõe que, se há ausência de interação entre as grandes e pequenas escalas do movimento, o coeficiente de correlação ( $r_{(w,\Delta w)}$ ) será zero. Este coeficiente é matematicamente expresso por:

$$\mathbf{r}_{(w,\Delta w)} = \frac{\langle (w(x) - \langle w(x) \rangle) (\Delta w(x,r) - \langle \Delta w(x,r) \rangle) \rangle}{\mathbf{s}_w \mathbf{s}_{\Delta w}}, \quad 3.13$$

onde  $\mathbf{s}_w$  é o desvio padrão de qualquer variável  $w$  do escoamento, o termo  $(w(x) - \langle w(x) \rangle)$  representa as pequenas escalas e o termo  $(\Delta w(x,r) - \langle \Delta w(x,r) \rangle)$  representa as grandes escalas do escoamento. É importante salientar que a equação 3.13 é muito similar à equação utilizada por Osborne et al (2005). Além disso, para este trabalho o termo  $\Delta w(x,r) - \langle \Delta w(x,r) \rangle$  foi obtido através de decomposição por frequência utilizando, para isso, transformada de ondeleta de Haar.

No capítulo seguinte serão apresentados os resultados obtidos através da utilização das metodologias acima descritas. Procurar-se-á, na medida da conveniência, apresentar estes resultados nas mesmas seqüências que foram apresentadas as metodologias.

## **4. ANÁLISES DOS RESULTADOS**

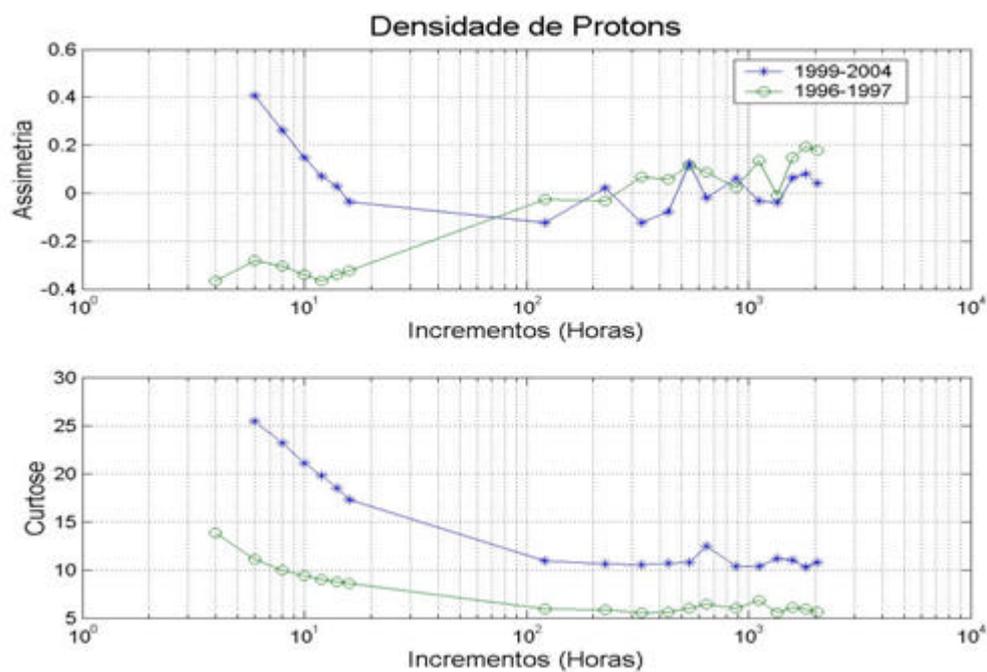
Para atender ao objetivo principal deste trabalho, que é o de compreender a influência do ciclo solar sobre as variáveis analisadas, se faz necessário estudar possíveis implicações em seus momentos estatísticos. A importância do estudo estatístico destas variáveis se deve ao fato de poder melhorar modelos de PDFs, principalmente modelos baseados na teoria da termoestatística generalizada (BURLAGA ; VIÑAS, 2004; BOLZAN et al., 2005b). Como foi mencionado no capítulo precedente, as ECs são fenômenos que podem ser caracterizadas através do cálculo do momento de terceira ordem. Fisicamente, a presença de gradientes de determinadas quantidades podem ser percebidas através do cálculo deste momento estatístico. Também, o momento estatístico de quarta ordem caracteriza o fenômeno da intermitência, como mencionado anteriormente. Por isso, na seção seguinte serão mostrados os resultados destes momentos estatísticos sobre o vento solar e densidade de prótons.

### **4.1 MOMENTO DE TERCEIRA E QUARTA ORDEM**

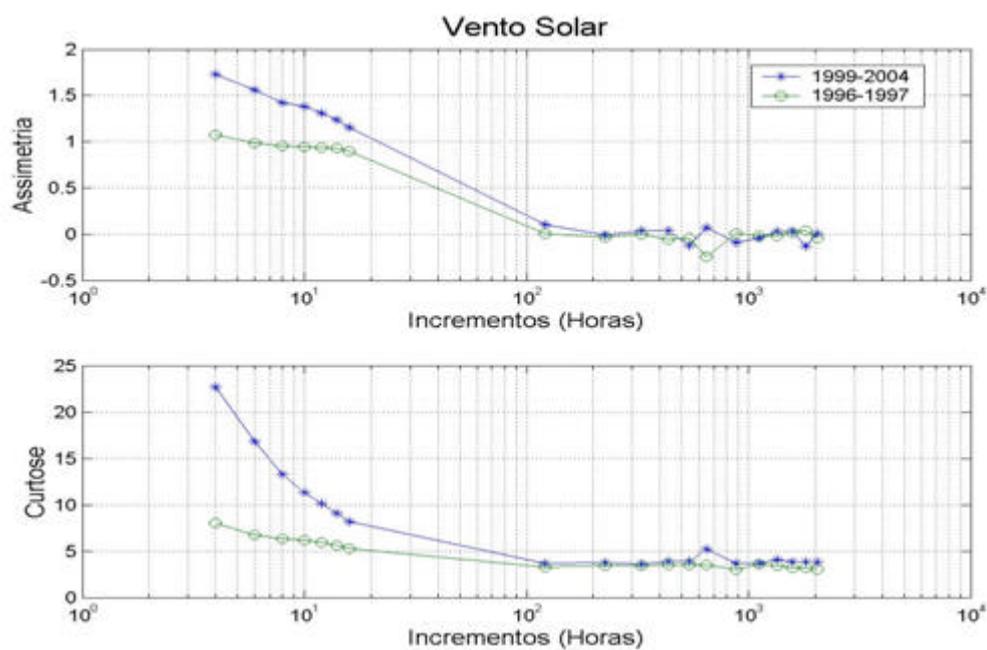
O procedimento utilizado para o cálculo dos momentos de terceira e quarta ordem foi o seguinte. Foram calculados ambos os momentos para as séries-temporais classificadas de acordo com o proposto no capítulo 1, quais sejam: ASB que representam os anos de 1996 e 1997 e; ASA e ASM que representam os anos de 1999 até 2004. Ambos os momentos foram calculados para incrementos de “r”, espaçamento entre pontos convertidos em horas, que foram 4; 6; 8; 10; 12; 14; 16; 121; 226; 331; 436; 541; 648; 881; 1114; 1347; 1580; 1813; 2047.

A Figura 4.1 mostra o resultado de ambos os momentos estatísticos para a densidade de prótons e para ambos os períodos de atividade solar. Em primeira análise, nota-se que para o período atividade solar alta e moderada houve um aumento nos valores de ambos os momentos estatísticos para as menores escalas. Para o coeficiente de assimetria nota-se que houve um aumento a partir da escala de 14 horas, aproximadamente, estendendo-se até a escala de 4 horas para ambos os períodos de atividade solar, porém, com mais intensidade para o período de atividade solar alta e moderada. Para a curtose, o aumento inicia-se a partir de 4 dias e estendendo-se até a escala de 4 horas onde, novamente, mais intenso para o período de atividade solar alta e moderada.

Para o vento solar, Figura 4.2, o comportamento é aproximadamente semelhante ao da densidade de prótons. Nota-se um aumento do coeficiente de assimetria na escala de 4 dias, um pouco antes do que para a densidade de prótons, estendendo-se até 4 horas para ambos os períodos de atividade solar. Entretanto, um aumento maior para o período de atividade solar alta e moderada. Um comportamento semelhante ocorre para a curtose, porém, mais acentuado para o período de atividade solar alta e moderada em relação ao coeficiente de assimetria.



**Figura 4.1:** Relação da Densidade de Prótons entre os períodos 1996 a 1997 e 1999 a 2004.



**Figura 4.2:** Relação da Velocidade do Vento Solar entre os períodos 1996 a 1997 e 1999 a 2004.

Os resultados acima estão em concordância com alguns resultados de Bruno et al. (2003) e Burlaga e Viñas (2004). Segundo Bruno et al. (2003), que estudaram o vento solar a 0.3 e 1 Unidade Astronômica (UA) afirmaram que a dependência radial da intermitência do vento solar pode ser compreendida como a ação de dois componentes principais, são eles: um componente representando as Estruturas Coerentes (ECs) que são estruturas que não são convectadas pelo vento e; uma componente que se propaga pelo escoamento, as flutuações estocásticas denominadas ondas de Alfvén. Assim, os resultados mostrados anteriormente mostraram que, para o período de elevada atividade solar, houve um aumento do coeficiente de assimetria, mostrando a presença das ECs e por conseqüência, o aumento da curtose, se comparado com o período de baixa atividade solar. Este resultado foi justamente obtido por Bruno et al. (2003) que afirmaram que, enquanto a primeira componente tende a aumentar o nível de intermitência, pela sua natureza coerente, a segunda tende a diminuí-la, dada a sua natureza estocástica.

A influência da atividade solar também foi confirmada por Burlaga e Viñas (2004), que estudaram apenas os dados de vento solar do ano de 1999. Segundo estes, a escala em torno de 4 horas representa os fenômenos típicos da turbulência intermitente tais como choques, interface entre escoamentos de diferentes velocidades presentes justamente no início do período de atividade solar alta. Também, estes fenômenos podem fortemente afetar ambos os parâmetros estatísticos, como mostraram estes resultados. É importante notar um aumento repentino na escala de 541 horas nos gráficos de curtose, que corresponde ao período de 23 dias aproximadamente, muito próximo ao período de rotação solar. Nesta escala ocorre uma mistura de diferentes tipos de escoamento e interações entre eles, segundo Burlaga e Viñas (2004).

Os resultados acima mostraram claramente a influência do período de atividade solar em ambas as variáveis analisadas. Com o objetivo de analisar a influência da atividade solar em

função do tempo e do período, se faz necessário recorrer à análise em tempo-escala propiciada pela Transformada em Ondeletas. Por isso, a seção seguinte será dedicada a este estudo.

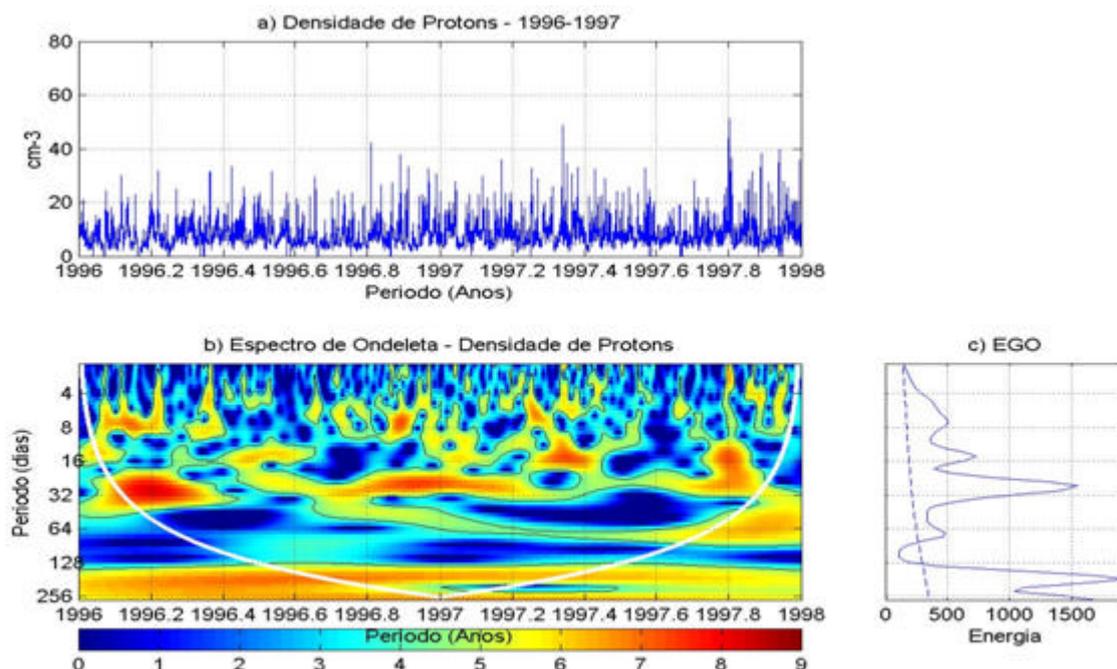
## **4.2 ESPECTRO GLOBAL DE ONDELETAS (EGO)**

As grandezas solares como o vento solar e densidade de prótons são variáveis que apresentam qualidades de séries-temporais não-estacionárias e por isso, sua estimação espectral através de ferramentas tradicionais como a Transformada de Fourier fica bastante comprometida. Devido a isso, vários autores buscaram uma forma de poder analisar seu espectro de energia através de uma visão dinâmica, ou seja, estudar seu espectro de energia em função do tempo de ocorrências destas. Uma ferramenta capaz de promover isso é dada pela Transformada em Ondeletas (TO). O uso da TO na sua forma contínua tem sido muito utilizada para estudo de fenômenos de multiescala, provocadas por tempestades magnéticas na magnetosfera terrestre (KOVACS et al.; 2001; LUI, 2002). A sua utilização para estudo de variáveis solares é recente, pois seu estudo coincide com a disponibilidade de plataformas espaciais. Entre estes estudos destacam-se os trabalhos de Bolzan (2005) e Bolzan et al. (2005b) que utilizaram séries-temporais de velocidade do vento solar. Seus estudos mostraram a relação tempo-frequência de um intenso distúrbio solar sobre esta variável ocorrida em julho de 2000. Entretanto, ainda não há estudos sistemáticos de como os distúrbios solares afetam esta variável e também a densidade de prótons, em função do ciclo solar. Por isso, o objetivo desta seção é averiguar como o ciclo solar se manifesta sobre estas variáveis e quais podem ser os períodos mais afetados.

Novamente, foi utilizado o mesmo critério para a classificação das variáveis solares. O primeiro processo foi aplicar a equação (3.10) para ambas as variáveis nos dois períodos de classificação. As Figuras 4.3 a 4.6 apresentam três gráficos distintos, cada um destes tem a

seguinte descrição: o gráfico superior mostra a série-temporal da variável estudada; o gráfico inferior à esquerda mostra o chamado periodograma em ondeleta que será detalhado posteriormente e o gráfico inferior a direita mostra o resultado da aplicação do Espectro Global em Ondeletas (EGO). O periodograma em ondeleta, citado anteriormente, representa o resultado da transformada em ondeleta aplicado à série-temporal onde: o eixo x é a escala temporal correspondente ao da série (em anos); o eixo y representa os períodos presentes na série; a escala de cores indica a energia associada a cada período da série. A linha branca contínua no periodograma é chamada cone de influência, ou seja, os períodos fora deste cone devem ser negligenciados por não possuírem uma confiança estatística adequada.

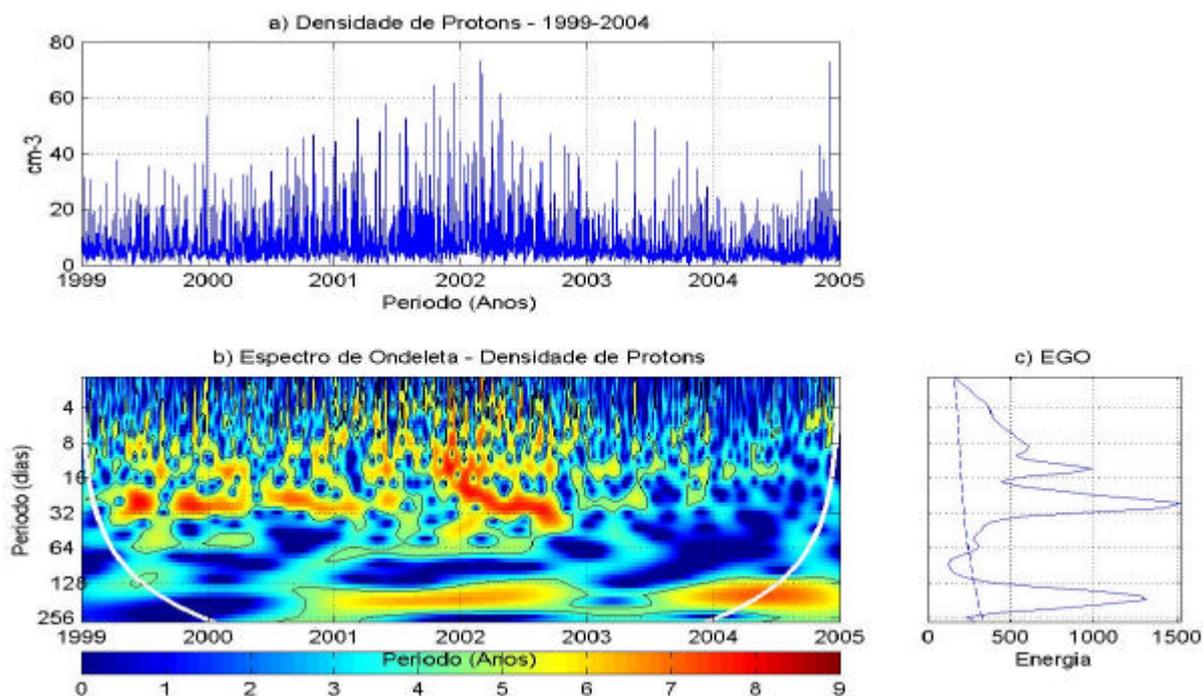
A Figura 4.3, é o resultado para a série-temporal da densidade de prótons para dois anos, de 1996 a 1997. Nota-se no gráfico superior desta figura um comportamento moderado da intensidade desta variável. O periodograma desta série-temporal mostra variações da energia nos principais períodos presentes onde, podem-se associar estas variações com eventos repentinos de aumento da densidade de prótons na série-temporal. Utilizando-se o EGO, nota-se a presença dos principais períodos, são eles: 9, 15, 27 e 150 dias.



**Figura 4.3:** Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtidos para os dados de densidade de prótons de 1996 a 1997.

Para averiguar a influência da atividade solar nestes períodos, foi aplicada a Transformada em Ondelelas para a mesma variável porém, para os anos de 1999 a 2004, a Figura 4.4 mostra o resultado. Nota-se, no gráfico superior, um aumento da intensidade da densidade de prótons em quase todos os anos, com mais ênfase nos anos de 2001 e 2002. Este aumento da intensidade é refletido no periodograma onde, observa-se claramente um aumento na energia correspondente nos principais períodos mencionados anteriormente, justamente nos anos de 2001 e 2002.

Com o objetivo de quantificar a influência da atividade solar nos períodos identificados acima, a Tabela 4.1 mostra os valores de energia para cada período e para os dois períodos de atividades solares (atividade solar baixa e alta/ moderada).



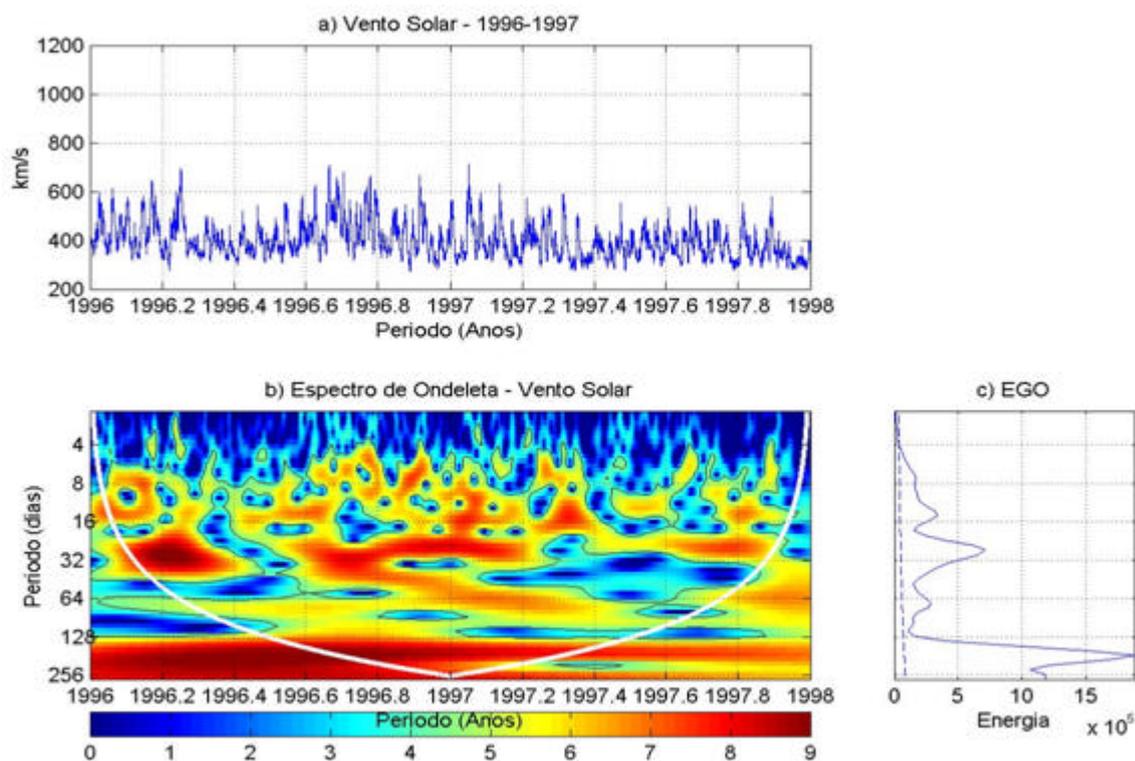
**Figura 4.4:** Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtido para os dados de densidade de prótons de 1999 a 2004.

**Tabela 4.1:** Valores de energia para cada período para os dois períodos de atividade solar. Resultados para a densidade de prótons.

Período (dias)	Energia	
	1996-1997	1999-2004
9	500	560
15	550	1000
27	1500	1500
150	2000	1300

Nota-se na tabela 4.1, para a densidade de prótons, um aumento da energia para os períodos menores de 27 dias, exceto para o período de 27 dias que manteve praticamente o

mesmo valor de energia. A questão agora é averiguar se este comportamento se reflete também para a velocidade do vento solar. Para isso, foi utilizada a mesma metodologia para esta variável. A Figura 4.5 mostra o resultado para o vento solar em dois anos, de 1996 a 1997. O gráfico superior mostra o comportamento desta variável com um valor médio em torno de 500 km/s, valor típico de velocidade para um período de baixa atividade solar (HARGREAVES, 1992). No gráfico do periodograma, também nota-se características intermitentes para a distribuição de energia ao longo de cada período, os mesmos períodos encontrados para a densidade de prótons.

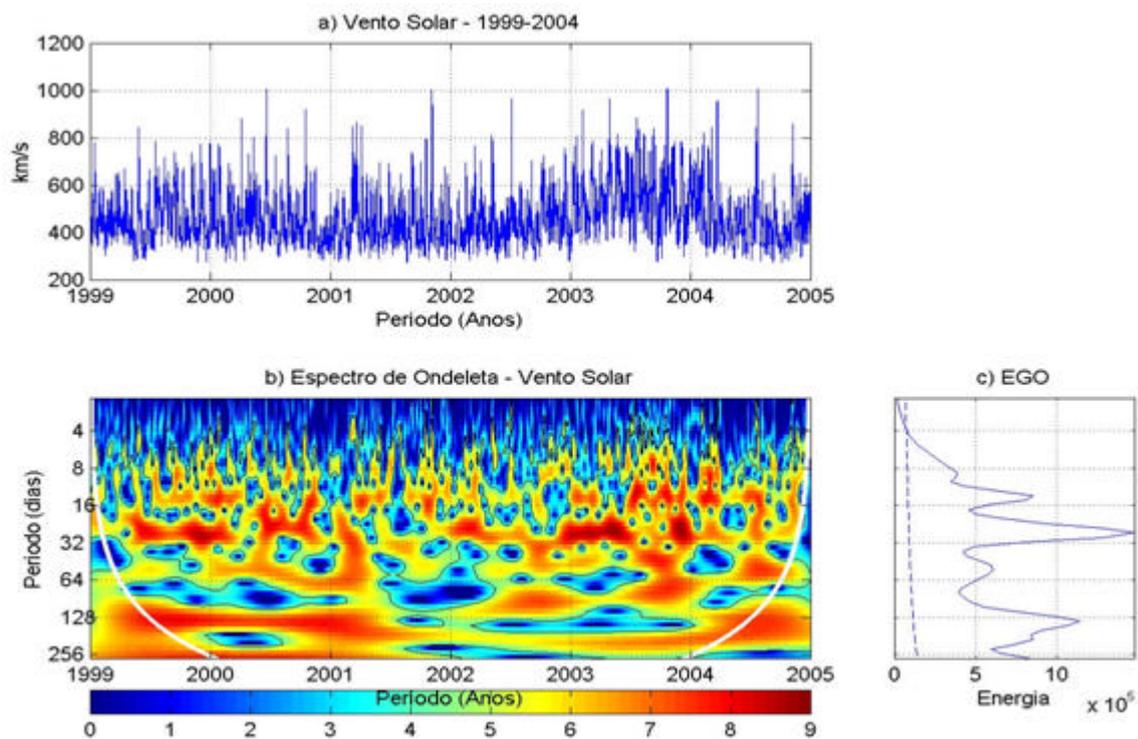


**Figura 4.5:** Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtido para os dados de velocidade do vento solar de 1996 a 1997.

A Figura 4.6 mostra o resultado para o vento solar para os anos de 1999 a 2004. Nota-se, no gráfico superior, um aumento na magnitude da velocidade para um valor médio em torno de

900 km/s, mostrando justamente a influência do período de atividade solar. O periodograma mostra a distribuição intermitente de energia também nos principais períodos. Para poder averiguar a possível influência da atividade solar sobre esta variável, a Tabela 4.2 relaciona cada período com a energia de cada um dos dois períodos de atividade solar. Nota-se que o resultado desta variável é distinto do comportamento da densidade de prótons, ou seja, houve um significativo aumento da intensidade de energia para todos os períodos (exceto para o período de 150 dias).

É interessante notar que, para ambas as variáveis, o período de 150 dias sofreu uma diminuição de sua energia para o período de maior atividade solar. Estudos iniciais reportaram a existência deste período de 150 dias (WOLFF, 1992; RICHARDSON e CANE, 2005). Segundo Richardson e Cane (2005), este período seria na realidade um “quase-período”, presente somente intermitentemente durante três anos ao redor do ciclo solar máximo de número 23. Além disso, afirmaram que este quase-período estaria associado a eventos de partículas energéticas em regiões organizadas da superfície solar. Este resultado é confirmado pelos resultados apresentados até o momento, principalmente a forte presença deste período de 150 dias na Figura 4.6, durante os meses de outubro e novembro de 2003 que corresponde a um forte distúrbio solar também reportado por Richardson e Cane (2005) e, durante os períodos de janeiro a março de 2001 e de janeiro a março de 2002 (relacionados ao período de atividade solar alta).



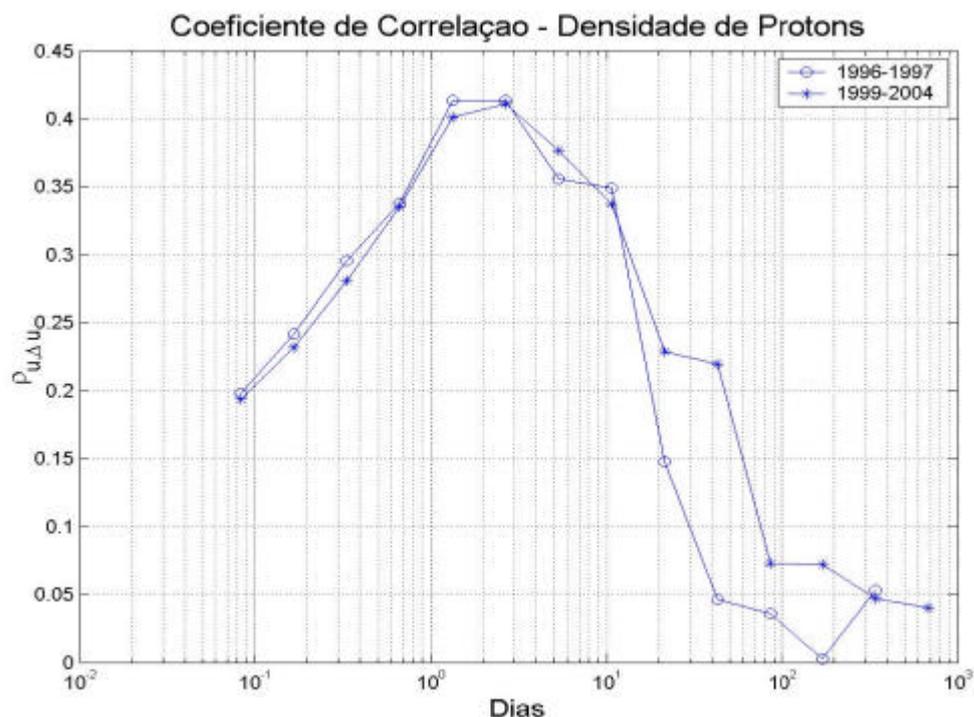
**Figura 4.6:** Série temporal (acima), periodograma (abaixo) e EGO (direita) obtido para os dados de velocidade do vento solar de 1999 a 2004.

**Tabela 4.2:** Valores de energia para cada período para os dois períodos de atividade solar. Resultados para o vento solar.

Período (dias)	Energia	
	1996-1997	1999-2004
9	$2 \times 10^3$	$4 \times 10^3$
15	$4 \times 10^5$	$8 \times 10^5$
27	$7 \times 10^5$	$15 \times 10^5$
150	$20 \times 10^5$	$8 \times 10^5$

### 4.3 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO

A ausência de interação entre os movimentos das grandes e pequenas escalas é necessária para que  $r_{(w,\Delta w)}$  seja zero. A Figura 4.7 nos mostra o resultado do coeficiente de correlação da densidade de prótons para ambas as condições de atividade solar, baixa e alta/ moderada. Nota-se que há um máximo de correlação entre os períodos de 1 a 3 dias, decaindo rápido posteriormente. É importante salientar que, para períodos superiores a 10 dias, não há como interpretar os resultados já que os valores do coeficiente são inferiores a 0.25. Também, nota-se que os valores do coeficiente para ambas as condições de atividade solar no período de 9 dias são praticamente iguais, corroborando com o resultado sumarizado na Tabela 4.1, onde para o mesmo período de 9 dias não houve uma mudança significativa na energia de um período de atividade solar para o outro. Além disso, tal comportamento pode estar associado com a peculiaridade desta variável onde, de acordo com Warhaft (2000), existe clara distinção entre variáveis denominadas de vetoriais, como velocidade, e escalares, como temperatura e densidade. Portanto, este resultado pode estar mostrando que, para a turbulência MHD, isto pode ocorrer em pelo menos determinadas escalas.

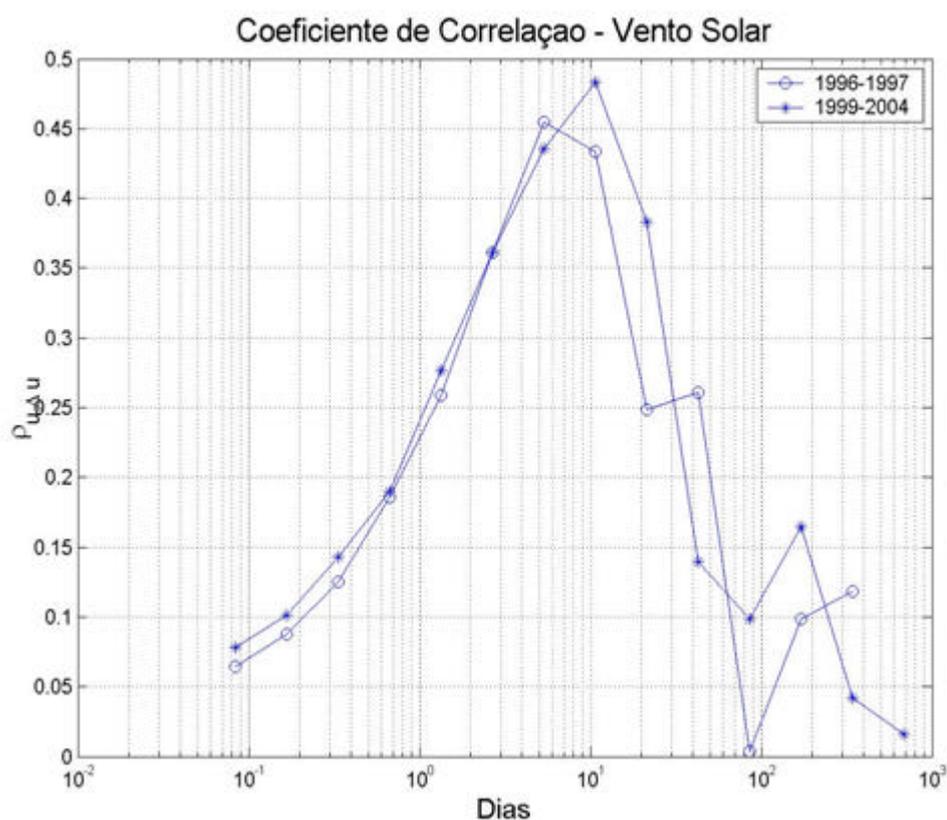


**Figura 4.7:** Coeficiente de Correlação calculado para a densidade de prótons para o período de 1996 a 1997 e 1999 a 2004.

A Figura 4.8 mostra o resultado do coeficiente de correlação para o vento solar nas duas condições de atividade solar. Nota-se, em primeira análise, que ocorre um máximo de correlação entre os períodos 5 a 10 dias, ligeiramente deslocado se comparado com os resultados obtidos para a densidade de prótons. Além disso, observa-se que o período de atividade solar alta e moderada teve a maior correlação e no período de 10 dias, fato este não visto para a densidade de prótons. Este comportamento também está de acordo com os resultados do EGO observado na Tabela 4.2 onde, para os três períodos observados, houve um aumento de energia do período de atividade solar baixa para o período de atividade solar alta e moderada.

Os resultados obtidos acima mostraram dois fatos importantes, são eles: primeiro, há uma distinção clara entre o comportamento de ambas as variáveis, mostrando peculiares características de cada uma delas; segundo, por conta do primeiro fato importante, a atividade

solar alta e moderada é sentida pelo vento solar em períodos entre 5 a 10 dias. Embora se tenha obtido uma distinção entre ambas as variáveis no sentido de máxima correlação em períodos distintos, ainda não está clara uma possível relação entre ambas as variáveis e se existe, em quais períodos estas têm correlação. Por isso, o objetivo da seção seguinte é verificar as possíveis relações entre ambas as variáveis e em quais escalas isso ocorre. Para atender a este objetivo, é proposta uma análise através do Espectro Cruzado em Ondeleta de ambas as variáveis.



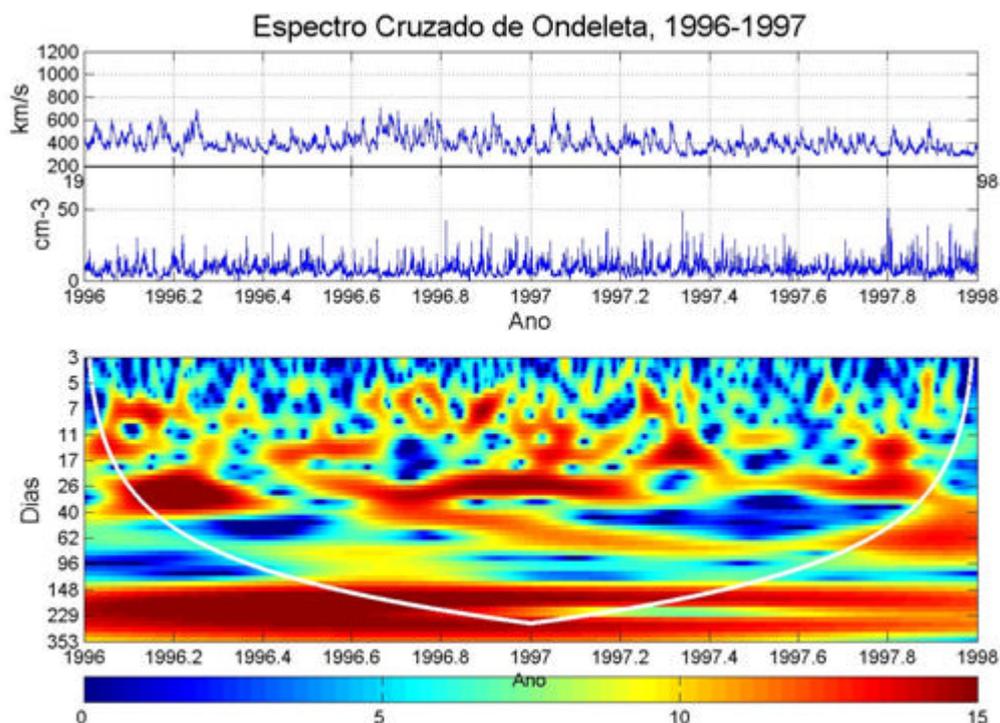
**Figura 4.8:** Coeficiente de Correlação calculado para a velocidade do vento solar para o período de 1996 a 1997 e 1999 a 2004.

#### 4.4 ESPECTRO CRUZADO EM ONDELETAS (ECO)

Os resultados anteriores mostraram algumas importantes diferenças entre ambas as variáveis. Entretanto, não deu informação se há ou não alguma correlação entre elas e se há, como isso ocorre e em quais escalas. Por isso, para analisar este problema será utilizado uma abordagem robusta dada pelo Espectro Cruzado em Ondeletas (ECO). Este método ainda tem sido pouco explorado, principalmente na área de Geofísica Espacial. Grinsted et. al. (2004), utilizando dados climatológicos, conseguiram relacionar duas séries temporais através desta metodologia.

Este estudo do ECO foi realizado também nas mesmas situações distintas anteriormente utilizadas, são elas: atividade solar baixa que compreende os anos de 1996 e 1997 e atividade solar alta e moderada que corresponde aos anos de 1999 a 2004. Para essa análise será utilizado o periodograma do ECO que possui as mesmas características do periodograma em ondeleta comum, ou seja, o eixo x denota-se a escala temporal em anos, 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.

Analisando o período de atividade solar baixa, nota-se forte correlação entre ambas as variáveis no intervalo do período de 25 a 40 dias, aproximadamente, além de correlações esporádicas nos demais períodos, como mostrado na Figura 4.9. Este fato mostra que, devido a poucos eventos de distúrbios solares, a correlação entre ambas ocorre majoritariamente no intervalo citado acima que corresponde ao período de rotação solar. Deve se levar em conta ainda o aparecimento de poucas correlações por volta de 13 dias, isso está relacionado com o período de meia rotação solar.



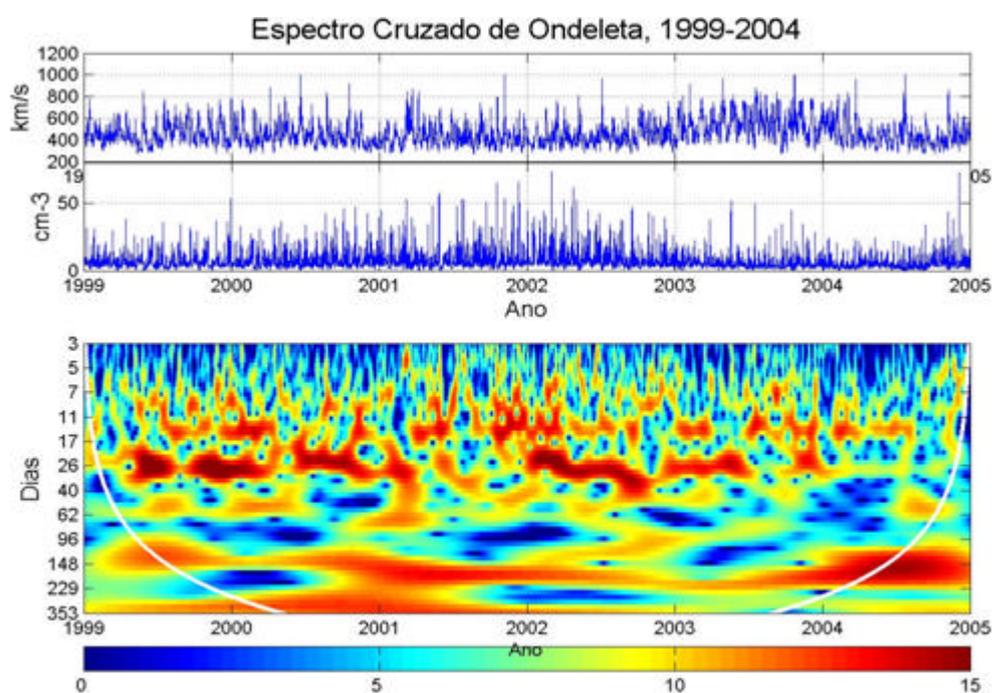
**Figura 4.9:** Os dois gráficos superiores mostram a série temporal da velocidade do vento solar e densidade de prótons, respectivamente e; o gráfico inferior mostra o periodograma do Espectro Cruzado de Ondelela (ECO), para o período 1996 a 1997.

Para o período de atividade solar alta e moderada, pode-se também verificar a presença de forte correlação entre ambas as variáveis no intervalo do período de 25 a 40 dias, como mostrado na Figura 4.10, e esporadicamente em determinados períodos menores. Além da correlação presente no período de 25 a 40 dias, nota-se ainda uma forte correlação na escala de 150 dias com duração entre o fim do ano 2000 e início de 2002, como observado na Figura 4.10. Esta correlação nesta escala foi possível dada ao comprimento temporal maior, propiciando uma confiança estatística nesta escala, onde tal fato não foi possível para o período de atividade solar baixa.

O fato de observar uma forte correlação entre ambas as variáveis no intervalo de 25 a 40 dias para ambos os períodos de atividade solar, pode ser interpretada como uma manifestação de

estruturas coerentes neste que, de acordo com Robinson (1991), tais estruturas podem ser descritas, como eventos onde uma variável tem forte correlação consigo mesma ou com outras, no presente caso, uma variável (o vento solar) tem forte correlação com outra variável (a densidade de prótons).

Os resultados acima mostraram forte correlação entre ambas as variáveis no intervalo de 25 a 40 dias, entretanto, não é visível uma diferença significativa entre as Figuras 4.9 e 4.10, ou seja, não se podem observar uma distinção clara entre ambos os períodos de atividade solar na correlação das variáveis. Por isso, a próxima seção tem por objetivo estudar especificamente a influência das estruturas coerentes na região de baixas e altas frequências, separadamente e em função do período de atividade solar.



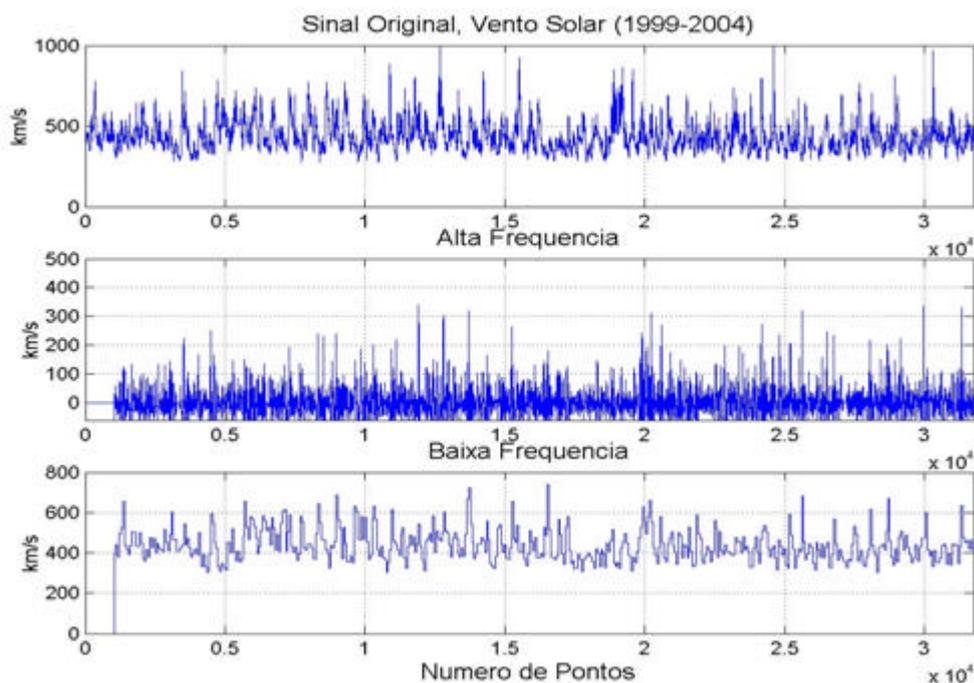
**Figura 4.10:** Os dois gráficos superiores mostram a série temporal da velocidade do vento solar e densidade de prótons, respectivamente e; o gráfico inferior mostra o periodograma do Espectro Cruzado de Ondeleta (ECO), para o período de 1999 a 2004.

#### **4.5 INFLUÊNCIA DAS ECS E INTERMITÊNCIA NAS ALTAS E BAIXAS FREQUÊNCIAS**

A importância do estudo de fenômenos de baixa frequência tem sido avaliada recentemente, para análise das consequências destas sobre a magnetosfera terrestre. Kovács et. al. (2001) realizaram um estudo mostrando em quais condições a magnetosfera terrestre não se comporta como um filtro passa-baixa. Recentemente, Bolzan (2005), utilizando uma série temporal anual de 2000 de velocidade do vento solar, a decompôs em duas componentes: uma obtida através da filtragem passa-baixa (PB) e uma outra através de filtragem passa-alta (PA). Em seguida, foi realizada uma análise dos coeficientes de assimetria e dos coeficientes de achatamento, para ambas as componentes e também da série temporal original e para vários valores de incremento  $r$ . Os resultados mostraram que a componente PB possuía os maiores valores de intermitência e de estruturas coerentes em quase todos os incrementos  $r$ , concluindo que esta componente é predominante nos processos de ECs. Entretanto, não foi realizado um estudo sobre como isso varia em função do ciclo solar e como a densidade de prótons se comportaria se realizado o mesmo procedimento. Por isso, dado essa importância será realizado um estudo sobre quais componentes PB ou PA tem predominância sobre as variáveis solares aqui analisadas, por consequência, poder analisar em quais dessas componentes há o predomínio de fenômenos intermitentes e estruturas coerentes.

O procedimento adotado neste trabalho foi o mesmo do trabalho de Bolzan (2005), ou seja, foi utilizada a TO de Haar para filtrar e separar as séries temporais de ambas as variáveis nas duas componentes, PB e PA e finalmente calcular a assimetria e curtose para vários valores de incremento  $r$ . Este processo de decomposição das séries temporais é mostrado na Figura 4.12 como exemplo. Nota-se que a componente de PB possui o envelope da série original. A

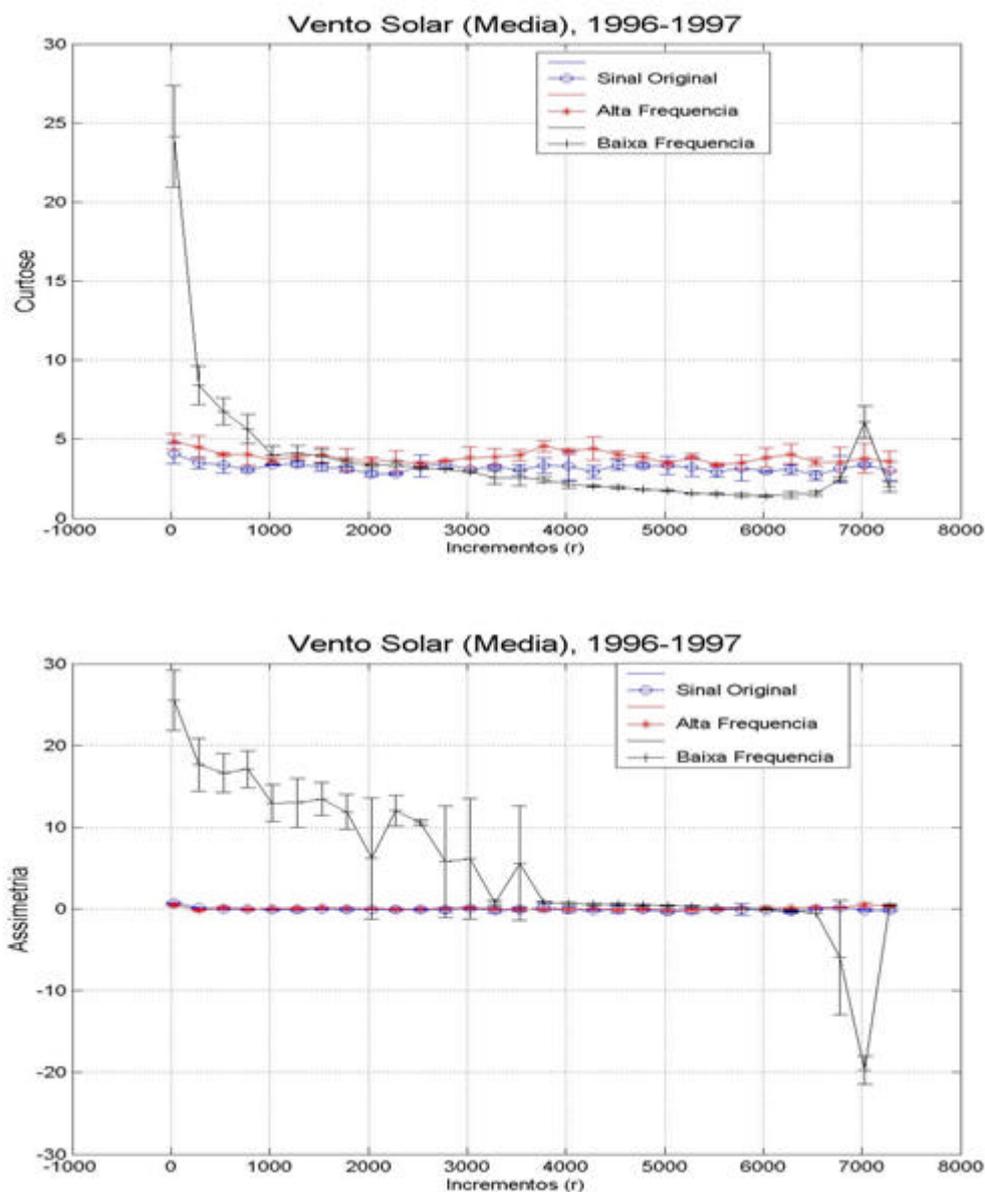
frequência de corte utilizada ficou em  $2.17 \times 10^{-6}$  Hz, que foi escolhida apenas através da visualização de todas as frequências presente nas séries temporais.



**Figura 4.11:** Sinal original (gráfico superior), componente filtrada passa-alta (gráfico do meio) e componente filtrada passa-baixa (gráfico inferior). Referente a uma série temporal da velocidade do vento Solar para o período de 1999 a 2004.

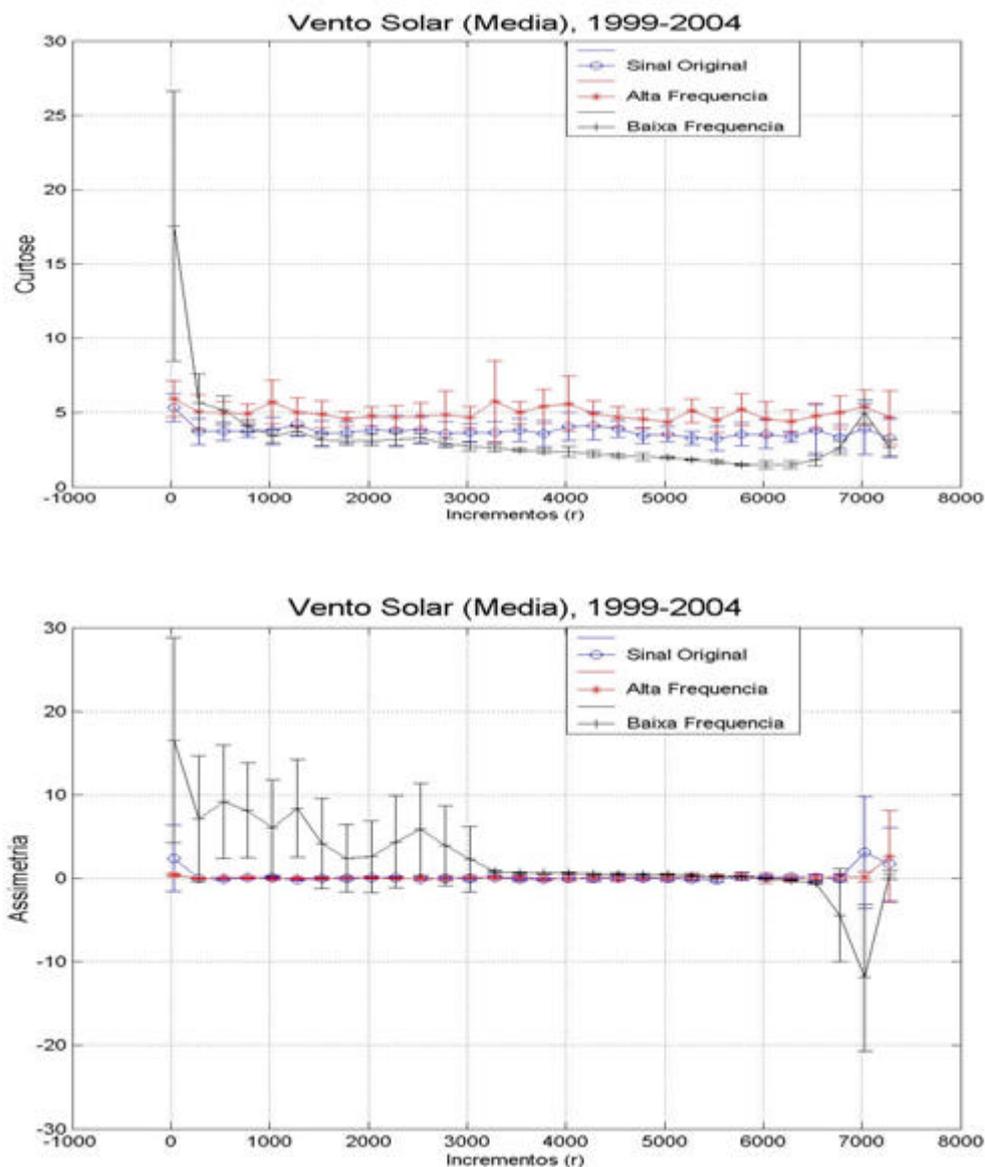
A Figura 4.12 mostra os resultados do coeficiente de assimetria e curtose para a série de vento solar do período ASB. Nota-se no gráfico superior desta figura, referente aos resultados da curtose que ambas componentes e a série original têm um comportamento aproximadamente auto-similar entre  $1000 < r < 6000$ , ou seja, os valores da curtose constantes com o incremento  $r$ . Entretanto, o resultado importante é a elevada curtose para  $r < 1000$  na componente PB em relação às outras duas. Isto confirma o resultado de Bolzan (2005), mostrando que esta componente sofre importante contribuição de fenômenos intermitentes. No gráfico inferior da mesma figura, referente aos valores do coeficiente de assimetria, observa-se que a componente

PB possui também elevados valores em relação às demais componentes (PA e original). Tal comportamento reflete o fato da presença de ECs nesta componente PB e que estas ECs contribuem para a presença de intermitência, confirmando os resultados de Bolzan (2005).



**Figura 4.12:** Curtose (gráfico superior) e Coeficiente de Assimetria (gráfico inferior) da Alta e Baixa Frequência do Vento Solar para o período de 1996 a 1997.

A Figura 4.13 mostra os resultados da assimetria e curtoses para a velocidade do vento solar, mas para o período ASA e ASM. A curtose, de maneira geral, apresentou o mesmo comportamento do anterior, exceto que o máximo valor da curtose da componente PB para  $r \rightarrow 0$  foi menor. Além disso, o coeficiente de assimetria não teve um comportamento muito distinto do anterior. De qualquer maneira, a influência da atividade solar não foi suficiente para se ter um quadro físico que pudesse ser desenhado. Em outras palavras, as características dos dois coeficientes estatísticos para as componentes PB e PA da velocidade do vento solar não mostraram influência do período de atividade solar, exceto a própria série temporal original que teve mudança significativa entre os dois períodos para  $r \rightarrow 0$ , refletindo os resultados anteriores para o coeficiente de correlação.

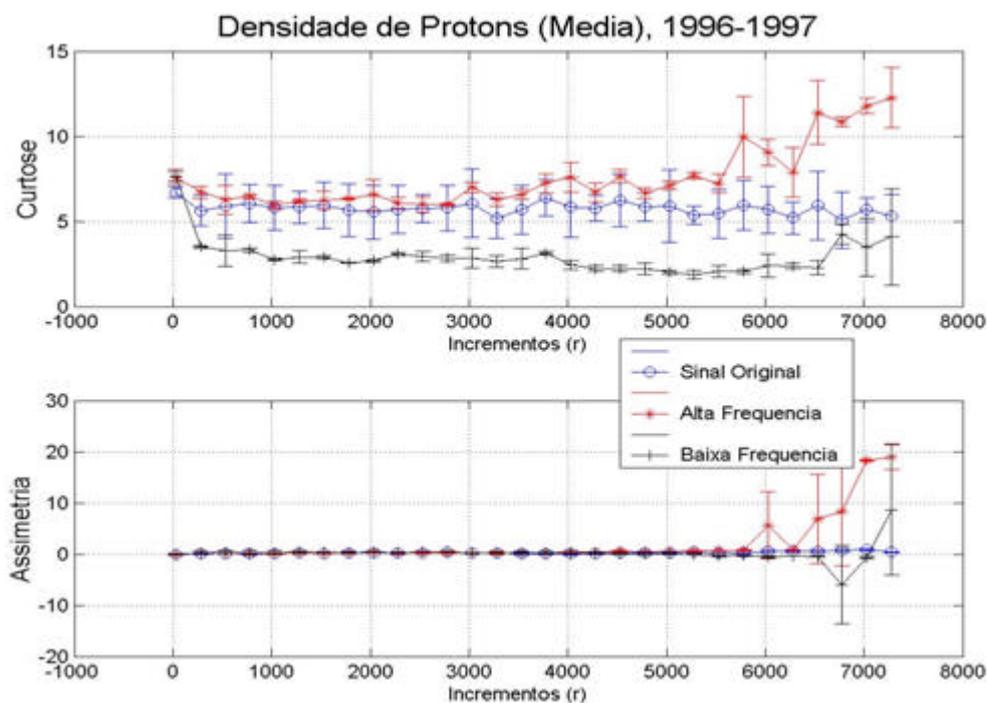


**Figura 4.13:** Curtose (gráfico superior) e Coeficiente de Assimetria (gráfico inferior) e da Alta e Baixa Frequência do Vento Solar para o período de 1999 a 2004.

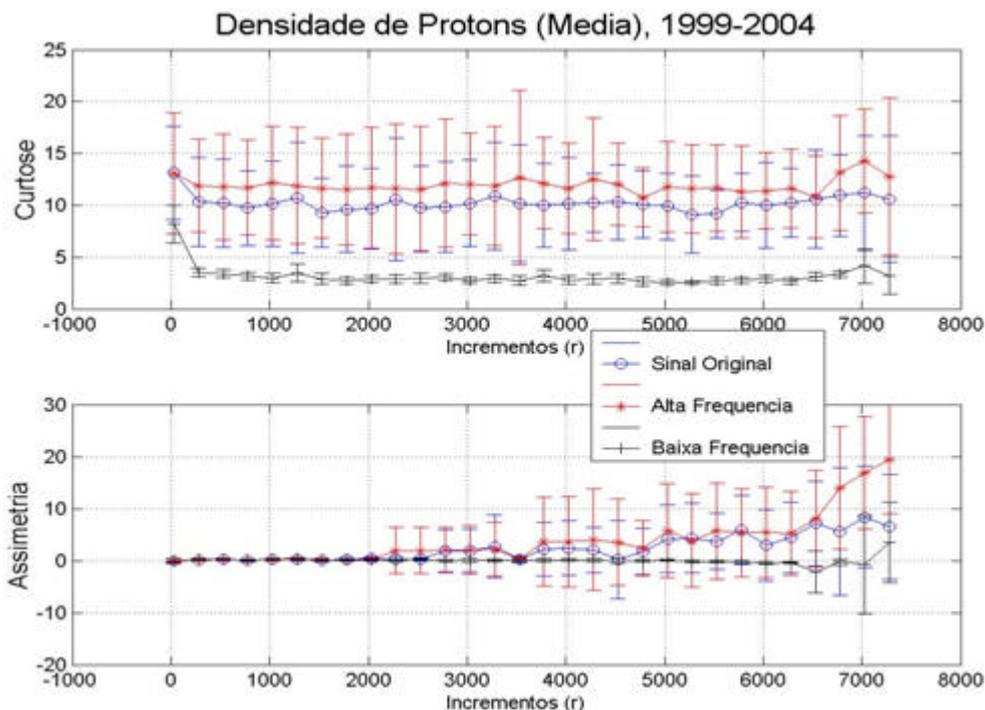
Analisando agora a densidade de prótons para o período de atividade solar baixa, observam-se na Figura 4.14 os seguintes resultados. Primeiro, as duas componentes filtradas e a série temporal original, têm um comportamento aproximadamente auto-similar para valores de incrementos entre  $1000 < r < 6000$ , semelhantemente ao encontrado para o vento solar. Segundo, a componente PB apresentou um comportamento sub-gaussiano em quase todo o intervalo de  $r$

mencionado anteriormente. Finalmente o terceiro resultado, as três séries temporais apresentaram assimetria somente para incrementos elevados, conforme mostrado no gráfico inferior da Figura 4.13.

Antes de analisar os resultados acima, é conveniente averiguar qual é o comportamento desta variável sobre o período de atividade solar alta e moderada. A Figura 4.14 mostra os resultados para a curtose (gráfico superior) e assimetria (gráfico inferior). De uma maneira geral, o resultado tanto da curtose como para o coeficiente de assimetria é muito semelhante ao caso do período de atividade solar baixa, não havendo significativas mudanças em quase todo o intervalo de incrementos utilizados. A exceção fica no aumento da variabilidade do coeficiente de assimetria neste período de atividade solar alta e moderada, podendo estar refletindo o aumento de estruturas coerentes no escoamento justamente devido ao aumento de distúrbios solares.



**Figura 4.14:** Coeficiente de Assimetria e Curtose da Alta e Baixa Frequência da Densidade de Prótons para o período de 1996 a 1997.



**Figura 4.15:** Coeficiente de Assimetria e Curtose da Alta e Baixa Frequência da Densidade de Prótons para o período de 1999 a 2004.

Os resultados acima, generalizando os resultados obtidos por Bolzan (2005), mostram um comportamento distinto para ambas as variáveis estudadas, mesmo que esta abordagem tenha sido simples no sentido de se utilizar apenas o processo de filtragem nas séries temporais e posterior cálculo dos dois momentos estatísticos. Por isso, estes resultados tornaram-se importantes na medida em que procuraram estudar uma questão física ainda muito pouco estudada, não somente na turbulência hidrodinâmica, já mencionado por Warhaft (2000), como também na turbulência magnetohidrodinâmica, permitindo confirmar que estas diferenças estão associadas à natureza específica de cada uma delas, de acordo com Warhaft (2000).

Sendo este assunto o último deste trabalho, serão feitos no próximo capítulo uma compilação dos principais resultados obtidos até aqui.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo, investigar como as propriedades estatísticas de duas variáveis solares sofrem a influência do período de atividade solar. Para tal, foram obtidas séries temporais de velocidade do vento solar e densidade de prótons do período de 1996 até 2004, excetuado o ano de 1998, e submetidas a algumas técnicas estatísticas. Além disso, a transformada em ondeletas foi utilizada não somente como uma ferramenta de apoio para as técnicas estatísticas, mas principalmente para permitir compreender e corroborar os resultados das análises anteriores, pois, como descrito nos capítulos precedentes, a presença da intermitência e das chamadas Estruturas Coerentes introduzem a questão da não-estacionaridade nas séries temporais estudadas, impossibilitando assim as análises através de ferramentas tradicionais como a Transformada de Fourier, daí a necessidade de se utilizar a TO. Portanto, com o intuito de atender ao objetivo deste trabalho, se faz necessário estudar possíveis implicações em seus momentos estatísticos. A importância do estudo estatístico destas variáveis se deve ao fato de poder melhorar modelos de PDFs, principalmente modelos baseados na teoria da termoestatística generalizada (BURLAGA; VIÑAS, 2004; BOLZAN et al., 2005b).

Para melhor análise dos resultados aqui obtidos, serão sumarizados a seguir os principais pontos deste trabalho:

1. O primeiro resultado obtido foi que, para ambas as variáveis, os dois momentos estatísticos (coeficiente de assimetria e achatamento) sofreram importante aumento em seus valores em direção as menores escalas para o período de atividade solar alta e moderada, se comparado com a atividade baixa. Estes resultados estão em concordância

com alguns resultados de Bruno et al. (2003) e Burlaga e Viñas (2004). Segundo Bruno et al. (2003), que estudaram o vento solar a 0.3 e 1 UA, a dependência radial da intermitência do vento solar pode ser compreendida como a ação de dois componentes principais, são eles: um componente representando as Estruturas Coerentes (ECs) que são estruturas que não são convectadas pelo vento e; uma componente que se propaga pelo escoamento, as flutuações estocásticas denominadas ondas de Alfvén. Assim, os resultados mostrados anteriormente mostraram que, para o período de atividade solar alta e moderada, houve um aumento do coeficiente de assimetria, mostrando um aumento na presença das ECs e por consequência, o aumento da curtose, se comparado com o período de atividade solar baixa. Este resultado foi justamente obtido por Bruno et al. (2003) que afirmaram que, enquanto a primeira componente tende a aumentar o nível de intermitência, pela sua natureza coerente, a segunda tende a diminuí-la, dada a sua natureza estocástica;

2. No estudo da variabilidade do espectro de ambas as variáveis, utilizando para isso o EGO, mostraram também a influencia da atividade solar nestas. Para a densidade de prótons pôde-se notar um aumento da energia nos períodos menores de 27 dias, excetuando o próprio período de 27 dias que se manteve praticamente constante e uma diminuição de energia para o período de 150 dias. Estes resultados diferiram em um único ponto dos resultados para o vento solar, ou seja, todos os períodos analisados tiveram também um aumento de energia, com a única diferença que o período de 27 dias sofreu um aumento significativo na intensidade de energia, em torno de aproximadamente 50%. Esta diferença é interessante, pois é o primeiro ponto que reflete as peculiaridades entre ambas as variáveis. Além disso, foi interessante notar que, para ambas as variáveis, o período de

150 dias sofreu uma diminuição de sua energia para o período de atividade solar alta e moderada. Estudos iniciais reportaram a existência deste período de 150 dias (WOLFF, 1992; RICHARDSON; CANE, 2005). Segundo Richardson e Cane (2005), este período seria na realidade um “quase-período”, presente somente intermitentemente durante três anos ao redor do ciclo solar máximo de número 23;

3. O aspecto levantado anteriormente, referente à diferença entre ambas as variáveis no período de 27 dias, também foi notado no estudo do coeficiente de correlação entre as grandes e pequenas escalas,  $r_{(w,\Delta w)}$ . Neste estudo notou-se um máximo de correlação entre os períodos de 1 a 3 dias para a densidade de prótons e entre 5 a 10 dias para a velocidade do vento solar. Além disso, apenas o vento solar foi sensível ao ciclo solar, corroborando o fato do item anterior mostrando a diferença entre ambas as variáveis. Novamente, esta nova diferença encontrada aqui entre ambas as variáveis revela que esta distinção pode estar associada com características próprias como duas grandezas distintas, uma é grandeza vetorial e a outra é uma grandeza escalar, como já mencionado por Warhaft (2000). Portanto, este resultado pode estar mostrando que para a turbulência MHD estas diferenças podem ocorrer e em pelo menos algumas determinadas escalas, como obtidos neste e no item anterior;
  
4. Os resultados obtidos através do coeficiente de correlação mostraram que há uma distinção entre o comportamento de ambas as variáveis. Entretanto, ainda não está clara uma possível relação entre ambas as variáveis e se existe, em quais períodos estas têm correlação. Por isso, com o objetivo de verificar as possíveis relações entre ambas as

variáveis e em quais escalas isso ocorre, foi realizada uma análise através do Espectro Cruzado em Ondeleta (ECO) de ambas as variáveis. Os resultados mostraram uma forte correlação entre ambas as variáveis no intervalo de 25 a 40 dias, sem uma distinção clara para ambos os períodos de atividade solar;

5. A correlação forte entre as variáveis no intervalo de 25 a 40 dias, pode estar revelando a importância de fenômenos de grande escala no escoamento turbulento que segundo Sarafopoulos (2005), a magnetosfera terrestre pode reagir a fenômenos de grande escala dentro de condições específicas. Dada à importância destes fenômenos, foram calculados os momentos estatísticos nas séries temporais filtrados Passa-Alta (PA) e Passa-Baixa (PB) além das séries originais de ambas as variáveis solares. O resultado mais importante ocorreu para o vento solar, ou seja, apresentaram elevados valores da curtose para  $r < 1000$  na componente PB em relação às outras duas, confirmando o resultado de Bolzan (2005). Além disso, os valores do coeficiente de assimetria sofreram aumentos também para a componente PB. Tal comportamento reflete o fato da presença de ECs nesta componente PB e que estas contribuem de algum modo para a intermitência. Estes resultados também foram observados para os dois períodos de atividade solar, porém, em menor intensidade no período ASA e ASM para ambos os momentos estatísticos. Este resultado para o vento solar não foi encontrado para a densidade de prótons em nenhuma das duas condições de atividade solar, revelando outra importante diferença entre ambas as variáveis solares.

Embora alguns trabalhos mencionem que a atividade solar afeta estatisticamente as variáveis solares (BURLAGA ; VIÑAS, 2004; BOLZAN et al., 2005b; MOUSSAS et al., 2005),

os resultados deste trabalho, sumarizados em cinco principais pontos, possibilitaram não somente qualificar quais escalas são mais expostas a influência da atividade solar, mas principalmente revelarem que esta influência se dá de maneira distinta para cada uma das variáveis solares. Mesmo que as abordagens utilizadas neste trabalho para o estudo das diferenças entre as variáveis solares tenham sido muito simples, o que implica a não averiguação do problema em seu cerne, seus resultados tornaram-se importantes na medida em que procuraram entender uma questão física ainda muito pouco estudada, não somente na turbulência hidrodinâmica, já mencionado por Warhaft (2000), como também na turbulência magnetohidrodinâmica, permitindo confirmar que estas diferenças estão associadas à natureza específica de cada uma delas, de acordo com Warhaft (2000).

Este assunto da especificidade de cada uma das grandezas solares, portanto torna-se importante porque permite caracterizar melhor como as estruturas coerentes e os fenômenos intermitentes se processam em função do ciclo solar, permitindo melhorar suas características em modelos estatísticos da turbulência magnetohidrodinâmica como já efetuados por Burlaga e Viñas (2004) e Bolzan et al. (2005 a e b). Portanto, cabem aqui algumas sugestões de trabalhos futuros sumarizados a seguir:

- Ampliar a base de dados que permitem abordar não somente ciclos solares completos, mas também, de pelo menos dois ciclos solares. Tal procedimento poderá dar uma confiança estatística melhor para os resultados aqui obtidos;
- Utilizar metodologias que envolvam o estudo da dinâmica caótica para assim, permitir ter uma visão estatística dos fenômenos presentes neste tipo de turbulência. Poderia ser explorado como o espectro multifractal comporta-se em função do ciclo solar;

- Desenvolver uma metodologia para a interpolação de falhas em séries temporais que possuam elevada correlação, como as presentes séries utilizadas neste trabalho. Como exemplo, poderia ser implementada, testada e utilizada a interpolação de Neville.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSELMET, F; GAGNE, Y; HOPFINGER E. J., et al. High-Order Velocity Structure Functions in Turbulent Shear Flows. **Journal of Fluid Mechanics**. v.140, p. 63-89, Mar 1984.

ANTONIA, R. A.; CHAMBERS, A. J.; BRADLEY, E. F. Temperature structure in the atmospheric surface layer. L. The budget of mean cube fluctuations. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 20, n. 3, p. 293-307, May 1981.

ANTONIA, R. A.; HOPFINGER, E. J.; GAGNE, Y; ANSELMET, F. Temperature structure functions in turbulent shear flows. **Physical Review A**. v.30, n.5, p. 2704-2707, Nov. 1984.

BECK, C., Application of generalized thermostatics to fully developed turbulence. **Physica A**. v. 277, p.115-123, 2000.

BISKAMP, D.; MÜLLER, W. C. Scaling properties of three-dimensional isotropic magnetohydrodynamic turbulence. **Physics of Plasmas**. v. 7, n. 12, p. 4889-4900, 2000.

BISKAMP, D.; SCHWARZ, E. On two-dimensional magnetohydrodynamic turbulence. **Physics of Plasmas**. v. 8, n. 7, p.3282-3292, 2001.

BOLZAN, M. J. A. **Um Estudo sobre Características Estatísticas do Subdomínio Inercial da Turbulência desenvolvida em escoamentos acima e dentro da Copa da Floresta Amazônica de terra firme**. 140f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos – SP, INPE-10394-TDI/920, 2002.

BOLZAN, M. J. A.; RAMOS, F. M.; SÁ, L. D. A.; RODRIGUES NETO, C.; ROSA, R. R. Analysis of fine-scale canopy turbulence within and above an Amazon forest using Tsallis' generalized thermostatics. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. 0, 10.1029/2001JD000378, 2002.

BOLZAN, M. J. A.; SAHAI, Y.; ROSA, R. R.; RAMOS, F. M.; FAGUNDES, P. R.; ABALDE, J. R. Wavelet analysis of geomagnetic storm time-series in Brazil. In: **XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG)**, Sapporo, Japão, GADC.02/04P/D-003, 30 de junho a 11 de julho de 2003.

BOLZAN, M.J.A. Analysis of Wavelet Transform applied in Geophysical. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 26, n. 1, p. 37-41, 2004.

BOLZAN, M.J.A.; SAHAI, Y.; FAGUNDES, P.R.; ROSA, R.R.; RAMOS, F.M.; ABALDE, J.R., Intermittency analysis of geomagnetic storm time-series observed in Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics** v. 67, n.14, p.1365-1372, Sep 2005a.

BOLZAN, M.J.A.; ROSA R.R.; RAMOS F.M., et al. Generalized thermo statistics and wavelet analysis of solar wind and proton density variability. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**. v. 67, n.17-18 p.1843-1851, Dec 2005b.

BOLZAN, M.J.A., Statistical and Wavelet Análisis of the Solar Wind Data. **Brazilian Journal of Physics**. v. 35, n. 3, Sep 2005.

BRUNO, R.; CARBONE, V.; SORRISO-VALVO, L.; BAVASSANO. Radial evolution of solar Wind intermittency in the inner heliosphere. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**. v. 108, A3, Art. No. 1130, 2003.

BRUNO, R.; BAVASSANO, B.; CARBONE, V.; PRIMAVERA, L.; MALARA, F.; SORRISO-VALVO; VELTRI, P. On the probability distribution function of small scale interplanetary magnetic field fluctuations. **Annales Geophysicae**. v. 22, n. 10, p. 3751-3769, 2004.

BURLAGA, L. F., Intermittent turbulence in the solar wind. **Journal of Geophysical Research**. v. 96, p.5847, 1991.

BURLAGA, L. F.; VIÑAS, A. F. Multi-scale probability distributions of solar wind speed fluctuations at 1 AU described by a generalized Tsallis distribution. **Geophysical Research Letters**. v.31, L16807, 2004.

CAMUSSI, R; GUJ, G. Orthonormal Wavelet decomposition of turbulent flows: intermittency and coherent structures. **Journal of Fluid Mechanics**. v. 348, p. 177-199, Oct 1997.

CASTING, B.; GAGNE, Y.; HOPFINGER, E. J. Velocity probability density functions of high Reynolds number turbulence. **Physica D**. v. 46, p. 177-200, 1990.

CRANE, P. C. Applications of the DFT/CLEAN technique to solar time series. **Solar Physics**. v.203, n. 2, p.381-408, Nov 2001.

DASSO, S.; MANDRINI, C.H.; DÉMOULIN, P.; GULISANO, A. M. Large scale MHD properties of interplanetary magnetic clouds. **Advances in Space Research**. v. 35, p. 711-724, 2005.

FARGE, M., Wavelet Transforms and their Applications to Turbulence. **Annual Review of Fluid Mechanics**. v. 24, p.395-457, 1992.

FARGE, M.; KEVLAHAN, N. K.-R.; PERRIER, V. Turbulence analysis, modeling and computing using wavelets. In: **Wavelets in Physics**. J. C. van den Berg Ed., Cambridge University Press, Cambridge, 1999, 453p.

FARGE, M.; PELLEGRINO, G.; SCHNEIDER, K. Coherent vortex extraction in 3D turbulent flows using orthogonal wavelets. **Physical Review Letters**. v.87, n.5, Jul. 2001.

FRISCH, Uriel. **Turbulence – The Legacy of A. N. Kolmogorov**. Cambridge:University Press, 1995. 296p.

GAGNE, Y; MARCHAND, M; CASTAING, B. Conditional Velocity PDF in 3-D Turbulence. **Journal de Physique II**. v.4, n.1, p.1-8, Jan 1994.

GRINSTED, A; MOORE, J. C.; JEVREJEVA, S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. **NonLinear Processes in Geophysics**. v.11, n.5-6, p.561-566, 2004.

GONZALEZ,W. D.; TSURUTANI, B. T., Criteria of Interplanetary Parameters Causing Intense Magnetic Storms (DST LESS-THAN - 100-NT). **Planetary and Space Science**. v.35, p.9, p.1101-1109, SEP 1987.

HARGREAVES, J. K. **The Solar-terrestrial environment**. Cambridge University Press, Cambridge, 1992. 420p.

HNAT, B.; CHAPMAN, S. C.; ROWLANDS, G. Intermittency, scaling and the Fokker-Planck approach to fluctuations of the solar wind bulk plasma parameters as seen by WIND. **Physical Review E**. v.67, n.5, No. 056404 Part 2, MAY 2003.

HNAT, B.; CHAPMAN, S. C.; ROWLANDS, G.; WATKINS, N. W.; FREEMAN, M. P. Scaling in long term data sets of geomagnetic indices and solar wind as seen by WIND spacecraft. **Geophysical Research Letters**. v.30, n.22, Art. No. 2174, 2003.

HNAT, B.; CHAPMAN, S. C.; ROWLANDS, G. Scaling and a Fokker-Planck model for fluctuations in geomagnetic indices and comparison with solar wind  $\epsilon$  as seen by WIND and ACE. **Physics of Plasmas**, v.11, n.4, p.1326-1332, 2004.

KATUL, G. G.; PARLANGE, M.; CHU, CHIA R., et al. Intermittency, local isotropy, and non-Gaussian statistics in atmospheric surface layer turbulence. **Physics Fluids**. v.6, n.7, p.2480-2492, Jul 1994.

KATUL, G. G.; PARLANGE, M.B.; ALBERTSON, J.D.; CHU, C.R., Local isotropy and anisotropy in the sheared and heated atmospheric surface layer. **Boundary-Layer Meteorology**. v.72, 123-148, 1995.

KINNEY R; McWILLIAMS, J. C.; TAJIMA, T. Coherent Structures and Turbulent Cascades in 2-Dimensional Incompressible Magnetohydrodynamic Turbulence. **Physics of Plasmas**. v.2, n.10, p.3623-3639, Oct 1995.

KINNEY, R.; McWILLIAMS, J. C. Turbulent cascades in anisotropic magnetohydrodynamics. **Physical Review E**, v. 57, n. 6, 1998.

KIRCHHOFF, Volker W.J.H. **Introdução à Geofísica Espacial**. São Paulo: Edusp, 1991. 149p.

KOLMOGOROV, A. N., The Local Structure of Turbulence in an Incompressible viscous flow for Very High Reynolds numbers **Dokl. Acad. Nauk. SSSR**, v. 30, p.301-305, 1941.

KOLMOGOROV, A. N., A refinement of previous hypothesis concerning the local structure of turbulence in viscous incompressible fluid at high Reynolds number. **Journal Fluid Mech**. v.30, n.82, 1962.

KOVÁCS, P.; CARBONE, V.; VOROS, Z. Wavelet-based filtering of intermittent events from geomagnetic time-series. **Planetary and Space Science**. v.49, p.1219-1231, 2001.

KRAICHNAN, R. H. Kolmogorov's inertial-range theories. **J. Fluid Mech** v.62, p.305-330, Jan. 1974.

LABAT, D. Recent advances in wavelet analyses: Part 1. A review of concepts. **Journal of Hydrology**. v.314, p.275-288, 2005.

LANDAU, L.; LIFCHITZ, E., **Mécanique des Fluides**. Moscou, Éditions Mir, 1949. 669p.

LEUBNER, M.P., A nonextensive entropy approach to kappa-distributions. **Astrophysics and Space Science**. v.282, n.3, p.573-579, 2002.

LUI, A. T. Y. Multiscale phenomena in the near-Earth magnetosphere. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**. v.64, p.125-143, 2002.

LUMLEY, J. L. Some comments on turbulence. **Phys. Fluids**, v.4, n.2, p.203-211, Feb. 1992.

MAKSIMOVIC, M; PIERRARD, V.; LEMAIRE, J.F., et al. A kinetic model of the solar wind with Kappa distribution functions in the corona. **Astronomy and Astrophysics**. v.324, n.2, p.725-734, Aug 1997.

MARSCH, E.; TU, C. Y., Non-Gaussian probability distributions of solar wind fluctuations. **Annales Geophysicae – Atmospheres Hydrospheres and Space Sciences**. v.12, n.12, p.1127, 1994.

MARSCH, E.; TU, C. Y., Intermittency, non-Gaussian statistics and fractal scaling of MHD fluctuations in the solar wind. **Nonlinear Processes in Geophysics**. v.4, p.101, 1997.

MENEVEAU, C.; SREENIVASAN, K. R. The multifractal nature of turbulent energy-dissipation. **J. of Fluid Mech**. v.224, p.429-484, Mar. 1991.

MÜLLER, W. C.; BISKAMP, D. Statistical anisotropy of magnetohydrodynamic turbulence. **Physical Review E**. v.67, n.6, Art. No. 066302 Part 2, 2003.

MONIN, A. S., YAGLOM, A. M. **Statistical fluid mechanics**. Massachusetts: MIT Press. 1971.v.1, p.769.

MORETTIN, P.A. **Ondas e Ondeletas: Da Análise de Fourier à Análise de Ondeletas**. São Paulo:EDUSP, 1999. 267p.

MOUSSAS, X.; POLYGIANNAKIS, J. M.; PREKA-PAPADEMA, P.; EXARHOS, G. Solar cycles: A tutorial. **Advances in Space Research**. v.35, p.725-738, 2005.

**MTOF/PM Data by Carrington Rotation**. Disponível em <http://umtof.umd.edu/pm/crn/>, 2004. Acesso em 20 fev.2004.

NELKIN, M. In what sense is turbulence an unsolved problem? **Science**. v.255, p.566-569, 1992.

OSBORNE, D. R.; VASSILICOS, J. C.; HAIGH, J. D. One-particle tw-time diffusion in three-dimensional homogeneous isotropic turbulence. **Physics of Fluids**, v.17, 035104, 2005.

PAINTER, S. Evidence for non-Gaussian scaling behavior in heterogeneous sedimentary formations. **Water Resources Research**. v.32, n.5, p.1183-1195, May 1996.

PARISI, G., FRISCH, U. On the singularity structure of fully developed turbulence, in predictability in geophysical fluid dynamics. In **M. Ghil, R. Benzi, and G. Parisi, editors, Turbulence and Predictability in Geophysical Fluid Dynamics and Climate Dynamics**. p.84-87. North-Holland, Amsterdam. 1985.

PRIGOGINE, I. **O fim das certezas**. São Paulo:UNESP, São Paulo, 1996. 199p.

RAMOS, F. M., ROSA, R. R., RODRIGUES NETO, C. Generalized thermostatistical description of intermittency and non-extensivity in turbulence and financial markets. Disponível In: **[www.lanl.gov/abs/cond-mat/9907348](http://www.lanl.gov/abs/cond-mat/9907348)**, 1999.

RAMOS, F.M.; ROSA, R.R.; NETO, C.R.; et al. Nonextensive thermostatistics description of intermittency in turbulence and financial markets. **Nonlinear Analysis-Theory Methods & Applications**. v.47, p.5, p.3521-3530. AUG 2001.

RAMOS, F. M.; ROSA, R. R.; RODRIGUES NETO, C.; BOLZAN, M. J. A.; SÁ, L. D. A.; CAMPOS VELHO, H. F. Non-extensive statistics and three-dimensional fully developed turbulence. **Physica A**. v.295, p.250-253, 2001.

RAMOS, F. M.; ROSA, R. R.; RODRIGUES NETO, C.; BOLZAN, M. J. A.; SÁ, L. D. A.; CAMPOS VELHO, H. F. Generalized Thermostatistics description of probability densities of turbulent temperature fluctuations. **Computer Physics Communications**. v.147, p.556-558, 2002.

RAMOS, F. M.; BOLZAN, M. J. A.; SÁ, L. D. A.; ROSA, R. R. Atmospheric turbulence within and above an Amazon forest. **Physica D**. v.193, p.278-291, 2004.

RICHARDSON, I.G.; CANE, H.V. The approximate to 150 day quasi-periodicity in interplanetary and solar phenomena during cycle 23 . **Geophysical Research Letters** . v.32, n.2, Art. No. L02104, JAN 29 2005.

ROBINSON, S. K. Coherent motions in the turbulent boundary layer. **Annual Review of Fluid Mechanics**. v.23, p.601-639, 1991.

RUPPERT-FELSOT, J. E., PRAUD, O.; SHARON, E.; SWINNEY, H. L. Extraction of coherent structures in a rotating turbulent flow experiment. **Physical Review E**, v. 72, n.1, 016311, 2005.

SARAFPOULOS, D. V. Cases for which the Earth's magnetosphere does not act as a "low-pass filter". **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**. v.67, p.1427-1442, 2005.

SHE, Z. S.; LEVEQUE, E. Universal Scaling Laws in fully-developed Turbulence. **Physical Review Letters** . v.72, n3, p.336-339, Jan 1994.

SHE Z. S.; WAYMIRE E. C. Quantized Energy Cascade and Log-Poisson Statistics in Fully-Developed Turbulence. **Physical Review Letters**. v.74, n.2, p.262-265, Jan 1995.

SREENIVASAN, K.R.; ANTONIA, R.A. The phenomenology of small-scale turbulence. **Annu. Rev. Fluid Mech.** v.29, p.435-472, 1997.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 1988. 666p.

SUNDKVIST, D.; KRASNOSELSKIKH, V.; SHUKLA, P. K.; VAIVADS, A.; ANDRÉ, M.; BUCHERT, S.; RÈME, H. In situ multi-satellite detection of coherent vortices as a manifestation of Alfvénic turbulence. **Nature**, v. 436, p. 825-828, doi: 10.1038/nature03931, 11 de agosto de 2005.

TASCIONE, T. F. **Introduction to the space environment**. Malabar, Florida :Orbit Book Company, 1988, 116p.

TAYLOR, G. I. Diffusion by continuous movements. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A**. v.20, n.2, p.196-211, 1921.

TAYLOR, G. I. Statistical Theory of Turbulence, **Proceedings of the Royal Society of London. Series A.** v.151, p.421-478, 1935.

TENNEKES, H., LUMLEY, J. L. **A first course in turbulence.** Massachusetts: MIT Press, 1972. 300p.

TOH, S., ITANO, T. Interaction between a large-scale structure and near-wall structures in channel flow. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 524, p. 249-262, 2005.

TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A Practical Guide to Wavelet Analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society.** v.79, n.1, 1998.

TSALLIS, C., Entropic nonextensivity: a possible measure of complexity. **Chaos Solitons & Fractals.** v.13, n.3, p.371-391, Mar 2002.

VALDIVIA, J. A.; ROGAN, J.; MUÑOZ, V.; GOMBEROFF, L.; KLIMAS, A.; VASSILIADIS, D.; URITSKY, V.; SHARMA, S.; TOLEDO, B.; WASTAVINO, L. The magnetosphere as a complex system. **Advances in Space Research.** v.35, p.961-971, 2005.

VICKERS, D.; MAHRT, L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.** v.14, p.512-526, Nov. 1996.

WARHAFT, Z; SHEN, X. The anisotropy of the small scale structure in high Reynolds number ( $R$ -lambda similar to 1000) turbulent shear flow. **Physics of Fluids.** v.12, n.11, p.2976 – 2989, Nov 2000.

WEYGAND, J. M.; KIVELSON, M. G.; KHURANA, K. K.; SCHWARZL, H. K.; THOMPSON, S. M.; MCPHERRON, R. L.; BALOGH, A.; KISTLER, L. M.; GOLDSTEIN, M. L.; BOROVSKY, J.; ROBERTS, D. A. Plasma sheet turbulence observed by Cluster II. **Journal of Geophysical Research.** v.110, p.1-24, 2005.

WOLFF, C. L. Intermittent solar periodicities. **Sol. Phys.** v.142, p.187, 1992.