

# ANÁLISE ESTATÍSTICA E ESPECTRAL DE DADOS METEOROLÓGICOS DE SUPERFÍCIE

Ernesto Luiz Casares Pinto<sup>1</sup>, Nisia Krusche<sup>2</sup>, Humberto Camargo Piccoli<sup>3</sup>

1. Dep. de Física 2. Dep. de Geociências 3. Dep. de Materiais e Construção  
Fundação Universidade do Rio Grande (FURG)

## ABSTRACT

This article discusses the spectral analysis of daily meteorological data, extracted from the *Meteorological Center of the University of Rio Grande (FURG)*. The time series corresponds to *temperature, atmospheric pressure, humidity and evaporation, measured at Rio Grande city, from January 1990 to August 1995*. The spectral approach was made using the *professional version of MATLAB Software, mainly the Signal Processing Toolbox*. Initially, tests were made for *stationarity, periodicity and normality* of the time series. Afterwards, the *spectral and cross-spectral estimation was computed* as well as the *autocorrelation, cross-correlation and coherence spectrum* of the data analysed. During processing of the time series the Hanning Window, and the low-pass and high-pass Butterworth filters were used. Despite the low frequency data acquisition (one value per day), the spectral analysis shows satisfactory results.

## 1. INTRODUÇÃO

O estudo corresponde a análise estatística e espectral de dados meteorológicos de *pressão atmosférica, temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, umidade relativa do ar e taxa de evaporação*, relativos a cidade de *Rio Grande/RS*, coletados na *Estação Meteorológica da Fundação Universidade do Rio Grande (FURG)* situada no Campus Carreiros.

As séries *temporais* foram recebidas, já digitalizadas, sendo que cada série discreta consta de *2096 dados diários*, compreendendo o período de *janeiro de 1990 a agosto de 1995*.

Para o sinal discreto, foi adotado  $T$  para a duração do sinal e  $N$  para o número de dados (amostras). Definindo  $\Delta$  como o intervalo amostrado pode ser obtida a relação:  $N=T/\Delta$  valores amostrados. A frequência fundamental do sinal corresponde a  $f_1=1/N\Delta$  (primeira harmônica). A segunda harmônica

corresponde a  $f_2=2/N\Delta$  e, assim sucessivamente até a  $e$ -nésima harmônica.

Pelo *critério de Nyquist*, para evitar o *efeito aliasing* ou *efeito de dobragem* (*Newland, 1975*), é fundamental que sejam realizadas, no mínimo, duas observações por ciclo.

O período mínimo de observação é  $2\Delta$  e, como consequência, a frequência máxima que pode ser observada é  $1/2\Delta$ . Esta frequência corresponde a *frequência de corte* ou de *Nyquist* ( $e$ -nésima harmônica), sendo igual a  $f_c=1/2\Delta=N/2T$  (*Jenkins & Watts, 1968*).

Deve ser ressaltado, portanto, que a escolha do tempo que separa duas medidas, corresponde a uma etapa extremamente importante na *análise espectral*, pois ela determinará o tipo de fenômeno que poderá ser observado. Para o presente estudo somente podem ser observados fenômenos com frequência até  $0.5$  *cpd*.

O objetivo deste trabalho refere-se à análise estatística e espectral das séries temporais, correspondentes aos dados

meteorológicos de superfície, utilizando a *linguagem computacional MATLAB*.

## 2. METODOLOGIA

As etapas correspondentes à coleta, gravação, transmissão e preparação dos dados (edição e digitalização) não foram analisadas, uma vez que estas já tinham sido realizadas na Estação Meteorológica.

Preliminarmente, foi feita uma depuração dos dados, estabelecendo os valores limites através da visualização gráfica e analítica das séries temporais.

A qualificação dos dados foi feita através da análise de *estacionaridade, normalidade e periodicidade (Bendat & Piersol, 1971)*.

A *estimativa da densidade espectral de potência* foi determinada diretamente a partir da série temporal, em termos da *média quadrática ou da variância* pois a *média* das séries foi *zerada*, através da aplicação da *Transformada Rápida de Fourier (FFT)*, (*Press et al, 1992*). Para exemplificar, a estimativa da densidade espectral pode ser obtida, na sua forma mais simples, através da aplicação direta da expressão, em *linguagem MATLAB*:  $pxx=abs(fft(x,n)).^2/n$ , sendo  $x$  a série temporal e  $n$  o número de valores amostrados.

Ao gerar o *vetor frequência*, foi considerada a taxa de amostragem, para que a análise espectral ficasse restrita a máxima frequência que pode ser observada (*Nyquist*), que no caso das séries analisadas é igual a *0.5 cpd (ciclos por dia)*.

Para reduzir a *variância do espectro*, inicialmente as séries foram divididas em seções superpostas e, logo após, foi determinada a média dos periodogramas destas seções.

As séries foram janeladas através da aplicação da *janela de Hanning* e filtradas através de um *filtro* tipo *butter* de *nona ordem*.

A *autocorrelação* e a *correlação cruzada* foram obtidas através da aplicação da *Transformada Rápida de Fourier Inversa*

(*IFFT*) ao resultado da estimativa do espectro.

A coerência foi obtida utilizando a expressão em *linguagem MATLAB*:

$C_{xy} = (abs(P_{xy}).^2)/(P_{xx} . P_{yy})$ , sendo  $P_{xy}$  o espectro cruzado e  $P_{xx}$  e  $P_{yy}$  os autoespectros das séries em análise.

Para determinação da coerência, foi fundamental a divisão dos dados em seções e a consequente realização da média para determinação dos espectros, pois se for utilizado toda a série o resultado será o valor *constante unitário*.

## 3. RESULTADOS

Inicialmente, para exemplificar, foi plotada a série correspondente a pressão (*fig. 1*).

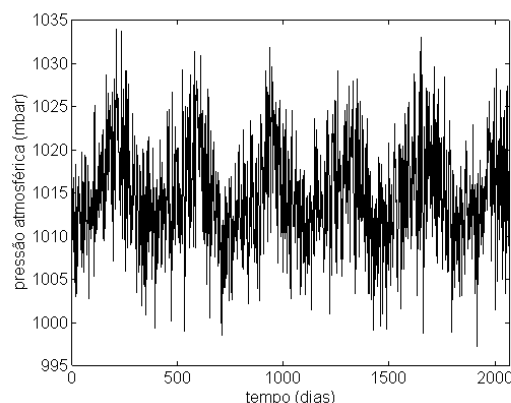


Fig. 1. Série temporal da pressão atmosférica.

A qualificação dos dados evidenciou a existência de *estacionaridade, periodicidade e normalidade* em todas as séries.

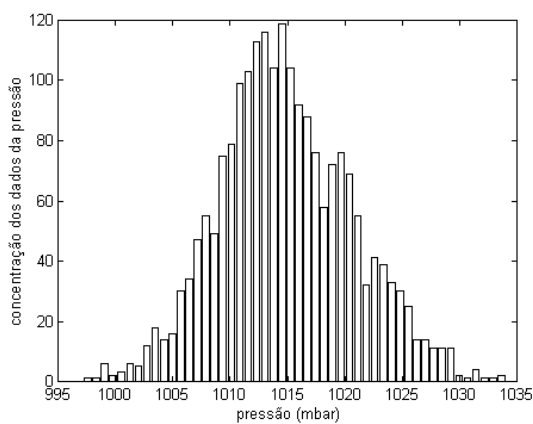
A pressão atmosférica serviu como exemplo para evidenciar a existência de estacionaridade nas séries. A *tabela 1* demonstrou que as propriedades estatísticas das amostras anuais tenderam a se manter.

tabela 1.

Dados de Pressão	Média (mbar)	Desvio padrão (mbar)	Variância (mbar <sup>2</sup> )	Média Quadrática (mbar) <sup>2</sup> (10 <sup>6</sup> )
1990	1015.4	5.813	33.793	1.031

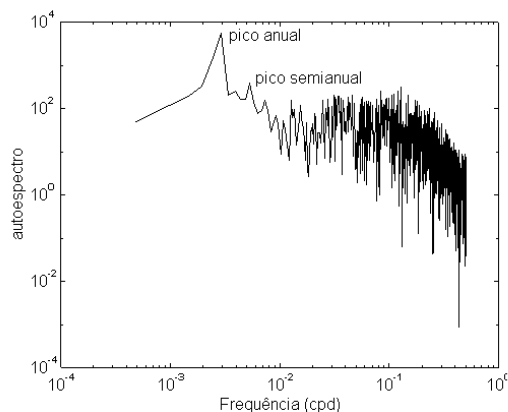
<b>1991</b>	1015.0	6.029	36.359	1.030
<b>1992</b>	1046.0	6.147	37.791	1.029
<b>1993</b>	1014.5	5.697	32.459	1.029
<b>1994</b>	1015.0	5.9894	35.872	1.0302

A *figura 2* demonstrou, claramente, para a pressão atmosférica, uma tendência para a normalidade na distribuição dos dados; fato este evidenciado em todas as séries.



*Fig. 2.* Teste de normalidade para a série da pressão atmosférica.

A *figura 3* corresponde a Estimativa da Densidade Espectral da Pressão Atmosférica, em escala logaritimica.



*Fig. 3.* Estimativa de Densidade Espectral ( $\text{mbar}^2$ ) para 2048 dados de pressão atmosférica.

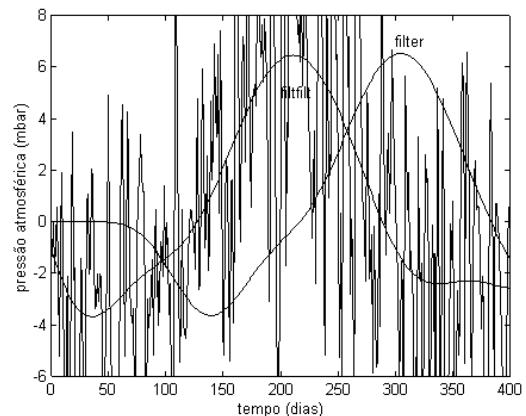
Ao serem utilizados 1825 dados de pressão (5 anos), foi obtida como frequência do espectro  $f_{esp}=0.0027 \text{ cpd}$  e, conseqüentemente, o período é  $tesp=365 \text{ dias}$ . Isto indica que a frequência predominante no

espectro é a anual. Pode ser observado ainda, nas baixas frequências, um outro pico que corresponde a frequência semianual.

Logo após foram utilizados 2048 dados sendo obtido o resultado:  $f_{esp}=0.029 \text{ cpd}$  e  $tesp= 341.333 \text{ dias}$ . Isto não correspondeu a erro na determinação da frequência do espectro, simplesmente com 2048 dados o valor discretizado, correspondente a frequência anual, não existe pois  $f(0)=0$ ,  $f(1)=1/2048$ ,  $f(2)=2/2048$ ,  $f(3)=3/2048$ ,  $f(4)=4/2048$ ,  $f(5)=5/2048$  e  $f(6)=0.0029 \text{ cpd}$ .

Tendo em vista que quase toda a energia está concentrada nas baixas frequências, foi aplicado as séries o filtro digital *passa baixa* tipo *butter(9,0.02)*, que indica que o filtro é de *nona ordem* com frequência de corte de  $0.02 \text{ cpd}$ .

A *figura 4* justificou a utilização da função *filtfilt* ao invés da função *filter* do *toolbox do MATLAB*, pois a primeira eliminou as distorções de fase no processo de filtragem.



*Fig. 4.* Demonstração da aplicação do filtro *passa baixa butter(9,0.02)* e comparação entre a utilização da função *filtfilt* e *filter* do *toolbox do MATLAB*.

O espectro entre a pressão e a temperatura resultou em uma densidade espectral de potência *negativa*, mas no caso de temperatura e evaporação o espectro cruzado deu origem a uma potência do espectro *positiva* (*fig. 5*).

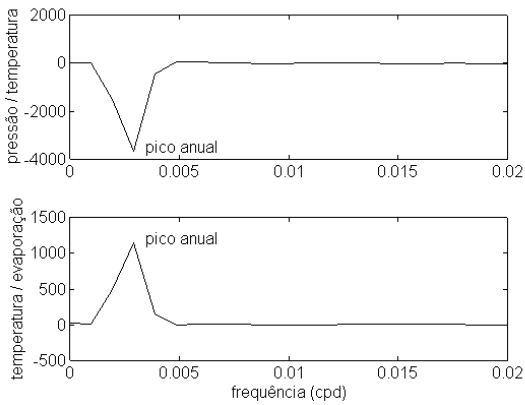


Fig. 5. Espectro Cruzado com aplicação do filtro passa baixa tipo *butter(9,0.02)*.

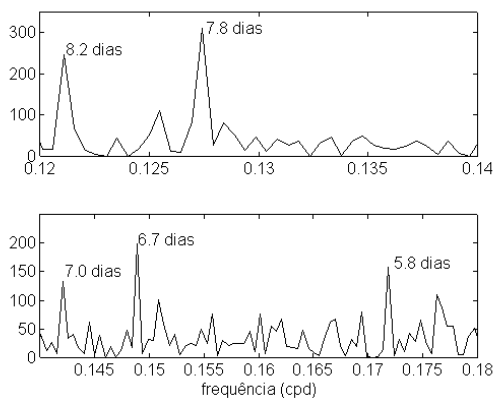


Fig. 6. Espectro da pressão atmosférica ( $\text{mbar}^2$ ) nas altas frequências (2048 dados).

Logo após foram analisados os picos de energia do espectro nas altas frequências para 2048 e 365 dados.

Para isto foi feito um *zoom* nas altas frequências do espectro da pressão atmosférica com 2048 dados (fig. 6).

Nesta figura, foi constatada a presença de energia significativa nas frequências correspondentes a 8.2, 7.8, 7.0, 6.7 e 5.8 dias.

Estes picos podem corresponder a passagens de sistemas frontais na cidade de *Rio Grande*, já que o trabalho de **Britto e Krusche (1996)** encontrou, para esta região, uma período de passagem de frentes entre 6 e 10 dias.

Outrossim, frequências entre 5 e 8 frentes por mês já foram observadas para esta região (**Climanálise, 1986**).

Além disto foi utilizado um filtro *passa alta* tipo *butter(9,0.08, 'high')* que retira as frequências abaixo de 0.08 cpd.

Através da análise da *figura 7* constata-se a presença de picos com energia significativa nas frequências correspondentes a 7.9 e 10.4 dias.

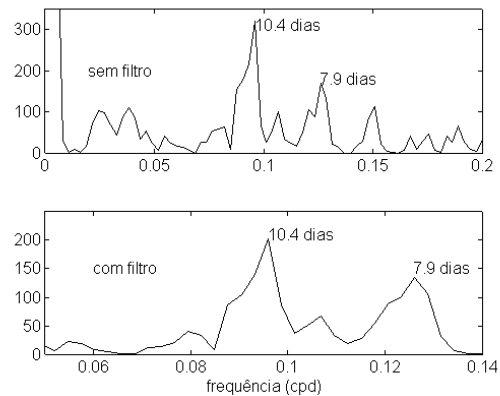


Fig. 7. Espectro anual ( $\text{mbar}^2$ ) da pressão atmosférica (filtro passa alta tipo *butter(9,0.08, 'high')*).

A *figura 8* demonstrou os resultados para a autocorrelação e correlação cruzada entre a *pressão atmosférica* e a *temperatura*, mostrando uma *correlação negativa* para *defasagem zero*.

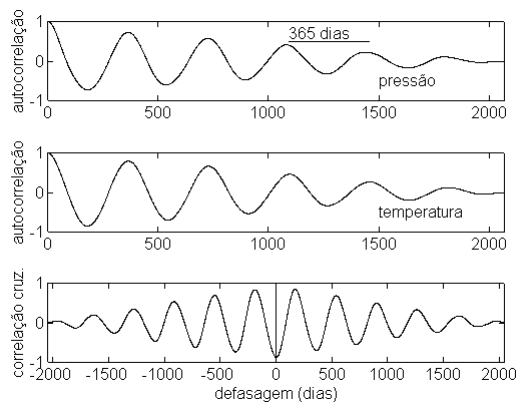


Fig. 8. Autocorrelação e Correlação Cruzada entre a pressão atmosférica e a temperatura com aplicação do filtro passa baixa tipo *butter(9,0.02)*

Com relação ao tempo correspondente a distância entre dois picos positivos e sucessivos das curvas, na direção do eixo da fase, este indicou uma periodicidade anual.

Resultou também em *correlação negativa*, para a *fase zero*, os sinais de *pressão* e *evaporação*, *temperatura* e *umidade relativa do ar* e, *umidade relativa do ar* e *evaporação*.

As maiores correlações foram obtidas entre, em ordem decrescente, *pressão atmosférica* e *temperatura* e entre *temperatura* e *umidade relativa do ar*.

As correlações entre *temperatura e evaporação*, *pressão atmosférica e evaporação* e *umidade relativa do ar e evaporação* tenderam para um mesmo valor, sendo a primeira um pouco maior.

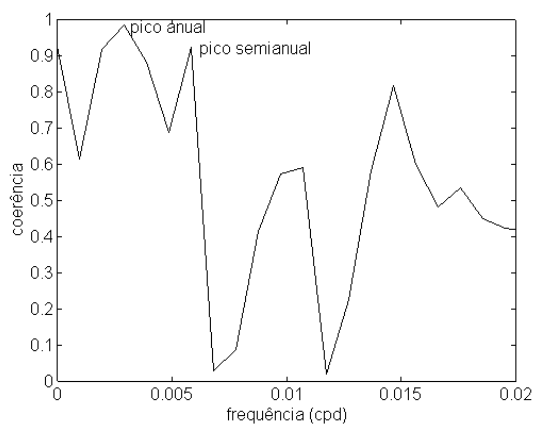


Fig. 9. Coerência entre a pressão atmosférica e a temperatura (filtro passa baixa tipo *butter(9,0.02)*).

A coerência confirmou a existência de correlação alta entre as séries nas frequências anual e semianual (fig. 9).

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados da análise espectral, na *escala temporal* de cinco anos, indicam fortemente que as variáveis meteorológicas de superfície em análise contém uma *frequência característica*.

Ao serem observadas as estimativas de densidade espectral, praticamente toda a energia está concentrada na *frequência anual*.

A distância entre os picos, na direção paralela ao eixo da fase, nos gráficos da correlação confirmaram a existência de um *período anual* nas séries.

O estudo da correlação e do espectro cruzado demonstrou que as propriedades que estão em oposição de fase correspondem a: *pressão e temperatura*, *pressão e evaporação*, *temperatura e umidade relativa do ar* e *umidade relativa do ar e evaporação*.

Os picos de energia que aparecem nas *figuras 6 e 7* induzem a que seja estabelecida uma relação com a passagem de sistemas frontais.

O fato do período correspondente a passagem de frentes não ficar perfeitamente definido, talvez seja devido ao fato do trabalho ter sido realizado utilizando dados

meteorológicos de superfície com uma taxa de amostragem muito baixa (um dado por dia).

Outrossim, não é de se esperar que a passagem de frentes ocorram em um ciclo periódico regular.

Certamente o estudo que foi desenvolvido pode ser melhorado significativamente, para isto podem ser citadas, como sugestões, por exemplo, a realização de:

- a. Aumento da frequência de amostragem;
- b. Estudo da precisão dos resultados obtidos, principalmente através de definição de intervalo de confiança, sem o qual fica difícil fazer alguma afirmação categórica;
- c. Análise de fase das grandezas estudadas, com o objetivo de ser realizado estudo sobre as variáveis determinantes em um determinado fenômeno;
- d. Análise espectral para diferentes escalas com o objetivo de identificar, por exemplo, processos sazonais e alterações climáticas.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bendat, J.S. and Piersol, A.G.. *Procedures Random Data: Analysis and Measurement*, John Wiley, New York, p.407, 1971.
- Britto, F. e N. Krushe, *Frequência e Intensidade das Frentes Frias em Rio Grande*, IX Congresso Brasileiro de Meteorologia, Campos do Jordão, 1996.
- Climanálise, Boletim de Monitoramento e Análise Climática*, Número Especial, Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1986.
- Jenkins, G. M. and Watts, D. G.. *Spectral Analysis and its Applications*, Holden-Day, San Francisco, Califórnia, p.525, 1968.
- MATLAB. *High-Performance Numerical Computation and Visualization Software*, The Math Works, United States, 1993.
- Newland, D.E. . *Random Vibration and Spectral Analysis*, Longman Group Limited, New York, p.285,1975.

Willian H. Press, Saul A. Teukolsky, William  
T. Vetterling, Brian P. Flannery.  
*Numerical Recipes in Fortran, The Art*

*of Scientific Computing*, Cambridge  
University Press, p.963, New York, 1992.