

## **Análise espectral das simulações do modelo atmosférico regional Eta/CPTEC**

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)

Fernando de Oliveira Lima

(Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: [fol2111@gmail.com](mailto:fol2111@gmail.com)

Chou Sin Chan (INPE, Orientadora)

E-mail: [chou.sinchan@gmail.com](mailto:chou.sinchan@gmail.com)

COLABORADOR

Dr. Michel Pompeu Tcheou

(Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ)

e-mail: [mtcheou@uerj.br](mailto:mtcheou@uerj.br)

Julho de 2014

## 1. Introdução

Pesquisas sobre modelos matemáticos para previsões de grandezas meteorológicas acuradas, assim como métodos de filtragem e tratamento de sinal, abrem ramificações por toda a engenharia. Como o uso de modelos matemáticos de dispersão de poluentes para auxílio da gestão ambiental de uma região, ou o cálculo da energia cinética em precipitações na atmosfera, ou como o uso de filtros para a suavização de imagens.

Está sendo realizado um experimento em que as altas frequências do “big brother” são removidas e em seguida com o campo recomposto somente com as baixas frequências são utilizadas para forçar o “little brother”. A análise do espectro de potência nas simulações do “little brother” poderá mostrar o quanto o modelo Eta consegue manter a energia das frequências da sua forçante e a quantidade de energia que é desenvolvida no interior do próprio modelo. Testes com diferentes versões de representação dos processos físicos mostrarão a necessidade de modificações do modelo para melhor representar o espectro de potência da energia cinética. A melhor representação será escolhida baseado em comparações com o espectro de potência de dados observacionais. Os dados observacionais mais adequados neste caso são dados de reanálises, como por exemplo do ‘Climate Forecast System Reanalysis’ (CFSR) <sup>[1]</sup> que estão disponíveis na resolução de cerca de 38 km, em intervalos de 6 horas para todo o globo. A análise espectral dos dados do CFSR será comparada com a análise espectral do “big brother”.

Análise espectral através da Transformada de Fourier Discreta, é aplicada nas condições forçantes de 40km e também nas condições das simulações aninhadas. Será verificada o espectro de potência da energia cinética do “Big Brother”, as condições forçantes, e do “little brother” as condições aninhadas. A relação entre os dois espectros indicará a perda ou

ganho de energia ou estrutura no modelo aninhado. A distribuição espacial desta relação permitirá também indicar a distância para o interior do domínio do modelo aninhado em que o efeito do “Big brother” é dominante sobre o “little brother”. Este resultado ajudará na decisão sobre o tamanho do domínio coberto na escolha da configuração do modelo aninhado, o “little brother”.

O projeto tem por objetivos específicos:

1. Analisar o padrão espectral do modelo atmosférico Eta/CPTEC em diferentes resoluções espaciais e tamanho de domínio;
2. Avaliar a reprodutibilidade das simulações do modelo regional Eta em relação às condições das forçantes do contorno lateral;
3. Realizar testes de sensibilidade do modelo atmosférico Eta/CPTEC em diferentes representações de processos físicos;

O Projeto possui o seguinte plano de atividades:

1. Familiarização nas ferramentas de leitura das previsões do Modelo Eta/CPTEC;
2. Familiarização nas ferramentas de tratamento de sinal;
3. Análise espectral das integrações dos experimentos 1-2, verão e inverno;
4. Geração de Eta-40km-Low (Remoção de sinais de alta frequência e recomposição do sinal);
5. Análise espectral das integrações dos experimentos 3-4, verão e inverno;
6. Familiarização na integração do modelo Eta/CPTEC;
7. Integração para os experimentos 5-7;
8. Análise espectral das integrações dos experimentos 5-7, verão e inverno;
9. Análise dos resultados, elaboração de relatório;
10. Análise dos resultados, elaboração de publicação;

Neste relatório o foco será na utilização de ferramentas de leitura de dados meteorológicos e de análise espectral, que correspondem as seções 1, 2, 3 e 4.

Antes de entrar na metodologia utilizada, é necessário antes conhecer os tipos de dados e as ferramentas para adquiri-los e processa-los. As etapas iniciais do projeto podem ser divididas em duas partes: conhecer as ferramentas para a leitura dos parâmetros climáticos e a análise espectral das amostras. As ferramentas envolvidas resumem-se em dois programas computacionais que realizam as funções de extração e manipulação dos dados meteorológicos fornecidos pelo INPE e processamento de sinais através de métodos numéricos. Para extração e manipulação de dados meteorológicos utiliza-se o GrADS, enquanto a manipulação e processamento de sinais utiliza-se o MATLAB. Já para a remoção de altas frequências, foram utilizadas ferramentas de filtragem espectral feitas no MATLAB gerando uma resposta.

## **2. Familiarização de ferramentas computacionais**

Primeiramente, é necessário familiarizar-se com os as ferramentas utilizadas, cada um com sua respectiva função. Nesta seção, estas funções e ferramentas serão descritas e analisadas com um detalhamento maior, especificando onde cada tipo de dado se encaixa no projeto e como esses são tratados e utilizados pelos usuários.

Em uma visão ampla do projeto, o último semestre foi composto basicamente de extrair os dados meteorológicos, armazená-los, realizar a análise espectral com base nos dados obtidos e mostrar os dados graficamente. A figura mostra o diagrama que explicita a visão geral do projeto nos últimos Seis meses:

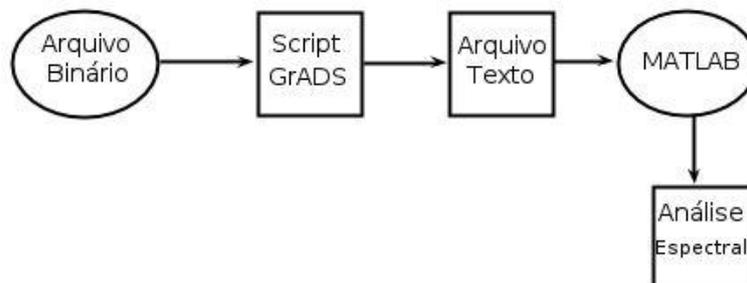


Figura 1: Diagrama geral das Atividades

O primeiro bloco do gráfico mostra a primeira forma de arquivo do projeto. O arquivo binário será processado pelo GrADS através de algoritmos, gerando um arquivo texto como saída. Este arquivo será utilizado no MATLAB, onde serão aplicados os modelos matemáticos da análise espectral. Nas atividades de familiarização estavam incluídos a criação desse algoritmo que transforma o arquivo binário em arquivo de texto, e o desenvolvimento da análise espectral.

### 3. GrADS e MATLAB

Segundo sua própria referência, Grid Analysis and Display System (GrADS) é uma ferramenta da área de trabalho interativa usada para facilitar o acesso, manipulação e visualização de dados de grandezas meteorológicas e topológicas. O GrADS suporta vários tipos de arquivos, incluindo os aqui utilizados: GRIB 1 e 2 (.grb1 e .grb2, respectivamente) e os arquivos do próprio programa, .ctl e .gs, que serão detalhados mais adiante. O programa pode ser

acessado via terminal. Os dados podem ser exibidos em uma grande variedade de gráficos, podendo fornecer uma saída em forma de imagem, suas configurações podem ser controladas pelo usuário, como pode ser visto na figura 2.

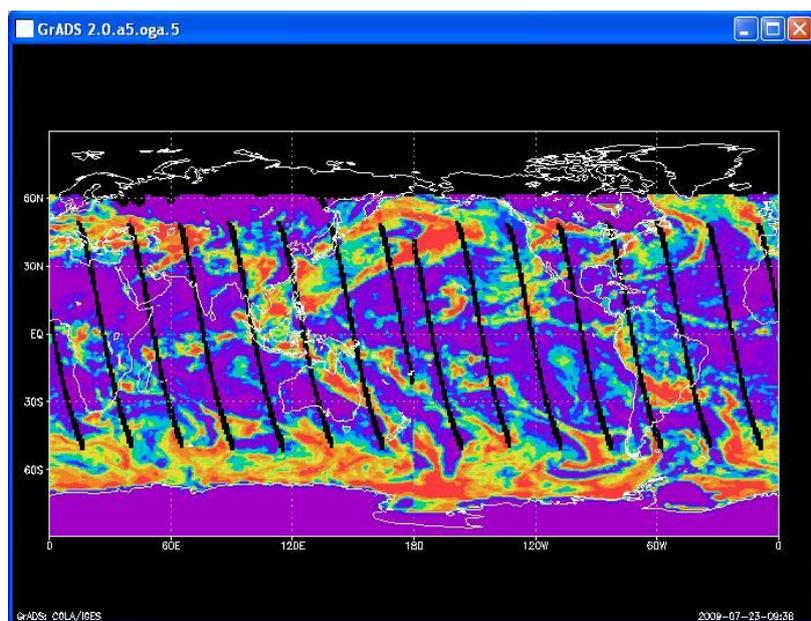


Figura 2: Interface gráfica do GrADS

A Figura 2 mostra a interface gráfica do GrADS. Nesta aplicação o programa foi configurado para exibir a distribuição de nuvens de radiação no mapa mundi e suas intensidades pela diferença de cores (sendo a cor mais fria a mais fraca e a mais quente a mais forte). A mesma aplicação pode ser executada com as variáveis da velocidade do vento.

No geral, a função do GrADS [5] se resume em transformar arquivos de dados binários em imagens gráficas ou em arquivos textos, dependendo da aplicação. O resultado final, no caso o arquivo-texto, será utilizado pelo MATLAB. Ferramenta de computação numérica utilizada.

A formatação do arquivo-texto foi moldada como uma matriz contendo latitude e longitude e o valor da variável em cada tempo disponível nos arquivos .ctl e .grb2. Foram utilizados os arquivos (.ctl e .grb2) das velocidades do vento do Modelo Eta no período de tempo de 4 meses (554 amostras) começando no verão do ano na data de 13 de dezembro de 2002. A latitude e longitude possuem uma variação de 0,5 entre cada pixel nas duas dimensões e variam entre as dimensões do modelo Eta, região onde encontra-se a América do Sul, correspondente a velocidade meridional.

Com a aquisição dos valores da velocidades do vento meridional pelo modelo ETA 40 km, e o armazenamento destas em um arquivo-texto, foi possível concentra-se na utilização dos fundamentos de processamento de dados através da plataforma de computação numérica MATLAB. Nesta, foram utilizados modelos matemáticos para a análise espectral do sinal, o real objetivo desse projeto.

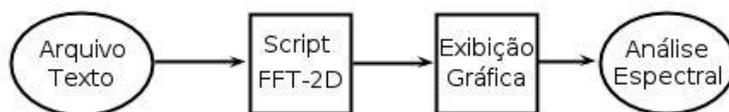


Figura 3: Diagrama do processo realizado com o MATLAB

O trabalho no MATLAB <sup>[4]</sup> foi basicamente utilizar os dados do arquivo-texto na forma matricial e aplicar as ferramentas de processamento de sinal. Tanto a reorganização quanto as ferramentas são executadas no script de MATLAB. Como mostrado em um diagrama na Figura 3, para o melhor entendimento do processo realizado com a plataforma em questão.

#### 4. Análise Espectral

A transformada de Fourier (CFT) <sup>[2]</sup> é uma integral que transforma uma variável no domínio desejado (seja ele no tempo ou espaço ou qualquer

outro) para o domínio da frequência, a transformada do cosseno (CCT) originada da transformada de Fourier, é outra ferramenta utilizada no estudo. Como o nome já explicita, as integrais são ferramentas de variáveis contínuas (infinitas amostras), como temos um número limitado de amostras, trabalhamos com variáveis discretas (finitas amostras), sendo necessária a utilização das formas discretas das transformadas, a transformada discreta de Fourier(DFT) e a transformada discreta do cosseno(DCT). As 4 estão mostradas abaixo respectivamente.

$$X_k \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-i2\pi kn/N}, \quad k \in \mathbb{Z} \quad (1)$$

Onde N é o número total de amostras.

$$F(u) = \left(\frac{2}{N}\right)^{\frac{1}{2}} \sum_{i=0}^{N-1} \Lambda(i) \cdot \cos \left[ \frac{\pi \cdot u}{2 \cdot N} (2i + 1) \right] f(i) \quad (2)$$

Onde:

$$\Lambda(i) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & \text{para } i = 0 \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

No entanto essas equações ainda não são as utilizadas no projeto. Como dito anteriormente buscamos fazer a análise espectral de duas dimensões, portanto foi necessário utilizar a versão espacial de duas dimensões da DCT, a transformada discreta do cosseno bidimensional(DCT-2D). Em uma grade de tamanho Ni pontos da direção longitudinal por Nj na direção latitudinal, a DCT-2D é descrita da seguinte maneira:

$$F(u, v) = \left(\frac{2}{N}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2}{M}\right)^{\frac{1}{2}} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} \Lambda(i) \cdot \Lambda(j) \cdot \cos \left[ \frac{\pi \cdot u}{2 \cdot N} (2i + 1) \right] \cos \left[ \frac{\pi \cdot v}{2 \cdot M} (2j + 1) \right] \cdot f(i, j)$$

(3)

Onde:

$$\Lambda(\varepsilon) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & \text{para } \varepsilon = 0 \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Segundo Laprise [3] a DCT-2D, gera uma sequência de semi-circunferências, cujos raios podem ser caracterizados como número de onda (wavenumber), descrita na equação (5). No qual pode ser relacionado com o comprimento de onda com a equação, sendo N o número de amostras em uma das dimensões e o delta espaçamento entre os pontos.

Número de Onda:

$$k = \sqrt{m^2 + n^2} \quad (4)$$

Onde m é a componente do número de onda da direção longitudinal e n é a componente na direção latitudinal.

Comprimento de onda:

$$\lambda = 2\Delta/k \quad (5)$$

Onde o delta representa o espaçamento entre os pontos no mapa.

Assim os resultados obtidos estão exibidos nas figuras. Repare que a DCT-2D forma de fato semi-círculos no qual os raios são os números de onda e quanto menor a latitude e longitude maior é o valor da DCT-2D. A DFT-2D também forma semi-círculos, porém ao expandir a nível global (em todos os pontos de longitude-latitude no mapa mundial), ela forma quatro semi-círculos convergindo no meio da figura, essa peculiaridade é característica da própria

DFT-2D, ela forma gráficos espelhados tanto da dimensões longitudinal quanto na latitudinal.

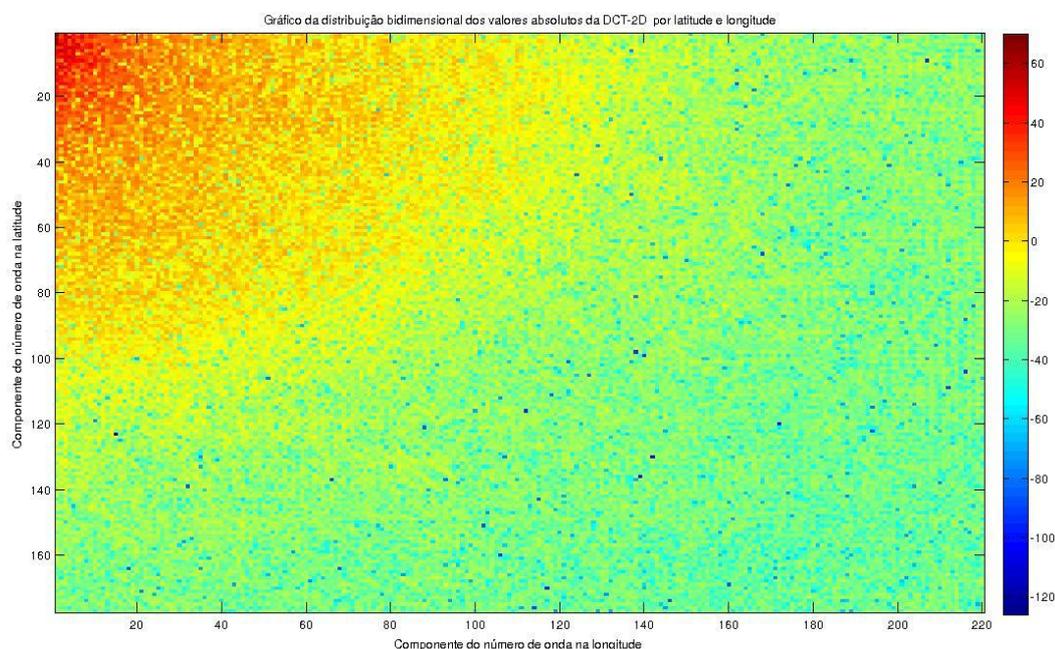


Figura 4: Resultado da DCT-2D

## 5. Filtragem espectral

Após transformar a matriz de velocidades do domínio do espaço para a frequência, foram iniciados os tratamentos para remoção de altas frequências através de filtragem espectral. Este tipo de filtragem modifica o sinal no domínio da frequência para somente após obter a resposta do sinal ao filtro no domínio da frequência através da transformada inversa da DCT-2D. Para eliminar as altas frequências o ideal seria utilizar um filtro passa-baixa, estipulando uma frequência de corte. Mas deve-se levar em consideração a conversão da frequência (ou número de onda) para comprimento de onda citada no último tópico. Como a relação entre comprimento e número de onda é

inversamente proporcional é em filtrar comprimentos de onda menores, afinal quanto maior a frequência menor o comprimento de onda.

Ambas os lados da relação (entre comprimento ou número de onda) formam abordagens válidas, podendo assim criar filtros em função das duas variáveis. O filtro é representado matematicamente como uma função de transferência  $H(u, v)$ , onde “u” e “v” são as componentes bidimensionais no domínio da frequência, assim como “x” e “y” são no domínio do espaço. No domínio da frequência o sinal filtrado é obtido através da convolução entre o sinal e a função de transferência, no domínio da frequência a resposta é obtida através da multiplicação das respectivas funções em tal domínio [6].

$$f(x, y) * h(x, y) \Leftrightarrow F(u, v)H(u, v)$$

O filtro passa-baixa ideal para eliminar altas frequências é o filtro retangular, e mostrou-se o mais satisfatório entre outros testados. Apesar do nome apresenta uma característica cilíndrica na aplicação bidimensional, devido sua modelagem ser feita através do comprimento de onda uma relação estabelecida da distância do ponto desejado a uma origem definida, conforme já explicado acima. Logo a função  $H(u,v)$  terá como único parâmetro o comprimento de onda (bem assim como sinal) podendo ser definida como uma função  $H(\lambda)$  e  $\lambda_0$  é o comprimento de corte, assim:

$$H(\lambda) = \begin{cases} 1 & , \lambda \geq \lambda_0 \\ 0 & , \lambda < \lambda_0 \end{cases}$$

Podemos observar a característica retangular do filtro no gráfico da função de transferência em relação ao comprimento de onda.

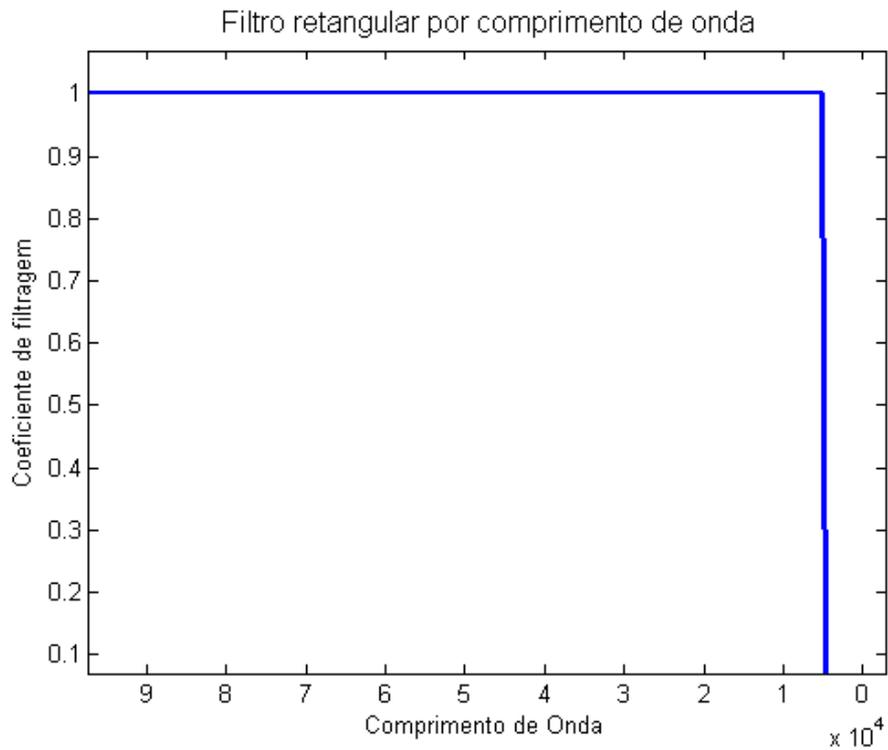


Figura 5: Gráfico do filtro retangular por comprimento de onda (Km).

Após a multiplicação desta função de transferência com o sinal, a resposta obtida foi convertida de volta ao domínio do espaço, obtendo assim o sinal filtrado. Abaixo está mostrado a comparação do sinal original com os filtrados em três frequências de corte diferentes.

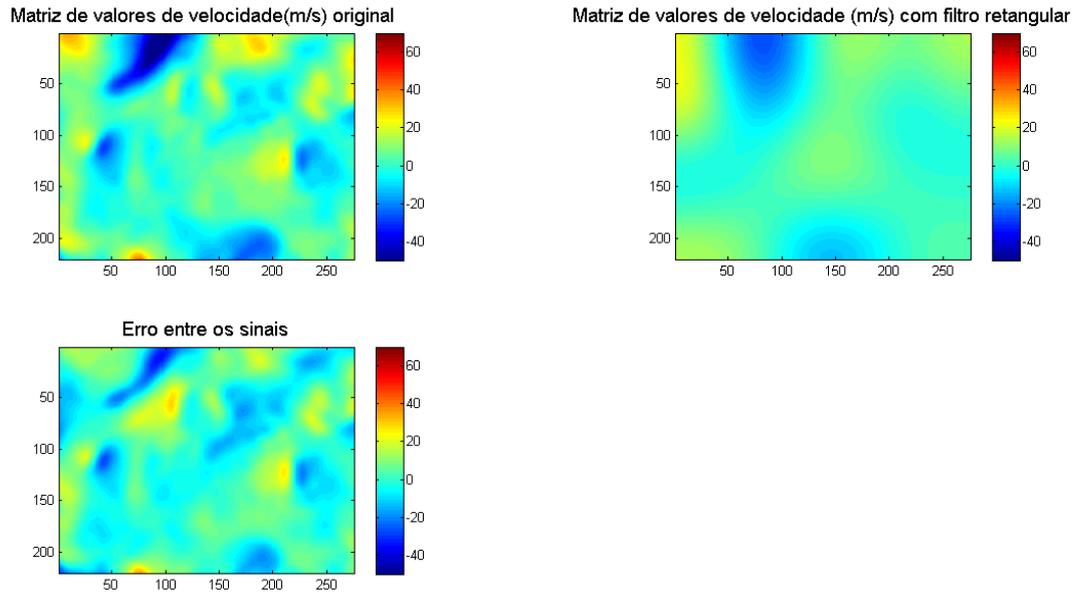


Figura 6: No canto esquerdo superior: Imagem original; Direito: Imagem filtrada com comprimento de onda de 5000; Abaixo: Erro entre as duas imagens

Pode-se perceber a suavização da imagem gerada pelo corte gerado pelo filtro. O erro é calculado pela diferença absoluta entre o sinal filtrado e o original.

## 6. Conclusão

Com base nos resultados e nas práticas realizadas, observou-se que a filtragem utilizando-se comprimento de onda gera uma melhor visualização dos efeitos da eliminação de altas frequências, assim completando o processo de filtragem. Na próxima etapa deverá ser feito o mesmo processo de filtragem para todas as componentes que geram as condições forçantes, por todas as amostras de tempo durante o período de análise, para finalmente introduzi-los ao “little brother”.

## 7. Referências Bibliográficas

1. Saha et al., 2010: The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. Bulletin of American Meteorological Society. 1015-1057.
2. Diniz, p. S. R., Da Silva, e. A. B., Netto, s. L. Processamento Digital de Sinais. 1 ed. Rio de Janeiro, Brasil, Artmed, 2004.
3. Denis, B., J. Côté and R. Laprise, 2002: Spectral decomposition of two-dimensional atmospheric fields on limited-area domains using discrete cosine transforms (DFT). Mon. Wea. Rev. 130,1812-1829 .
4. <http://www.mathworks.com/products/matlab/>
5. <http://www.iges.org/grads/>
6. Digital Image Processing, Gonzalez and Woods, Second Edition, Prentice-Hall, 2002