

INVESTIGAÇÃO SOBRE A DISPERSÃO DIRECIONAL DE ONDAS DE GRAVIDADE
NA BACIA DE CAMPOS, RIO DE JANEIRO.

André Lima Torres Mendes

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
OCEÂNICA.

Aprovada por:

Prof. Carlos Eduardo Parente Ribeiro, D.Sc.

Prof. Antonio Carlos Fernandes, Ph.D.

Dr. José Antônio Moreira Lima, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
ABRIL DE 2005

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

MENDES, ANDRÉ LIMA TORRES

Investigação sobre a dispersão direcional de ondas de gravidade na Bacia de Campos, Rio de Janeiro. [Rio de Janeiro] 2005

VII, 91p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M. Sc., Engenharia Oceânica, 2005)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

- 1 - Ondas de Gravidade
- 2 - Dispersão Direcional
- 3 - Espectro Direcional
- 4 - DAAT

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Aos meus pais, Izidério e Vilma, e
à minha futura esposa, Bianca.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial a meu pai e minha mãe, pelas lições, exemplos e sacrifícios generosamente oferecidos, revelando a mim valores éticos e morais necessários à vida em sociedade como pessoa, como profissional e como cidadão brasileiro.

À Bianca, pela infinita compreensão e apoio em todos os momentos, sejam de erros ou de acertos, sejam de dúvidas ou de certezas.

Ao meu orientador, Carlos Eduardo Parente, pela paciência demonstrada e pelo empenho e interesse com que conduziu os trabalhos. Respeito e admiração são a ele devidos.

À PETROBRAS, através de seu Centro de Pesquisas (CENPES), em especial ao Engenheiro José Antônio Moreira Lima e ao Oceanógrafo Eric Oliveira, este um amigo de primeira hora, pela motivação do trabalho e pela cessão dos dados.

A meus ex-patrões, hoje amigos verdadeiros, Carlos Leandro e Maria Beatriz, que acreditaram e investiram em minha vocação e souberam apoiar minhas decisões.

Aos amigos e colegas de trabalho que, de uma forma ou de outra, direta ou indiretamente, incentivaram-me a completar esta importante etapa da vida profissional.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

INVESTIGAÇÃO SOBRE A DISPERSÃO DIRECIONAL DE ONDAS DE GRAVIDADE
NA BACIA DE CAMPOS, RIO DE JANEIRO.

André Lima Torres Mendes

Abril/2005

Orientador: Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Programa: Engenharia Oceânica

As características direcionais das ondas do mar são informações de grande relevância em numerosos campos da ciência e da engenharia, sendo o espectro com conteúdo direcional uma ferramenta essencial na reprodução de estados de mar “reais” para a análise das interações com embarcações e estruturas marítimas. Neste trabalho, a dispersão direcional de ondas na Baía Campos foi investigada a partir de dados de ondógrafo do tipo *pitch-roll* com base reconstrução da distribuição direcional de energia feita através da técnica DAAT. Os resultados obtidos mostram valores de dispersão mais confiáveis do que os produzidos por técnicas convencionais, e apontaram para valores de dispersão associadas às características de geração das ondas e aos processos de interação entre mares.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

INVESTIGATION OF THE DIRECTIONAL SPREADING OF WIND WAVES AT
CAMPOS BASIN, OFF RIO DE JANEIRO COAST

André Lima Torres Mendes

April/2005

Advisor: Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Department: Oceanic Engineering

Wave directionality is an important issue on numerous science and engineering fields, being the directional spectrum an important data for realistic sea-state simulation and adequate analysis of wave interaction with oceanic systems as ships and offshore structures. This work aimed at wave spreading investigation of a Campos Basin pitch-and-roll buoy data by means of a wave energy distribution reconstruction method called DAAT. Results showed better agreement to proposed model values than spreading estimation through conventional spectral analysis technique. Spreading values at the investigated site showed dependence with wave generation characteristics as well as with interaction processes of different seas.

Sumário

Resumo	v
Abstract	vi
1. Motivação e objetivos	1
2. Fundamentos Teóricos	4
2.1 Processos Estocásticos	4
2.2 Análise Espectral	5
2.3 Dispersão Direcional	9
2.3.1 Métodos Não-Paramétricos	9
2.3.2 Métodos Paramétricos	10
2.3.3 Parâmetros Direcionais	15
2.4 Medições Direcionais	18
3. A Técnica DAAT	21
3.1 Conceitos Gerais	21
3.2 Processamento	24
3.3 Aplicações	33
4. Aplicação à Bacia de Campos	52
4.1 Considerações Iniciais	52
4.2 Classificação de Mares	54
4.3 Estudos de Casos	59
4.4 Estatística Geral	70
5. Conclusões e Recomendações	77
Referências Bibliográficas	79
Anexo I – PLEDS para Condição de Mar 11 e 12	83
Anexo II - PLEDS para Condição de Mar 21	86
Anexo III- PLEDS para Condição de Mar 22	89

CAPÍTULO 1

Motivação e objetivos

As características direcionais das ondas do mar são informações de grande relevância em numerosos campos da ciência e da engenharia. No desenvolvimento e validação de modelos de previsão, no estudo de interações oceano-atmosfera, na estimativa do transporte de sedimento em regiões costeiras, no projeto de estruturas e obras marítimas, os parâmetros de direção média e distribuição relativa da energia subsidiam uma vasta gama de aplicações práticas.

Em engenharia naval e oceânica, a preocupação com parâmetros direcionais das ondas do mar é uma evolução relativamente recente. O recrudescimento das normas de segurança sobre a navegação e de operações sobre o mar, e o desenvolvimento de projetos exploração de hidrocarbonetos em águas oceânicas cada vez mais profundas exigem um nível crescente de conhecimento sobre o comportamento de sistemas oceânicos em função da distribuição relativa da energia das ondas. Nesse sentido, uma vez que simulações de cargas dinâmicas com base no espectro unidirecional de onda induzem a uma super-estimação de respostas, o espectro com conteúdo direcional estabelece-se como ferramenta essencial na reprodução de estados de mar “reais” para a análise das interações com embarcações e estruturas marítimas.

A questão central na análise direcional de ondas está no fato de que a energia transferida à superfície do mar pelos ventos espalha-se em torno de uma direção principal, sendo este espalhamento (do inglês *spread*), doravante chamado de dispersão direcional, um parâmetro importante na descrição do estado de mar. A multidirecionalidade de um estado de mar também é resultado da combinação de ondulações geradas por situações meteorológicas distintas. Sob o ponto de vista da engenharia, mesmo quando a mistura de “mares” induza a distorções na análise direcional, o cálculo do parâmetro de dispersão se faz necessário para descrever o mar “real”, sendo igualmente importante saber se o valor estimado está relacionado a um marulho isolado ou não.

A obtenção de informações direcionais de onda é feita atualmente por uma grande variedade de técnicas de medição e de análise de dados, dentre as quais destacam-se as baseadas na chamada bóia *pitch-roll*. De uma maneira geral, apesar do terem alcançado estágio operacional, as medições *in situ* de ondas ainda apresentam-se bastante dispendiosas em termos de tempo, esforço e recursos humanos e financeiros. Além disso, o limitado número de sensores característico da maioria dos instrumentos permitem somente obter um estimador dos parâmetros direcionais, como veremos adiante. Nestas condições, é permanente a preocupação em se atingir a maior acurácia possível na distribuição relativa de energia a partir de volumes limitados de dados.

Portanto, com base em dados de ondas oriundos de bóia *pitch-roll* operada pela PETROBRAS na Bacia de Campos, durante os anos de 1991 e 1995, o presente trabalho tem os seguintes objetivos:

1. Estimar valores de dispersão direcional das ondas de gravidade na Bacia de Campos por meio da técnica de reconstrução da distribuição de energia desenvolvida por PARENTE (1999), a chamada DAAT.

2. Avaliar o desempenho da DAAT em comparação com técnica convencional de análise espectral e com a parametrização do modelo do tipo *Cos2s*;
3. Investigar propriedades da técnica segundo diferentes implementações.

Visando abordar adequadamente o tema, o trabalho está organizado em 4 capítulos adicionais, conforme discriminado a seguir:

- No Capítulo 2 são apresentados o embasamento teórico das disciplinas envolvidas na medição e análise direcional de ondas e as conceituações e descrições dos termos, técnicas e formulações utilizadas;
- O Capítulo 3 apresenta a técnica DAAT e descreve os passos para a obtenção da distribuição direcional de energia e dos parâmetros direcionais de registros de onda derivados de bóia *pitch-roll*. Nesta seção, as propriedades da técnica são investigadas frente a cenários simulados e reais, sendo desenvolvido um estudo comparativo técnica convencional de análise direcional de ondas.
- No Capítulo 4, os dados do Campo de Marlim são finalmente analisados e valores típicos de dispersão direcional são sugeridos para os diferentes tipos de mares característicos.
- No Capítulo 5, por fim, são apresentadas as conclusões e sugestões do trabalho.

CAPÍTULO 2

Fundamentos Teóricos

2.1 Processos Estocásticos

Um registro seqüencial na forma de série temporal representa a realização de um processo ou fenômeno físico durante um determinado período de tempo através da amostragem da grandeza característica em intervalos regulares. Quando tal realização não permite descrição por relação matemática explícita, classifica-se o processo de origem como não-determinístico ou estocástico, formados por família de variáveis aleatórias, estatisticamente independentes, como tempo e espaço (OCHI, 1998).

Para a análise de séries de dados aleatórios, Estacionaridade e Ergodicidade são importantes conceitos a serem definidos. Um processo estocástico considera-se estritamente estacionário se a sua distribuição de probabilidade é completamente independente do tempo. Considera-se estacionaridade fraca (ou de segunda ordem) se a média e a variância são independentes do tempo. Os parâmetros estatísticos das amostras recolhidas de um processo estacionário podem variar devido à variabilidade da amostragem, mas não devido ao seu tamanho nem à sua posição na população. Já a Ergodicidade, segundo MELO (1982), está relacionada à propriedade pela qual as médias de um processo ao longo do tempo são iguais às médias ao longo do espaço amostral. Nestas condições, um processo estocástico ergódico pode ter suas propriedades estatísticas determinadas através da análise de uma única realização.

Segundo OCHI *op cit*, de acordo com a abordagem estocástica, as ondas em águas profundas são classificadas como um processo randômico Gaussiano, para qual a distribuição de probabilidade do deslocamento do nível do mar obedece a lei de distribuição normal. O autor propõe então que as ondas de gravidade sejam consideradas processos ergódigos e fracamente estacionários, de forma que suas propriedades estatísticas possam ser avaliadas pela análise da uma única série temporal.

2.2 Análise Espectral

O padrão de agitação em qualquer corpo d'água exposto à ação do vento contém oscilações em grande faixa de períodos, onde o comprimento das ondas e a direção de propagação também são bastante variáveis. A análise estatística de uma série temporal de elevação da superfície do mar consiste, portanto, no primeiro passo para a obtenção de informação útil dos dados. Entretanto, os descritores estatísticos convencionais, tais como a média, a variância, valores máximos, mínimos e significativos e não se prestam a avaliar a variabilidade do sinal em função de seu comportamento periódico.

Os fundamentos da análise espectral, ou análise no domínio da frequência, remontam à teoria desenvolvida por Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830), cuja premissa básica estabelece que uma série temporal de qualquer grandeza física finita $y(t)$, definida em um intervalo principal $[0, T]$, pode ser reproduzida pela soma de funções senos e cossenos, chamada Série de Fourier, segundo a expressão:

$$y(t) = \overline{y(t)} + \sum_p [A_p \cos(w_p t) + B_p \text{sen}(w_p t)] \quad (2.1)$$

onde $\overline{y(t)}$ é o valor médio do registro, A_p e B_p os coeficientes de Fourier e a frequência angular w_p são números inteiros ($p = 1, 2, \text{etc.}$) múltiplos da frequência fundamental $w = 2\pi/f = 2\pi/T$ sendo T é o tamanho da série temporal.

O conceito central das técnicas de análise espectral está no fato de que a contribuição relativa de uma componente de determinada frequência à variância total da realização é uma medida de importância dessa componente particular no sinal observado. Sabendo que variância de um registro de ondas está diretamente associada à energia média do processo (KINSMAN, 1965), o conjunto de coeficientes de Fourier permite a construção de um periodograma, o qual define a contribuição de cada componente periódica na energia total.

A curva descrita por este periodograma, chamada da Função de Densidade Espectral (FDS), Espectro de Energia ou simplesmente espectro, descreve, portanto, o estado de mar através da magnitude da energia das ondas em função da frequência das oscilações. A energia média \overline{E} de uma realização, por sua vez, corresponde a área sobre a FDS, representada por $S(f)$, conforme a expressão:

$$\overline{E} = \int_0^{\infty} S(f) df \quad (2.2)$$

Espectros de estados de mar reais comumente apresentam um valor máximo, o pico principal, e um ou mais valores máximos relativos, os picos secundários, indicando as frequências dominantes em termos de conteúdo energético. Contudo, tal informação não pode ser interpretada em sob o ponto de vista da ocorrência relativa, o que somente pode ser feita através da análise no domínio da probabilidade.

A estimação da $S(f)$ por técnicas não-paramétricas, isto é, calculada com base nos dados, recaem em 2 métodos distintos, os quais baseiam-se na assunção de estacionaridade do processo de agitação e, portanto, na manutenção da relação de variância e auto-correlação da realização com sua energia média ($\sigma^2 = R_{zz}(0) = \bar{E}$):

- Método Indireto: propagado por BLACKMAN *et al* (1958) através da Transformada de Fourier da função de auto-correlação (C_{zz}) da série de elevação ($z(t)$);

$$S(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{zz}(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (2.3)$$

$$R_{zz}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T z(t) z(t+\tau) dt \quad (2.4)$$

onde, para processos estacionários, de média zero: $C_{zz}(\tau) = R_{zz}(\tau)$.

- Método Direto: construção do periodograma pela obtenção dos componentes de frequência diretamente pela Transformada de Fourier da série temporal $z(t)$, segundo as expressões:

$$S(f) = \frac{1}{T} |X(f)|^2 \quad (2.5)$$

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} z(t) e^{-i2\pi f \frac{1}{N\Delta t} t} dt \quad (2.6)$$

onde $X(f)$ é a Transformada de Fourier de $z(t)$.

Vale ressaltar que o método direto é amplamente difundido na comunidade científica visto a maior performance do cálculo através do algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT) de COOLEY & TUKEY (1965).

2.3 Espectro Direcional

Enquanto o Espectro de Energia de ondas pressupõe a superposição linear das várias componentes periódicas independentemente de suas direções de propagação, a Função de Densidade Espectral Direcional $S(f, \theta)$, ou Espectro Direcional, apresenta uma descrição mais completa e acurada da distribuição da energia de ondas de gravidade em função das freqüências de oscilação e direção de propagação.

Na descrição estocástica de ondas em mares aleatórios, assim como explanado para a expressão (2.2), a energia média total das várias componentes de freqüência e direção é dada pela expressão fundamental:

$$\bar{E} = \sum_{\Delta f} \sum_{\Delta \theta} \frac{1}{2} a_j = \int_0^{\infty} \int_{-\pi}^{\pi} S(f, \theta) df d\theta \quad (2.7)$$

onde $S(f, \theta)$ representa o Espectro Direcional da realização.

O método convencional para a obtenção do $S(f, \theta)$ é, segundo BORGMAN (1969) através do produto do espectro unidirecional de energia $S(f)$ com a Função de Dispersão Direcional $D(f, \theta)$, escrito por:

$$S(f, \theta) = S(f) D(f, \theta) \quad (2.8)$$

onde $D(f, \theta)$ indica o espalhamento da energia em uma dada freqüência em torno da direção principal de propagação, podendo ser considerada uma função de densidade de probabilidade dentro de um intervalo de largura 2π , satisfazendo à condição:

$$\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} D(f, \theta) d\theta = 1 \quad (2.9)$$

2.4 Dispersão Direcional

A dispersão direcional de energia consiste numa propriedade fundamental das ondas do mar, sendo elemento chave no entendimento de sua mecânica, dos processos de geração, propagação e decaimento (MASSEL & BRINKMAN, 1998).

As características direcionais do espectro de energia podem ser estimadas através de métodos paramétricos e não-paramétricos. No primeiro grupo, modelos probabilísticos são ajustados aos dados através da estimação dos parâmetros de forma: a direção principal e a dispersão em torno desta. Os métodos não-paramétricos baseiam-se na reconstrução da distribuição de energia a partir dos dados medidos, através dos princípios tradicionais de Fourier e por técnicas avançadas e de melhor resolução como o Método de Máxima Entropia (MEM). Em ambas as abordagens, o produto final da análise consiste na Função de Dispersão Direcional $D(f, \theta)$.

2.4.1 Métodos Não-paramétricos

Reconstrução pela Transformada de Fourier

Consiste no método tradicional de reconstrução da distribuição relativa da energia das ondas através da análise espectral de dados direcionais. Segundo LONGET-HIGGINS *et al* (1963), a função de dispersão $D(f, \theta)$ pode ser escrita através da seguinte Série de Fourier:

$$D(f, \theta) = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{1}{2} \sum_p^{\infty} A_n(f) \cos(n\theta) + B_n(f) \sin(n\theta) \right\} \quad (2.10)$$

onde, $A_n(f)$ e $B_n(f)$ são os coeficiente de Fourier para $n = 1, 2, \dots$

$$A_n(f) = \int_0^{2\pi} D(f, \theta) \cos(n\theta) d\theta = \frac{1}{S(f)} \int_0^{2\pi} S(f, \theta) \cos(n\theta) d\theta \quad (2.11)$$

$$B_n(f) = \int_0^{2\pi} D(f, \theta) \sin(n\theta) d\theta = \frac{1}{S(f)} \int_0^{2\pi} S(f, \theta) \sin(n\theta) d\theta \quad (2.12)$$

Nesta, os quatro primeiros coeficientes $A_1(f)$, $B_1(f)$, $A_2(f)$ e $B_2(f)$ podem ser obtidos diretamente dos dados através dos espectros cruzados e auto-espectros das séries de elevação e deslocamento obtidas por bóias *pitch-roll*, conforme será abordado adiante.

Reconstrução pelo Método da Máxima Entropia (MEM)

As técnicas de Máxima Entropia têm como objetivo melhorar a resolução espacial de uma análise espectral estendendo a série temporal disponível. Esta técnica justifica-se na análise direcional de ondas através das bóias *pitch-and-roll* visto pequeno número de sensores limitarem a quantidade de amostras.

De acordo com KOBUNE & HASHIMOTO (1986), a Entropia M corresponde a função de densidade de probabilidade da função de dispersão $D(f, \theta)$, onde esta é determinada maximizando-se a Entropia, definida por:

$$M = - \int_0^{2\pi} D(f, \theta) \ln D(f, \theta) d\theta \quad (2.13)$$

LYGRE & KROGSTAD (1986) propuseram um método pelo qual a Máxima Entropia é calculada a partir dos coeficientes de sua expansão de Fourier através da seguinte expressão:

$$2\pi D(f, \theta) = \frac{1 - \phi_1 c_1^* - \phi_2 c_1^*}{|1 - \phi_1 e^{-i\theta} - \phi_2 e^{-i2\theta}|^2} \quad (2.14)$$

onde: $c_1 = A_1 + jB_1$; $c_2 = A_2 + jB_2$; $\phi_1 = \frac{(c_1 - c_2 c_1^*)}{(1 - |c_1|^2)}$ (2.15); $\phi_2 = c_2 - c_1 \phi_1$ (2.16)

Pela MEM, $D(f, \theta)$ é uma curva entre 0 e 2π onde o máximo corresponde a direção principal. Essa, por sua vez, pode ser determinada diretamente pelo valor mínimo do denominador da expressão, uma vez que o numerador não depende de θ

2.4.2 Métodos Paramétricos

Os modelos ou formas funcionais paramétricas de dispersão direcional mais referenciados em literatura são assim apresentados:

Modelo Cos^{2s}

Proposto por LONGET-HIGGINS *et al* (1963), este é o modelo mais amplamente utilizado em aplicações de engenharia e análise de dados em ciências oceânicas, apresentando a seguinte formulação:

$$D_1(f, \theta) = G(s) \cos^{2s} \left(\frac{\theta - \theta_0}{2} \right) \quad (2.17)$$

$$G(s) = \frac{2^{2s} \Gamma^2(s+1)}{2\pi \Gamma(2s+1)} \quad (2.18)$$

onde $G(s)$ é uma função de normalização e o parâmetro s é um número real e positivo que controla o grau de concentração da energia em torno da direção média θ_0 .

Os valores de θ_0 e s são estimados a partir dos dados através dos coeficientes de Fourier da função de dispersão. O gráfico da Figura 2.1 mostra a função de dispersão direcional segundo diferentes valores para o parâmetro s para $\theta_0 = 0^\circ$.

Em realidade, s é dependente da frequência, da velocidade do vento e do tamanho da pista das ondas, como será abordado adiante pelo Modelo de Mitsuyasu. Outros autores apresentam ainda correlações importantes entre o parâmetro de dispersão e parâmetros estatísticos mensuráveis das ondas (WANG, 1992, GODA, 1985).

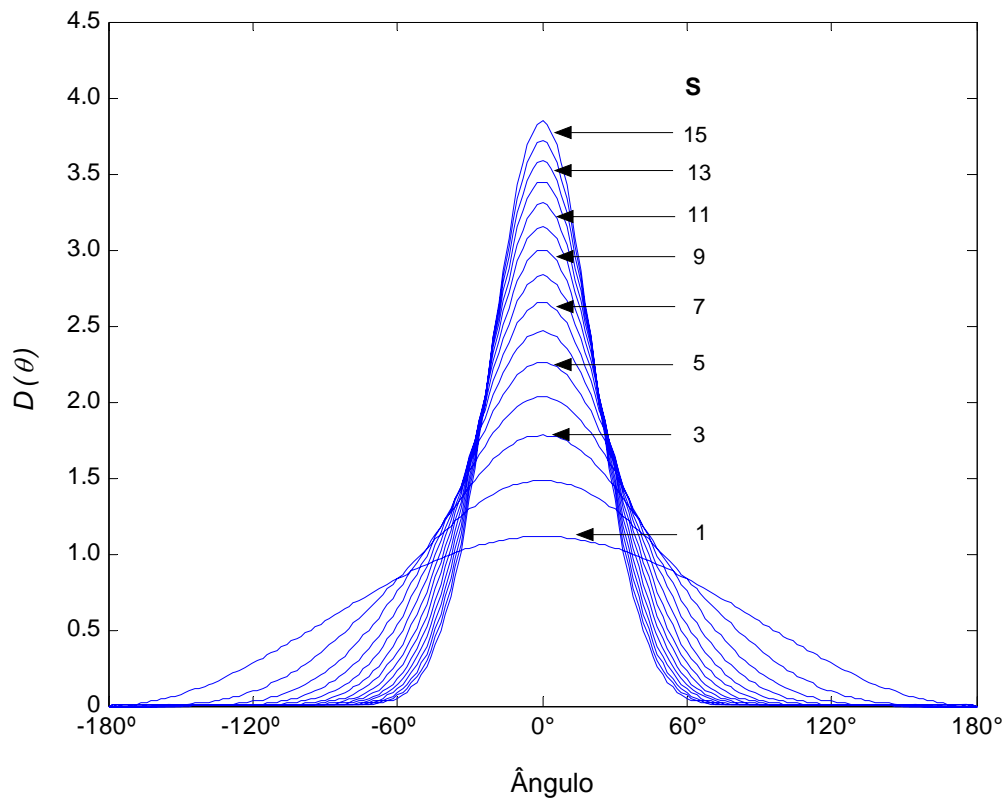


Figura 2.1: Curvas de $D(\theta)$ em função de valores de s e $\theta_0 = 0^\circ$.

Modelo de Mitsuyasu

Dados reais de medições direcionais de ondas revelaram que a dispersão direcional é menor em torno da frequência de pico espectral (f_p) e aumenta consideravelmente em direção a baixas e altas frequências. MITSUYASU *et al.* (1975) formularam um modelo variável de dispersão direcional em termos do parâmetro s .

$$s = \begin{cases} s_{\max} (f/f_p)^5 : f \leq f_p \\ s_{\max} (f/f_p)^{-2.5} : f > f_p \end{cases} \quad (2.19)$$

Esses autores determinaram os valores para o parâmetro s_{\max} em função da velocidade de vento compreendendo a faixa de 5 a 30, com a média de 10 para condições de mar local. Para aplicações de engenharia, GODA & SUZUKI (1975) *apud* GODA (1999) propuseram tentativamente os seguintes valores para mar local e vagas:

$$s_{\max} = \begin{cases} 10 : \text{mar local} \\ 25 : \text{marulho de geração próxima} \\ 75 : \text{marulho de geração distante} \end{cases} \quad (2.20)$$

Uma vez relacionada ao parâmetro s do modelo \cos^{2s} , a função de dispersão de Mitsuyasu é amplamente aplicada em engenharia em processos de interação de ondas aleatórias com estruturas marítimas. Os valores acima apresentados têm importância no presente estudo pois são utilizados como referência para a dispersão direcional de ondas na aplicação da técnica DAAT em dados simulados e na interpretação dos estimadores direcionais calculados para dados reais, como será visto adiante.

Wrapped Normal

BORGMAN (1984) *apud* GODA (1999) também propôs a seguinte função:

$$D_3(f, \theta) = \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^N \exp\left[-\frac{(n\sigma_\theta)^2}{2}\right] \cos(n\theta) \quad (2.21)$$

onde o número de termos de N deve ser o maior número inteiro não excedendo a relação $10/\sigma_\theta < 100$, e o parâmetro σ_θ , em radianos, é o desvio padrão circular da função:

$$\sigma_\theta^2 = \int_{-\pi}^{\pi} (\theta - \theta_0) D(f, \theta) d\theta \quad (2.22)$$

Von-Mises ou Circular-Normal

BORGMAN (1965) *apud* GODA (1999) utilizou uma função de dispersão direcional em seus estudos de ondas aleatórias onde k é um parâmetro de dispersão, I_0 é uma função de Bessel de primeira ordem modificada e θ_p é a direção principal.:

$$D_2(f, \theta) = \frac{\exp\left[k \cos(\theta - \theta_p)\right]}{2\pi I_0(k)} \quad (2.23)$$

Secante Hiperbólico

DONELAN *et al.* (1985) aplicou este modelo a dados direcionais no lugar do \cos^{2s} , onde tanto o parâmetro β quanto à direção média θ são variáveis em frequência.

$$D_4(f, \theta) = \frac{1}{2} \beta \operatorname{sech}^2(\beta\theta) \quad (2.24)$$

2.3.3 Parâmetros Direcionais

Segundo KUIK *et al.* (1988), descritores estatísticos convencionais não são convenientemente definidos para distribuições circulares como $D(\theta)$, onde:

$$\begin{cases} D(\theta) \geq 0 \\ D(\theta + 2\pi) = D(\theta) \end{cases} \quad \text{para } -\infty < \theta < \infty \quad (2.25)$$

e, dentro de um intervalo de largura 2π :

$$\int_{\alpha-\pi}^{\alpha+\pi} D(f, \theta) d\theta = 1$$

Com base em BORGMAN (1969) e MARDIA (1972), os quais definem os parâmetros estatísticos direcionais a partir dos momentos trigonométricos dos dados e, portanto, derivados dos coeficientes centrais de Fourier, KUIK *op cit* propôs o cálculo de direção média e desvio padrão circular diretamente a partir da análise dos dados de bóias do tipo *pitch-roll*, conforme as seguintes expressões:

$$\text{Direção média, } \theta_0(f) = \arctan\left(\frac{B_1}{A_1}\right) \quad (2.26)$$

$$\text{Desvio padrão circular, } \sigma_\theta(f) = \sqrt{2(1-m_1)} \quad (2.27)$$

$$m_1 = \sqrt{(A_1)^2 + (B_1)^2} \quad (2.28)$$

onde m_1 representa o primeiro momento trigonométrico, enquanto $A_1(f)$, $B_1(f)$, $A_2(f)$ e $B_2(f)$ são os coeficientes de Fourier da expansão da função de dispersão direcional $D(f, \theta)$, conforme equações 2.11 e 2.12.

A fundamentação para tais formulações é encontrada no campo da análise dados circulares, conforme apresentado detalhadamente por FISHER (1993). Segundo esse autor, o caminho natural para a combinação de n vetores, como os dados direcionais, é através da adição vetorial pelas componentes trigonométricas, onde a direção média θ_0 dos vetores é dada pela seguinte relação:

$$\theta_0 = \arctan\left(\frac{S}{C}\right), \text{ onde } S = \sum_{i=1}^n \text{sen}\theta_i \text{ e } C = \sum_{i=1}^n \text{cos}\theta_i \quad (2.29)$$

Já a variância circular V , o qual determina o grau de concentração da distribuição, é escrita por:

$$V = 1 - \bar{R}, \text{ onde } \bar{R} = R/n \text{ e } R = \sqrt{C^2 + S^2} \quad (2.30)$$

O desvio padrão circular σ descreve, em analogia ao desvio padrão da estatística linear, o grau de dispersão de dados circulares em torno de sua média. Sua formulação, entretanto, difere da conhecida raiz quadrática da variância V , sendo dada por:

$$\sigma_\theta = \sqrt{-2 \log(1-V)}, \text{ ou alternativamente, } \sigma_\theta \cong \sqrt{2(1-\bar{R})} \quad (2.31)$$

A expressão 2.27 é deduzida da 2.31 com base na determinação do momento central de ordem 1 (m_1), obtido do momento trigonométrico relativo a direção média:

$$m_1 = (1/n) \sum_{i=1}^n \text{cos}(\theta_i - \theta_0) + i(1/n) \sum_{i=1}^n \text{sen}(\theta_i - \theta_0) = \bar{R} \quad (2.32)$$

pois: $(1/n) \sum_{i=1}^n \text{sen}(\theta_i - \theta_0) = 0$ e $(1/n) \sum_{i=1}^n \text{cos}(\theta_i - \theta_0) = \bar{R}$ (2.33)

No caso de dados de agitação marítima, interpreta-se o desvio padrão circular como a largura angular em torno da direção média na qual distribui-se a energia das ondas em determinada frequência, representando assim o parâmetro de dispersão da realização, Com base nesse entendimento, KUIK *op cit.* relacionou-o ao parâmetro s do modelo de LONGET-HIGGINS (2.16), obtendo a seguinte expressão:

$$\sigma_{\theta} = \left(\frac{2}{s+1} \right)^{1/2} \quad (2.34)$$

Considerando que as grandezas s , k , β nos modelos paramétricos apresentados também prestam-se a indicar o grau de dispersão dos dados, GODA (1999) desenvolveu um estudo comparativo de forma a estabelecer relações empíricas com o desvio padrão circular, lembrando que na forma *Wrapped Normal*, o parâmetro de dispersão é o próprio desvio padrão circular σ :

$$\sigma_{\theta} = \left(\frac{2}{0,23+1,92k} \right)^{1/2} \quad (2.35)$$

$$\sigma_{\theta} = \left(\frac{2}{1+2,04(\beta+0,3)^2} \right)^{1/2} \quad (2.36)$$

Outra forma de estimar a dispersão de dados circulares é através do intervalo angular no qual a função de dispersão direcional assume metade do valor de pico. Tal parâmetro, chamado ângulo de 3db (PARENTE, 1999), consiste na representação física da largura angular na metade da ordenada máxima. O ângulo de 3db (σ_{3db}) também pode ser relacionado aos parâmetros de dispersão das formas paramétricas, bem como ao desvio padrão circular (GODA *op cit*):

$$\sigma_{3db} = \sqrt{2 \ln 2} \sigma_{\theta} \quad (2.37)$$

$$\sigma_{3db} = 2 \arccos(0,5^{1/2s}) \quad (2.38)$$

$$\sigma_{3db} = \arccos \left[1 - \frac{1}{k} \ln 2 \right] \quad (2.39)$$

$$\sigma_{3db} = \frac{50,5^\circ}{\beta} \quad (2.40)$$

Os autores citados descrevem outras medidas de localização e de dispersão de dados circulares, tais como direção modal e mediana e curtose as quais também podem ser definidas em termos de momentos trigonométricos. Entretanto, para os propósitos deste estudo, serão abordadas apenas as técnicas de cálculo da dispersão angular pelo desvio padrão circular e ângulo de 3db.

2.5 Medições Direcionais

As formulações matemáticas para a medição direcional de ondas foram desenvolvidas nos anos 50 e 60 e aplicadas a diferentes técnicas de instrumentação. De uma forma geral, tais técnicas baseiam-se no registro e análise espectral cruzada de séries simultâneas de dados de grandezas estatisticamente independentes.

No caso das bóias *pitch-roll*, desenvolvida a partir dos estudos de LONGET-HIGGINS *et al.* (1963), os dados medidos consistem nas séries temporais da elevação da superfície (η) e nos deslocamentos em direções ortogonais (η_x e η_y), representadas pelas expressões simplificadas da onda monocromática (BORGMAN, 1982):

$$\eta(t) = \alpha \cos(kx \cos \theta + ky \sin \theta - wt + \varphi) \quad (2.41)$$

$$\eta_x(t) = \frac{\delta \eta}{\delta x} = -\alpha k \cos \theta \sin(kx \cos \theta + ky \sin \theta - wt + \varphi) \quad (2.42)$$

$$\eta_y(t) = \frac{\delta \eta}{\delta y} = -\alpha k \sin \theta \sin(kx \cos \theta + ky \sin \theta - wt + \varphi) \quad (2.43)$$

onde, α é a amplitude de elevação, k é número de onda definido segundo a Teoria Linear de Onda pela razão entre 2π e o comprimento (λ) da onda, ω é a frequência angular da oscilação e φ é a fase.

Nesse instrumento as séries são registradas a partir da conversão de sinais de aceleração, medidos por par de acelerômetros, sobre os eixos da referência da bóia (x , y e z) por meio das informações do sensor HIPPY (*heave-pitch-roll*). Depois de corrigidas para os eixos magnéticos, tais as acelerações são então digitalmente integradas e filtradas para a obtenção dos valores de deslocamentos finais (STEPHEN & KOLSSTAD, 1991).

Para a análise direcional, assume-se então a função de dispersão direcional $D(f, \theta)$ por sua expansão em série de Fourier (equação 2.10), para a qual os primeiro quatro coeficientes $A_1(f)$, $B_1(f)$, $A_2(f)$, $B_2(f)$ e o número de onda k são obtidos diretamente dos dados, através dos espectros cruzados e auto-espectros das séries da bóia:

$$A_1(f) = \int_0^{2\pi} D(f, \theta) \cos(\theta) d\theta = \frac{Q_{zx}(f)}{k(f) C_{zz}(f)} \quad (2.44)$$

$$B_1(f) = \int_0^{2\pi} D(f, \theta) \sin(\theta) d\theta = \frac{Q_{zy}(f)}{k(f) C_{zz}(f)} \quad (2.45)$$

$$A_2(f) = \int_0^{2\pi} D(f, \theta) \cos(2\theta) d\theta = \frac{C_{xx}(f) - C_{yy}(f)}{k(f)^2 C_{zz}(f)} \quad (2.46)$$

$$B_2(f) = \int_0^{2\pi} D(f, \theta) \sin(2\theta) d\theta = \frac{2C_{xy}(f)}{k(f) C_{zz}(f)} \quad (2.47)$$

$$k(f) = \left\{ \frac{C_{xx}(f) + C_{yy}(f)}{C_{zz}(f)} \right\}^{1/2} \quad (2.48)$$

onde as séries são identificadas como: $\eta_x = x$, $\eta_y = y$, $\eta = z$. Nas formulações, C representa os auto-espectros e Q os espectros de quadratura das séries, que são assim definidos:

$$C_{zz}(f) = \int_0^{2\pi} S(f, \theta) d\theta = S(f) \quad Q_{zz}(f) = 0 \quad (2.49)$$

$$C_{xx}(f) = k^2 \int_0^{2\pi} \cos^2 \theta S(f, \theta) d\theta \quad Q_{xx}(f) = 0 \quad (2.50)$$

$$C_{yy}(f) = k^2 \int_0^{2\pi} \sin^2 \theta S(f, \theta) d\theta \quad Q_{yy}(f) = 0 \quad (2.51)$$

$$C_{zx}(f) = 0 \quad Q_{zx}(f) = k \int_0^{2\pi} \cos \theta S(f, \theta) d\theta \quad (2.52)$$

$$C_{zy}(f) = 0 \quad Q_{zy}(f) = k \int_0^{2\pi} \sin \theta S(f, \theta) d\theta \quad (2.53)$$

$$C_{xy}(f) = k^2 \int_0^{2\pi} \cos \theta \sin \theta S(f, \theta) d\theta \quad Q_{xy}(f) = 0 \quad (2.54)$$

Pelo exposto, a Função de Densidade Espectral Direcional (2.8) é reescrita para os quatro primeiros coeficientes ($n = 1$ e 2) da seguinte forma:

$$S(f, \theta) = C_{zz}(f) \left\{ \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2} + \frac{Q_{zx}(f)}{k(f) C_{zz}(f)} \cos \theta + \frac{Q_{zy}(f)}{k(f) C_{zz}(f)} \sin \theta + \frac{C_{xx}(f) - C_{yy}(f)}{k(f)^2 C_{zz}(f)} \cos 2\theta + \frac{2C_{xy}(f)}{k(f) C_{zz}(f)} \sin 2\theta \right] \right\} \quad (2.55)$$

para os quatro primeiros coeficientes, que são utilizados, portanto, para o cálculo dos parâmetros direcionais expressos pelas equações 2.26, 2.27, e 2.28.

CAPÍTULO 3

A Técnica DAAT

3.1 Conceitos Gerais

A Técnica DAAT, acrônimo para “Análise Direcional com Técnicas Adaptativas”, foi desenvolvida PARENTE (1999) visando aprimorar a resolução espacial da análise dados direcionais oriundos de bóias do tipo *pitch-roll*.

A filosofia central da DAAT é detectar, para uma determinada faixa de frequência e período de tempo (ou conjunto de segmentos), a ocorrência de uma condição estável do mar em direção e computar seu respectivo valor de espectro, obtendo (reconstruindo) ao final do processamento uma distribuição direcional de energia $D_f(\theta)$. Dentro do escopo do presente trabalho, esta distribuição permitirá, então, a investigação da dispersão direcional nos dados segundo as metodologias já descritas.

De uma forma geral, as técnicas espectrais baseadas na reconstrução da distribuição de energia estimam os diferentes parâmetros a partir da promediação de segmentos fixos e consecutivos da série temporal original. Tal procedimento, chamado de alisamento do espectro, visa reduzir variância do estimador ressaltando as componentes invariantes do processo, dito estacionário, em detrimento das características variantes, como o ruído.

O ruído nos dados de ondas medidos por bóias pode ter várias origens. Algumas delas, como respostas incorretas do sistema de medição, influência do sistema de fundeio e interferência da estrutura, estão diretamente relacionadas ao método de medição e as características do instrumento. Já processos naturais como a mistura de mares de diferentes direções e a advecção de ondas por correntes, por exemplo, tendem a produzir interações não-lineares e distorções no campo de ondas. O benefício da técnica de alisamento está, portanto, na redução da importância relativa de tais situações, melhorando a confiança estatística do estimador.

Mesmo na ocorrência de um único “mar”, ondulações de frequência e direções próximas acabam por combinar-se construtiva e destrutivamente, produzindo valores de espectro mais altos e mais baixos, respectivamente, para os diversos segmentos da série temporal. Também neste caso, o alisamento do espectro acaba por mascarar eventos isolados de interesse, onde há dominância de uma frequência e uma direção.

Por este motivo, o esquema de alisamento aplicado pela DAAT seleciona os segmentos que irão compor a média, evitando que momentos de estabilidade em direção e frequência do registro sejam mascarados no resultado final. Assim, a DAAT calcula os parâmetros espectro de energia e direção principal através das formulações da Transformada de Fourier para cada segmento de m pontos do registro, com avanço de 1 mostra (Δt amostral). O conjunto de segmentos é então avaliado segundo critérios estatísticos pré-definidos e aqueles considerados com pouco ruído, estáveis em direção, são selecionados para o cálculo final da distribuição de energia.

Os gráficos das Figuras 3.1 e 3.2 mostram a variação da direção principal e espectro para os 100 primeiros segmentos de 16 pontos amostrais, com avanço de 1 amostra, de um registro de onda obtida por bóia do tipo *pitch-roll*. Enquanto que na Figura 3.1 percebe-se momentos de relativa estabilidade direcional, na Figura 3.2 há

pontos onde o valor de espectro aproxima-se de zero, indicando alta instabilidade de direção é valores erráticos correspondentes direção e número de onda.

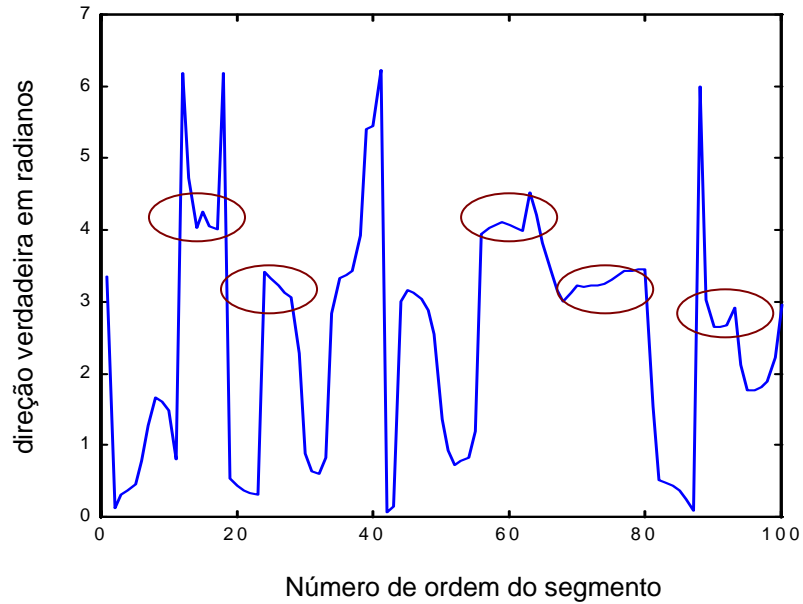


Figura 3.1: Valores de direção principal para os 100 primeiros segmentos de um registro. Regiões demarcadas pelas elipses indicam estabilidade direcional.

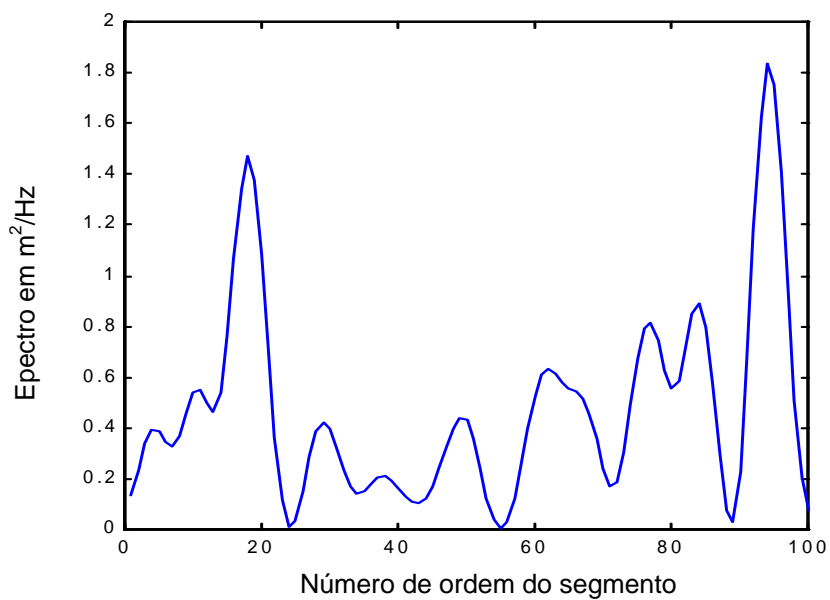


Figura 3.2: Espectro de energia para os 100 primeiros segmentos de 16 pontos de um registro de 1024 pontos. A frequência central é de 0,125 Hz (8 segundos).

Quanto à resolução em frequências obtida pela DAAT, sabe-se que quanto menor o tamanho do segmento maior a chance de se detectar um evento de relativa estabilidade direcional, conforme definido anteriormente. Por outro lado, quanto menor o segmento pior a resolução em frequência do processamento. A solução de compromisso da técnica está em aceitar uma determinada degradação na resolução desde que a faixa de frequências resolvida pelo tamanho dos segmentos seja capaz de descrever o tipo de mar em estudo. Um critério básico adotado pela DAAT consiste em utilizar tamanhos de segmentos correspondentes a dois ciclos da onda da frequência central das faixas consideradas.

A mais recente implementação da DAAT, utilizada no presente estudo, determina as faixas de frequências a serem investigadas com base na análise prévia do espectro de potência dos dados de onda. Desta maneira, o número e os limites em frequência das faixas são estabelecidos adaptativamente para as características energéticas de cada registro, ajustando o tamanho dos segmentos conforme as situações de mares associadas e a resolução necessária. Como exemplo, caso a análise espectral de um registro de elevação determine um período de pico de 13 segundos, tipicamente associado a marulhos distantes na Bacia de Campos, a adoção de segmentos de 26 pontos em intervalo amostral de 1segundo permite caracterizá-lo em resolução de $1/26\text{Hz}$ na faixa compreendida entre as frequências de oscilação de $3/52\text{Hz}$ (17,3s) a $5/52\text{ Hz}$ (10,4s). Adicionalmente, faixas centradas em $6/52\text{Hz}$ (8,7s) e $8/52\text{Hz}$ (6,5s), nesta mesma resolução, seriam capazes de descrever a energia do processo associada a outras situações de mares, como quase-local e local, respectivamente, caso estejam presentes.

Em suma, a propriedade fundamental da DAAT está na obtenção de informação com mais conteúdo direcional em função do sacrifício da resolução em frequência, através da detecção de eventos de curta duração, buscando detectar ondas de diferentes direções para uma mesma faixa.

3.2 Processamento

A DAAT trabalha com tamanhos de segmentos distintos, adaptados, visando à detecção de eventos relevantes ao longo do registro de onda. Assim, para cada faixa de frequência considerada, os parâmetros espectrais são calculados a partir das 3 séries temporais obtidas por instrumento de medição de ondas, com avanço de uma amostra para o segmento seguinte. Os valores de espectro dos segmentos selecionados via estabilidade direcional são acumulados em “caixas” de 1° para permitir a reconstrução da distribuição relativa de energia $D_f(\theta)$ e, então, o cálculo dos parâmetros direcionais de interesse.

Visando a melhor compreensão desta abordagem, são apresentadas nas seções a seguir as etapas envolvidas no processamento de dados de bóia do tipo *pitch-roll* (séries de elevação $\eta(t)$ e deslocamentos ortogonais $\eta_x(t)$ e $\eta_y(t)$, conforme abordado em 2.5) via técnica DAAT.

ETAPA 1: Cálculo de Parâmetros

Para cada segmento em análise, o valor do espectro é estimado via Transformada de Fourier da função de auto-correlação $C_{\eta\eta}$ de série de elevação da bóia $\eta(t)$, conforme expressões 2.2 e 2.3.

Para o cálculo da direção principal, foi empregado um artifício aliando a robustez da estimação via Transformada de Fourier com a precisão do Método de Máxima Entropia (MEM). Como a MEM produz dois valores máximos representativos da direção, pela inclusão do termo de 2ª ordem (2θ) na fórmula 2.13, admite-se como a direção do segmento aquele mais próximo ao estimado por Fourier, de referência.

Na figura 3.3 os valores de direção principal obtidos para os 100 primeiros segmentos de um registro através da MEM e da Transformada de Fourier são confrontados diretamente. Em seguida, a Figura 3.4 apresenta para esse mesmo conjunto de segmentos o resultado final da técnica combinada.

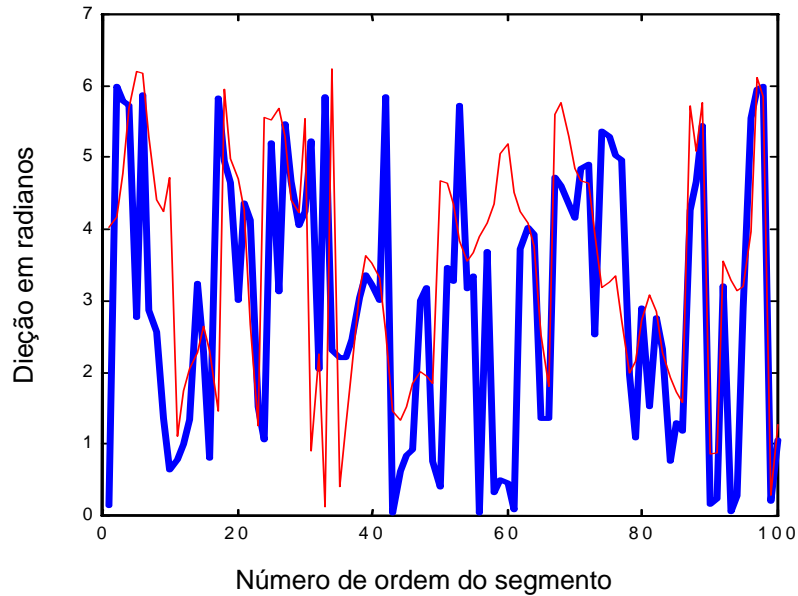


Figura 3.3: Direção principal calculada por Fourier, em vermelho, e MEM em azul.

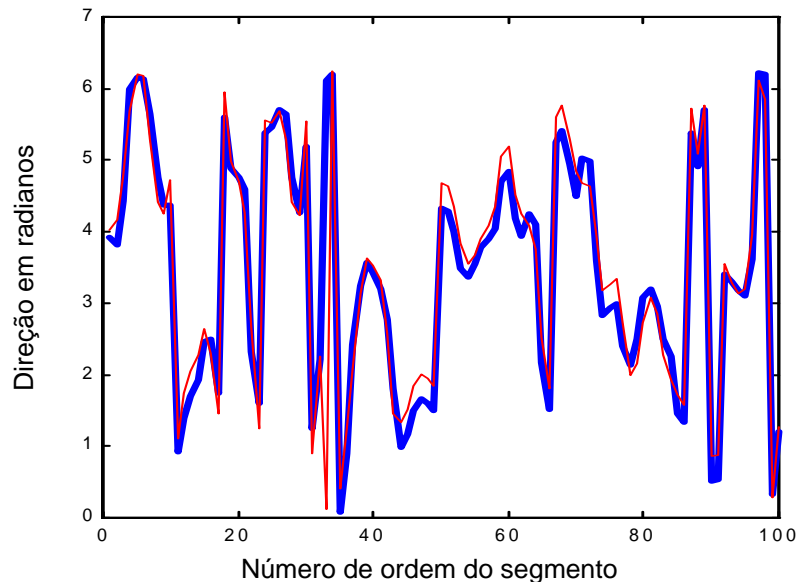


Figura 3.4: Valores de direção principal calculados pela técnica combinada (Fourier em vermelho e MEM com referência Fourier, em azul).

É válido ressaltar que a aplicação da MEM pela técnica convencional de reconstrução da distribuição de energia, a média tomada de segmentos fixos do registro acaba quantificando a direção principal sem ambigüidade. Entretanto, como na DAAT o valor individual de direção de cada segmento é importante na avaliação da ocorrência de eventos, a ambigüidade produzida pela MEM pode interferir na seleção dos segmentos utilizados nos cálculos seguintes do processamento.

ETAPA 2: Seleção de Segmentos

Ao final da 1ª etapa, haverá 2 séries calculadas para o conjunto de segmentos de cada registro: uma de direção principal e outra de espectro, como ilustrado pelas figuras 3.1 e 3.2. Nesta 2ª etapa, para as faixas de freqüências consideradas serão formados conjuntos de 16 e 8 segmentos, com avanço de 1 amostra para o conjunto seguinte, e será investigado o desvio padrão da média de direção desses conjuntos.

O gráfico da figura 3.5 explica melhor tal composição para o caso hipotético de um conjunto de 4 segmentos, e a figura 3.6 mostra a curva de desvio padrão de direção principal para os 100 primeiros conjuntos de um registro.

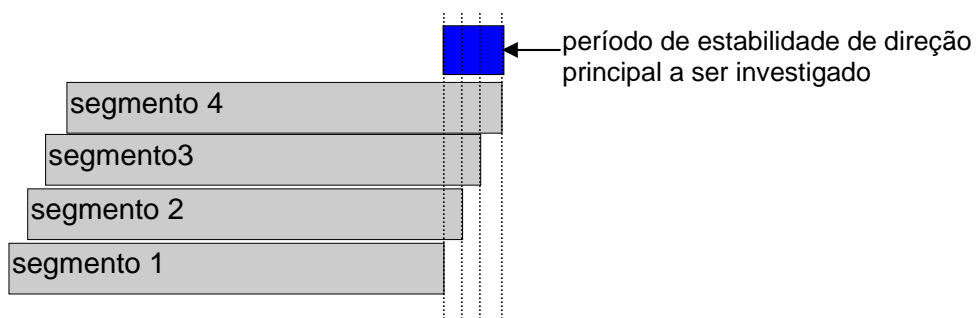


Figura 3.5: Estudo estatístico de um conjunto de 4 segmentos.

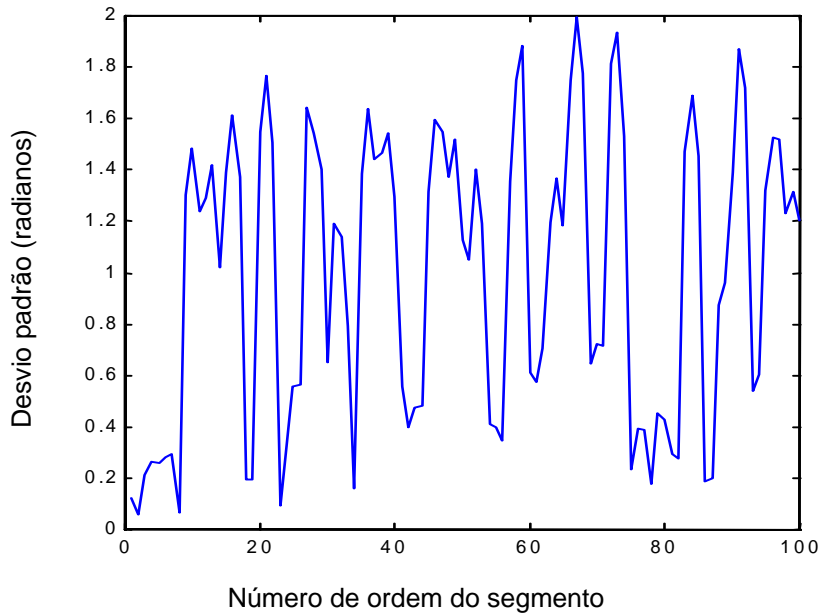


Figura 3.6: Valores de desvio padrão de conjuntos de 4 segmentos.

Como baixos valores de desvio padrão indicam estabilidade direcional no período de tempo compreendido pelos segmentos do conjunto, o ponto de partida da seleção é determinar um limiar de tolerância aos valores de desvio padrão de um registro. Com efeito, se o valor do desvio padrão está abaixo do limiar pré-estabelecido, o conjunto de segmentos - com seus respectivos valores de direção e de espectro - será selecionado. Se o limiar é baixo, restritivo, menos segmentos são selecionados. Haverá neste caso menos ruído na distribuição, mas corre-se algum risco de perda de uma direção secundária de menor energia. Gráficos de $D_f(\theta)$ construídos para diferentes valores do limiar são apresentados pela figura 3.7. Nesta, embora as direções principais (240° e 70°) sejam evidentes em todas as condições, observa-se um claro aumento de ruído com o aumento do valor do limiar.

No tocante à independência estatística, quanto maior o número de conjuntos, maior a superposição dos segmentos. Embora este fato não seja um problema para o cálculo da direção principal, haverá, no entanto, redundância no cálculo do “spread” e do número de graus de liberdade, que será eliminada conforme mostrado adiante.

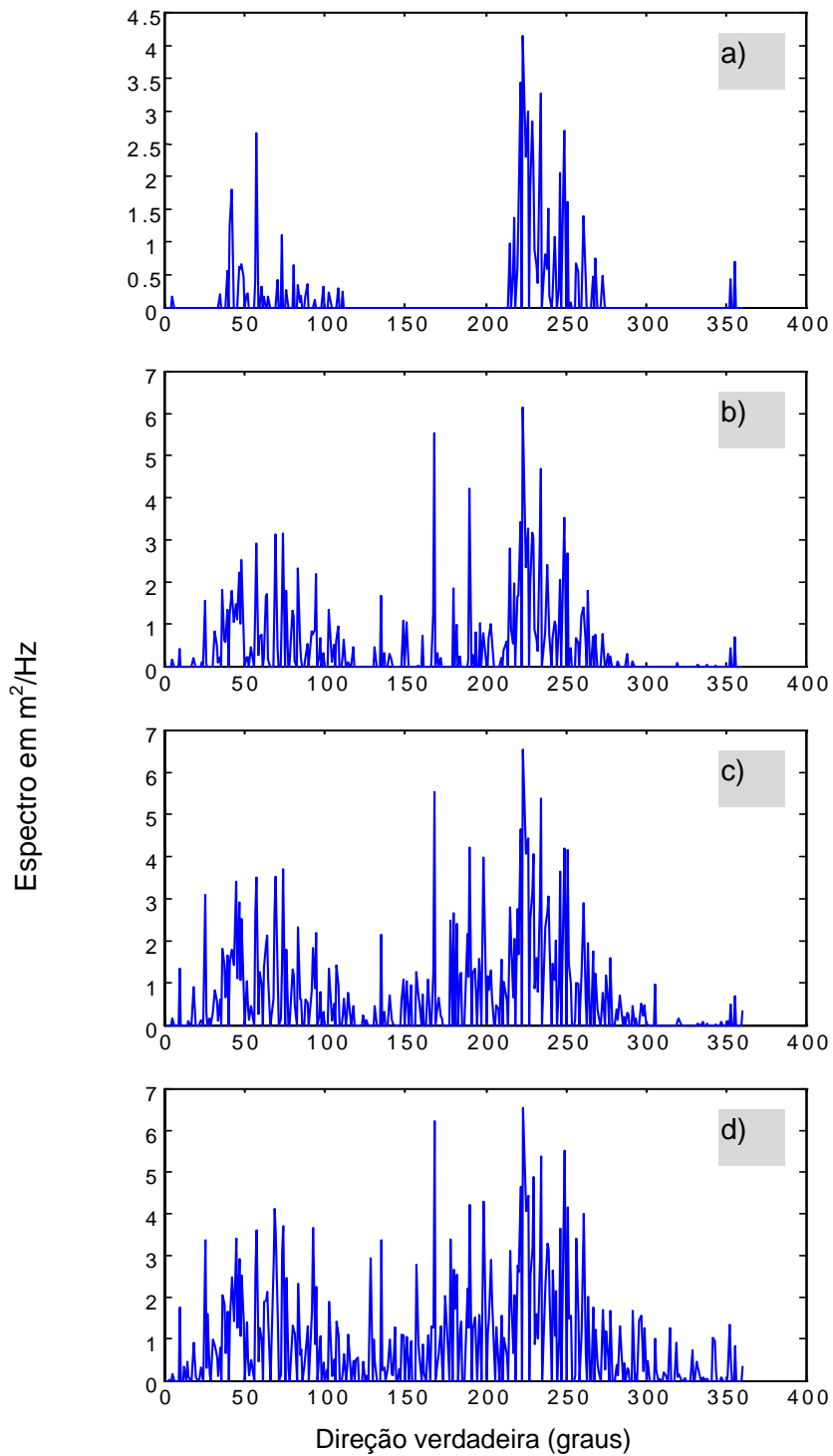


Figura 3.7: Exemplo de $D_f(\theta)$ para os seguintes os valores de limiar e número de conjuntos de 4 segmentos selecionados: a) limiar = 0.1, 34 conjuntos; b) limiar = 0.25; 83 conjuntos; c) limiar = 0.5; 137 conjuntos; d) limiar = 1; 174 conjuntos.

ETAPA 3: Acumulação dos Valores de Espectro

Os valores de espectro dos segmentos dos conjuntos selecionados são acumulados em “caixas” de 1°, no domínio de 1° a 360°. Neste momento será feita a correção de direção em referência ao norte geográfico pela declinação magnética local, no caso da Bacia de Campos, em torno de -23°. Em outra “caixa” é armazenado ainda o número de ocorrências de cada valor de direção, que será usado posteriormente no cálculo da dispersão e na avaliação dos graus de liberdade do estimador.

O resultado do acúmulo nas caixas, mostrado na Figura 3.10, consiste na distribuição $D_f(\theta)$, que será normalizada pelo valor de $S(f)$, calculado por Fourier da série de elevação, para a faixa de frequências analisada. Após a normalização, a curva resultante $S(f).D(\theta)$ representa o estimador do espectro direcional do método. No caso representado pela Figura 3.8 já se pode antecipar a existência de 2 direções principais: NE e SW.

Evita-se utilizar técnicas de filtragem para a determinação de direções preferenciais uma vez que podem introduzir alterações nos dados (uma filtragem passa-baixa é mostrada na figura em vermelho). Alternativamente, julga-se mais acertado reduzi-los para “caixas” de 20 graus, como ilustrado pela Figura 3.9.

Por fim, utilizando os valores acumulados de ocorrência de cada direção e descontando-se o período de tempo de superposição de segmentos, calcula-se o número de graus de liberdade (g.l.) do estimador de $D_f(\theta)$. O resultado, uma curva bem semelhante à da Figura 3.9, é mostrado na Figura 3.10 e indica, como se esperava, que os maiores valores de g.l. correspondem às direções principais.

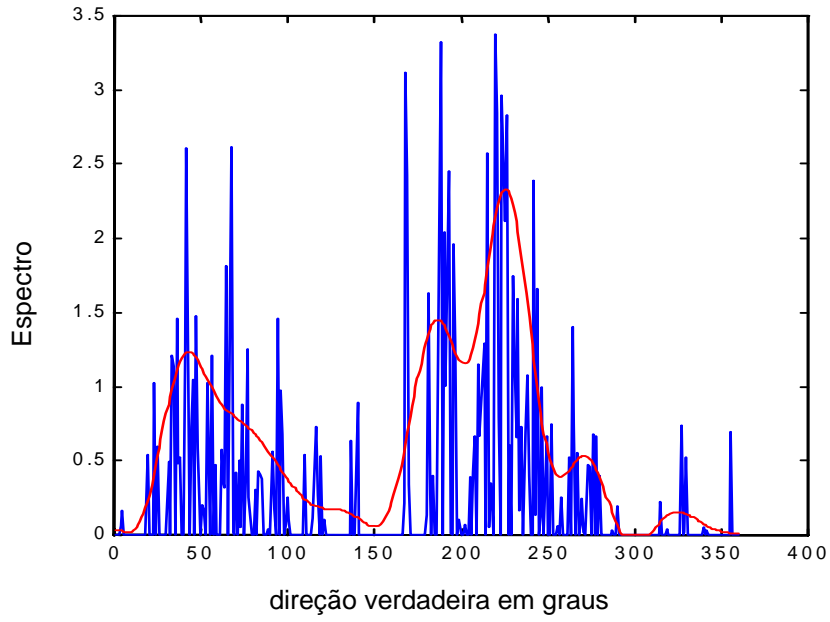


Figura 3.8: Resultado de acúmulo dos valores de espectro dos conjuntos de segmentos selecionados nas caixas de 1° e filtragem da curva através por filtro passa-baixa, em vermelho.

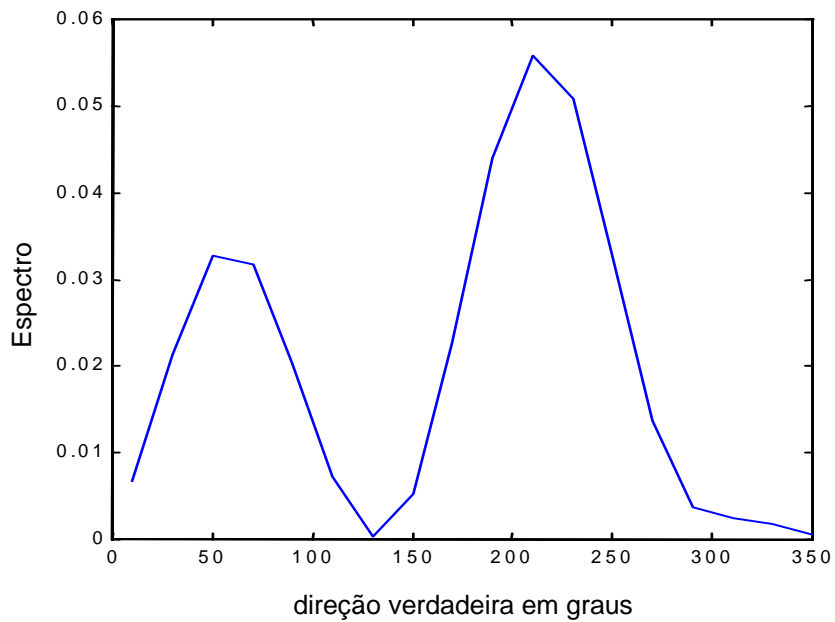


Figura 3.9: $D(\theta)$ já alisado e calculado com 18 valores (resolução de 20 graus).

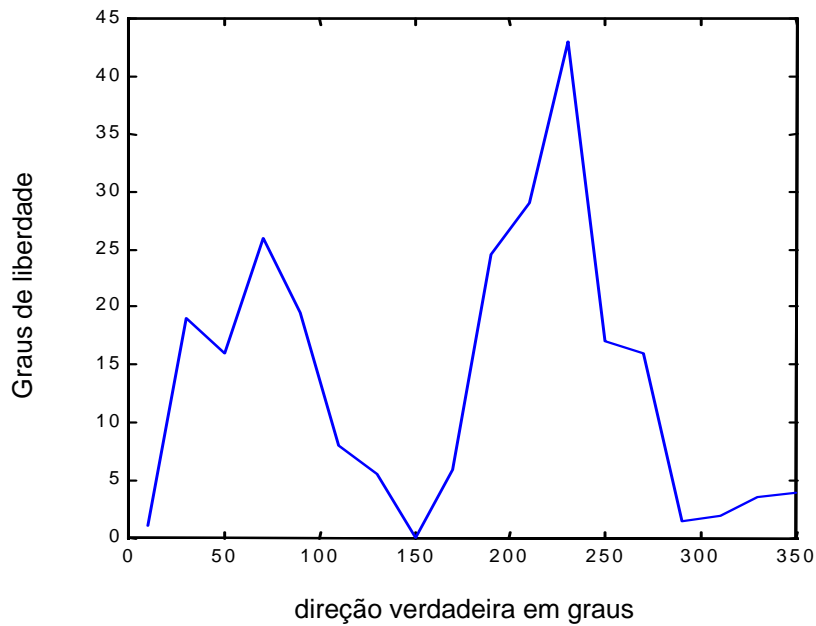


Figura 3.10: Grau de liberdade do estimador de $D_f(\theta)$ da figura 3.9.

ETAPA 4: Construção da Evolução do Espectro

Considerando que o desenvolvimento de um estado de mar é um processo relativamente lento, numa escala de horas a dias, a aplicação da DAAT a uma sucessão de registros de ondas, adquiridos usualmente por bóias *pitch-roll* em intervalos de algumas horas a alguns minutos, permite o acompanhamento visual da evolução em direção e valor de espectro de faixas de frequência ao longo do período de tempo investigado.

Nesta etapa, a direção principal de cada faixa analisada é correlacionada a de registros adjacentes no tempo, anteriores e posteriores, tomados 3 a 3, visando verificar a consistência dos processos retratados. Uma vez corrigidas as possíveis distorções angulares e eliminados os valores de direção considerados espúrios, uma curva de distribuição energética é construída para cada faixa do registro com base nos respectivos valores de direção principal e espectro.

O espectro direcional do registro de ondas consistirá, portanto, na representação gráfica combinada da distribuição energética de suas faixas, exibindo no eixo das abscissas os valores de direção, o espectro na ordenada e um código de cores para diferenciar as faixas componentes. O produto final desta etapa consiste no agrupamento de espectros direcionais de registros sucessivos ao longo do eixo ordenado, formando um gráfico do tipo cascata (do termo *waterfall-display*), que reproduz a evolução do espectro no período de tempo descrito pelos registros. A rotina implementada para esta representação permite ainda que dados de vento sejam mostrados no gráfico, seguindo o mesmo eixo horizontal das direções e utilizando barras verticais com tamanho distintos indicativos de intensidade.

Como será abordada adiante, a análise de gráficos de evolução espectral para dados de ondas da Baía de Campos oferece suporte na caracterização dos mares presentes na região e na associação com as respectivas situações meteorológicas. Para os objetivos deste trabalho, este recurso gráfico permitiu a determinação de situações espectrais correlacionáveis em função da análise direcional.

3.3 Aplicações

A DAAT apresenta-se, portanto, como uma técnica capaz de reconstruir com apurada resolução espacial a distribuição direcional de energia $D_f(\theta)$ de um dado registro de onda, para faixas de frequências específicas. Decorre deste fato que uma aplicação direta da DAAT está na investigação direcional de estados de mar dos quais há conhecimento prévio das características periódicas dos sistemas atuantes (vagas e marulhos). Para sustentar tal afirmação, esta seção dedica-se a avaliar a análise direcional proporcionada pela DAAT através das técnicas e formulações descritas

anteriormente em cenários distintos de agitação marítima, a partir de registros de ondas simulados, de características conhecidas, e de dados reais.

3.3.1 Simulações

A investigação com base em dados simulados ocorre segundo dois casos específicos: um caso simplificado, onde os dados de onda resultam de componentes de direção com valor único de frequência; e um caso complexo, mais próximo à realidade, onde os dados são formados por oscilações em faixas de frequência e de direção. Em ambos as situações, porém, as séries têm origem em uma distribuição direcional de energia pré-estabelecida $D_f(\theta)$, gerada a partir do modelo paramétrico \cos^{2s} .

Para a simulação das séries temporais de elevação e deslocamentos ortogonais tal como as registradas por bóia do tipo *pitch-roll*, de coordenadas fixas, os termos dependentes de x e y expressões descritas em 2.41, 2.42, 2.43 são desconsiderados. O número de onda k , entretanto, não desaparece do cálculo dos deslocamentos, cujas expressões são resultantes da derivadas da elevação nos eixos de referência, conforme mostrado pelas formulações que seguem:

$$\begin{aligned}\eta(t) &= \alpha \cos(\text{fase}) \\ \eta_x(t) &= \frac{\delta\eta}{\delta x} = -\alpha k \cos\theta \text{sen}(\text{fase}) \\ \eta_y(t) &= \frac{\delta\eta}{\delta y} = -\alpha k \text{sen}\theta \text{sen}(\text{fase})\end{aligned}\tag{3.1}$$

onde $\text{fase} = -wt$, $w = 2\pi f$, t é o intervalo de amostragem e α é a amplitude, em metros, obtida pela relação $\alpha = \sqrt{2D_f(\theta)}$.

CASO SIMPLIFICADO

Primeiramente, cenários de distribuição direcional de energia são geradas a partir da versão modificada do modelo \cos^{2s} descrita por GODA & SUZUKI (1975):

$$D_f(\theta) = G_0 \cos^{2s} \left(\frac{\theta - \theta_0}{2} \right) \quad (3.2)$$

onde a função de normalização $G_0 = \left\{ \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{2s} \left(\frac{\theta - \theta_0}{2} \right) d\theta \right\}^{-1}$ (3.3)

Adotando os valores de s propostos em 2.19, as funções de distribuição resultantes são então atribuídas a um conjunto discreto de 24 direções no intervalo de 7° a 173° . Como ilustrado pela Figura 3.11, curvas de distribuição normalizadas indicam maiores valores de dispersão em torno do ângulo central na condição de vagas ($s = 10$), valores intermediários em mar quase-local ($s = 25$), e menores em marulhos ($s = 75$).

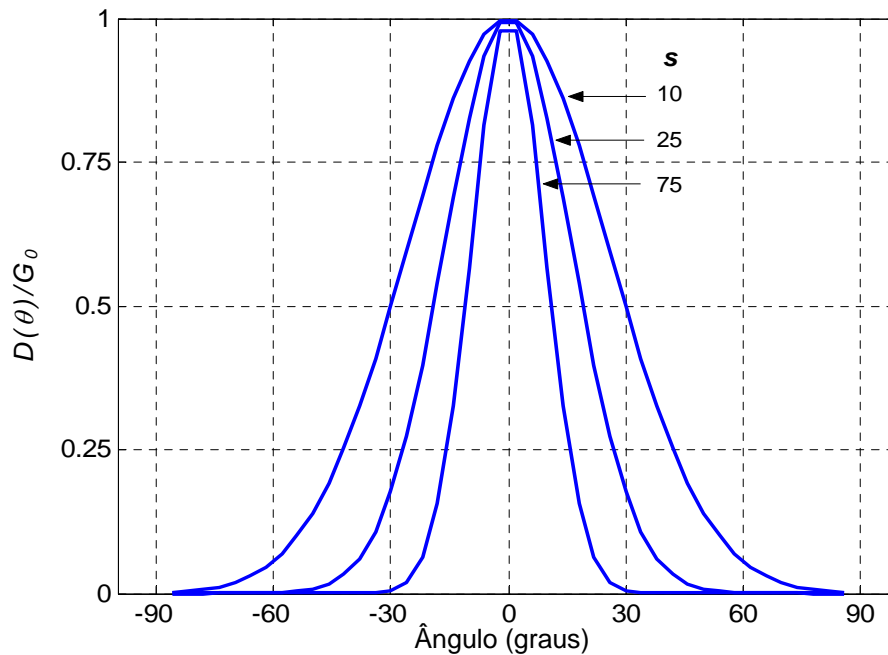


Figura 3.11: Função de distribuição direcional de energia para valores de s indicados.

Assim, com base em cada cenário de dispersão, séries de elevação e deslocamentos compostas por 1536 pontos são calculadas aplicando-se nas equações 3.1 valores de fase na frequência de 0,08Hz (período de 12,5 segundos) em intervalo amostral de 0,78125 segundo. A cada segmento de 64 pontos é atribuído um valor de amplitude derivado do espectro pra cada direção considerada, totalizando 24 valores distintos. Valores espúrios de amplitude são adicionados aleatoriamente às séries de forma a reproduzir uma forma de ruído. A Figura 3.12 revela exemplos de séries de elevação simuladas para s igual a 10.

O cálculo da direção principal de cada segmento é efetuado com base nas formulações de KUIK (2.25), a partir dos primeiros coeficientes da expansão da função de dispersão direcional em série de Fourier, conforme discutido no item 2.4. Como revelam os gráficos da Figura 3.13, para o cenário de s igual a 10, há total concordância entre o conjunto inicial de direções com os valores calculados a partir das séries sem ruídos, enquanto que anomalias significativas são verificadas no cálculo de direção a partir dos dados simulados com ruído.

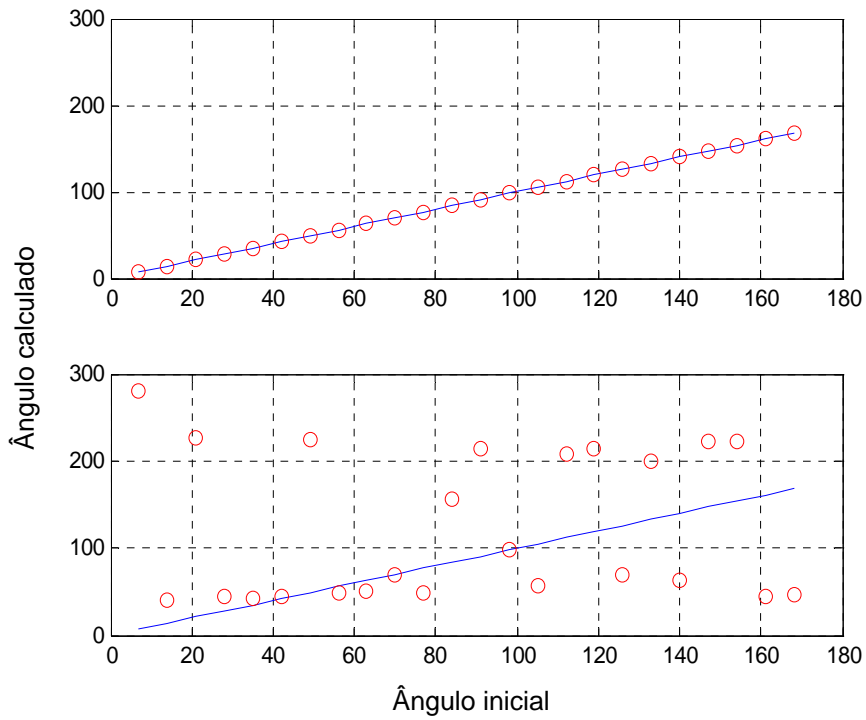


Figura 3.12: Séries de elevação geradas para as situações sem ruído (gráfico superior) e com ruído (gráfico inferior).

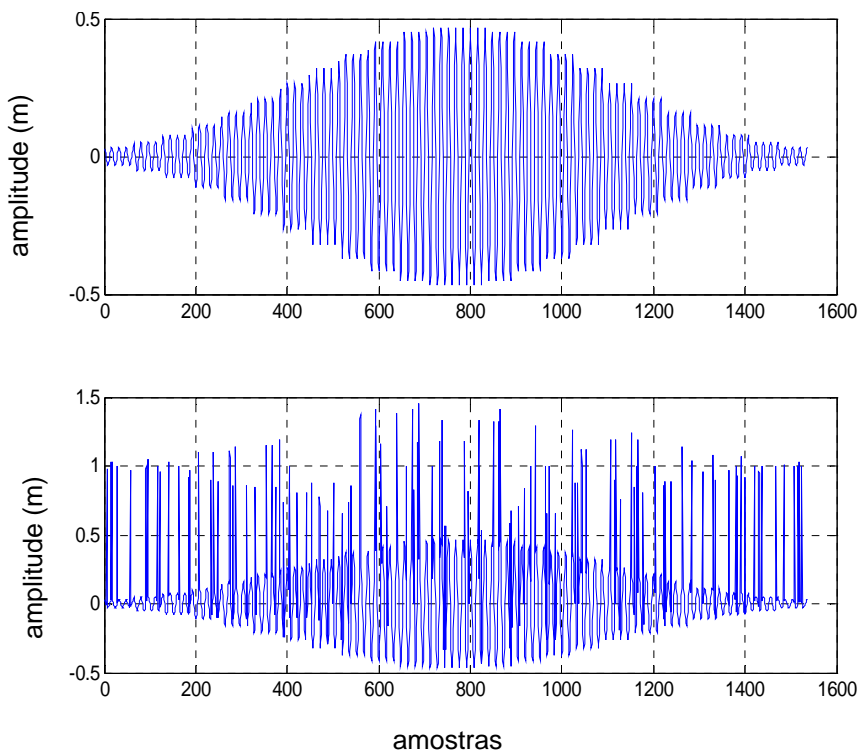


Figura 3.13: Comparação entre direções iniciais (linha azul) com os valores calculados (círculos vermelhos) para as séries sem ruído (gráfico superior) e com ruído (inferior).

No tocante ao cálculo da dispersão direcional, as diferentes técnicas utilizadas são resumidas pela tabela a seguir:

Tabela 3.1: Técnicas de cálculo da dispersão direcional dos dados simulados.

1	Através do desvio padrão circular σ_θ , pela relação com parâmetro s (formulação 2.34);
2	Através do desvio padrão circular σ_θ , calculado diretamente da curva de distribuição direcional do modelo \cos^{2s} pelas formulações de KUIK (2.27 e 2.28), com coeficientes estimados por 2.11 e 2.12;
3	Através do desvio padrão circular σ_θ , calculado a partir da reconstrução da direcional dos dados por método similar à DAAT, através das formulações de KUIK (2.27 e 2.28), com coeficientes estimados por 2.11 e 2.12;
4	Através do desvio padrão circular σ_θ , para a distribuição média dos segmentos da série de dados, segundo as formulações de KUIK e coeficientes estimados por 2.44 e 2.45. Ressalta-se que esta é a técnica de alisamento utilizada no processamento interno das bóia <i>Waveraider</i> .

Na situação de dados sem ruído, os resultados similares das técnicas de 1 a 4 (Tabela 3.2) para cada cenário de distribuição dada pelo parâmetro s revelam o ajuste das formulações envolvendo o desvio padrão circular. Já os resultados pertinentes ao ângulo de 3db apresentam-se ligeiramente maiores, com variabilidades entre si, embora de pequena escala, atribuídos à baixa resolução em direção da distribuição.

Em relação aos dados com ruído, verifica-se a degradação dos resultados de dispersão obtidos a partir das distribuições direcionais dos dados, pelas técnicas 3 e 4. Nas demais, não há alteração visto que os cálculos são feitos com base nas

distribuições teóricas, modeladas. Vale ressaltar, contudo, que este cenário é meramente ilustrativo dos efeitos deletérios de ruídos nos cálculos direcionais de ondas, como demonstrado também pela figura 3.13. Em situações reais de medição e análise de ondas, a eliminação ou atenuação de valores espúrios é importante etapa do processo de controle de qualidade dos dados, de forma a minimizar seus efeitos nos resultados e na informação final.

Tabela 3.2: Valores de dispersão calculados segundo as diferentes técnicas de cálculo, em distintos cenários de dispersão (valores de s).

Técnica	Séries sem ruído			Séries com Ruído		
	10	25	75	10	25	75
1	24,4	15,9	9,3	24,4	15,9	9,3
2	24,4	15,9	9,3	24,4	15,9	9,3
3	24,4	15,9	9,3	64,8	19,5	13,9
4	24,4	15,9	9,3	70	20,7	14,6

CASO COMPLEXO

A simulação de dados mais próximos a registros reais de ondas foi implementada através da adaptação da técnica descrita por GODA (1982), segundo a qual o campo resultante é formado por múltiplas componentes de freqüências e de direção, como revela a expressão:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \alpha_{m,n} \cos \left[k_m x \cos(\theta_0 - \theta_n) + k_m y \sin(\theta_0 - \theta_n) - 2\pi f_m t + \varphi_{m,n} \right] \quad (3.4)$$

onde M é o número de componentes de freqüência, N o número de componentes de direção e $\alpha_{m,n}$ é a amplitude para cada de cada componente de freqüência e direção, dada pela relação:

$$\alpha_{m,n} = \sqrt{2S(f_m)D(f_m, \theta_n)\Delta\theta_n\Delta f_m} \quad (3.5)$$

É adotada a simplificação para registros pontuais, descrita anteriormente pelas equações em 3.1, onde os termos da fase em x e y são desconsiderados. Outra simplificação utilizada é a adoção de um valor único de espectro $S(f)$ para o cálculo das amplitudes. Já o termo de fase angular $\varphi_{m,n}$ é distribuído uniformemente entre 0 e 2π radianos por rotina de geração de números aleatórios. As funções trigonométricas para as distintas componentes, em cada intervalo de amostragem Δt , foram simplificadas através da correlação com valores sucessivos, evitando demorados cálculos trigonométricos computacionais.

Uma vez definido o intervalo amostral Δt em 0,78125 segundo, são geradas componentes para 1564 frequências (M) entre 1/12 e 1/13 Hz e 46 valores de direção (N) entre 0 e 180° nos mesmos cenários modelados de distribuição direcional descritos no caso simplificado (parâmetro s nos valores de 10, 25 e 75). As séries simuladas de elevação e deslocamento ortogonais, exemplificadas pela Figura 3.14, são finamente preparadas com 1536 amostras a partir da combinação de 46 x 1564 componentes de onda, sendo acumulados para processamento c conjuntos de séries.

A distribuição direcional de energia é reconstruída pela técnica DAAT para cada conjunto de dados, a partir da distribuição média dos conjuntos, como demonstra a Figura 3.15 para c igual a 10, são calculados os parâmetros de dispersão: desvio padrão circular σ_θ e ângulo de 3db, representado por σ_{3db} .

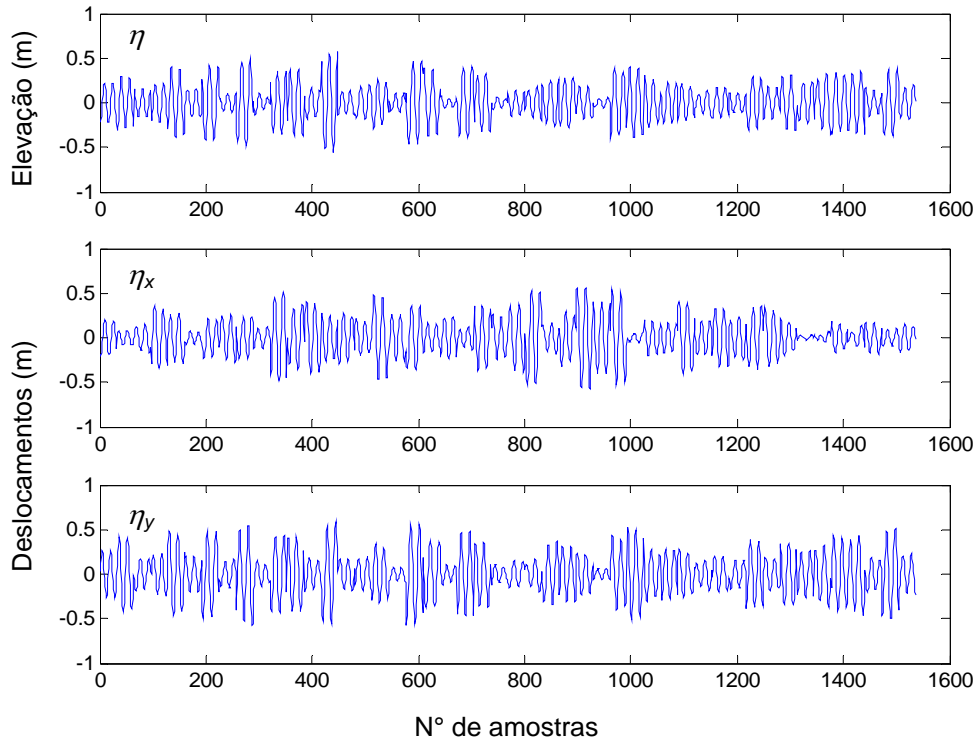


Figura 3.14: Séries de elevação η e deslocamentos η_x e η_y geradas pela simulação.

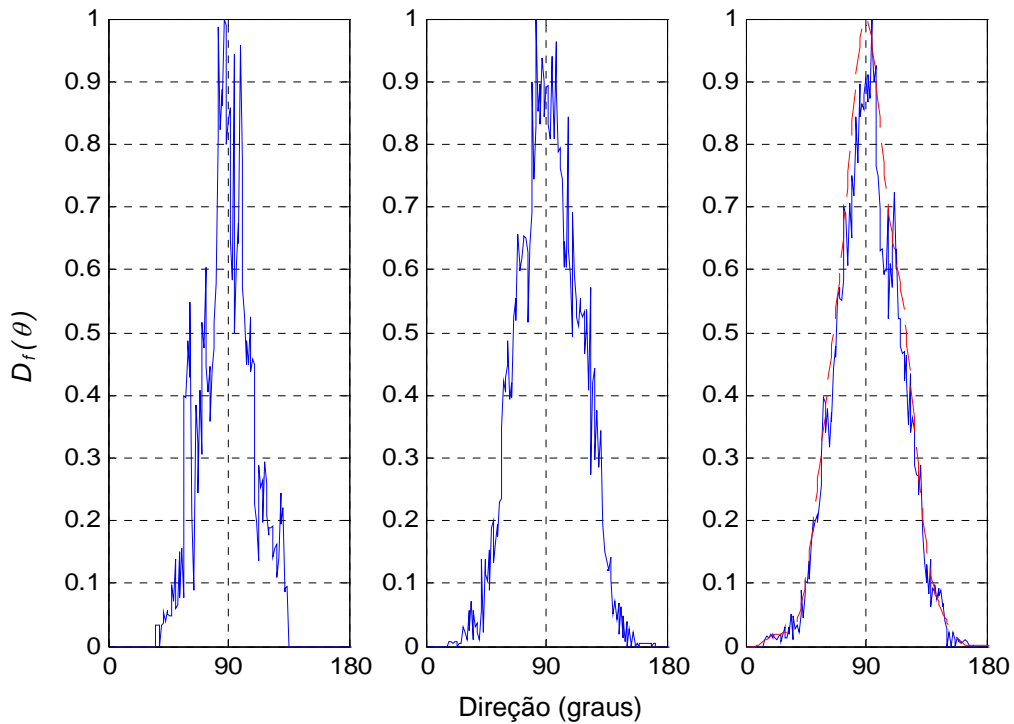


Figura 3.15: Geração da função de distribuição direcional média não normalizada, traço tracejado vermelho, de um conjunto de 10 séries de elevação e deslocamentos ortogonais simuladas para um cenário de s igual a 10.

O resultados da análise, apresentados pelos gráficos da Figura 3.18, revelam que, de uma forma geral, a distribuição direcional média construída através da DAAT para cada cenário de dispersão guarda bastante concordância com sua respectiva distribuição teórica, modelada através dos distintos valores do parâmetro s .

Na situação representativa de mar local ($s = 10$) os valores de desvio padrão e ângulo de 3db coincidem e correlacionam-se com o desvio padrão circular calculado para a distribuição teórica, extraído da tabela 3.2. Para o cenário de “quase-local”, a maior dispersão da distribuição reconstruída em relação à teórica podem ser atribuída à influência da energia nas faixas mais afastadas da direção principal, cujos valores são comparativamente maiores que os correspondentes da distribuição modelada. Tal fato é ainda mais visível no gráfico para a situação de marulhos ($s = 75$), onde a diferença entre os valores de dispersão calculados e teóricos é relativamente maior.

Pelo exposto, decorre que o parâmetro ângulo de 3db parece fornecer uma representação física mais adequada ao estimador de dispersão angular de espectros direcionais visto indicar esta grandeza no valor médio da distribuição, ou seja, na posição intermediária entre os intervalos de maior e menor energia. É válido ressaltar que simulações feitas para outros conjuntos de séries, ou para conjuntos com maior número de séries não produziram alterações significativas nos resultados ora apresentados.

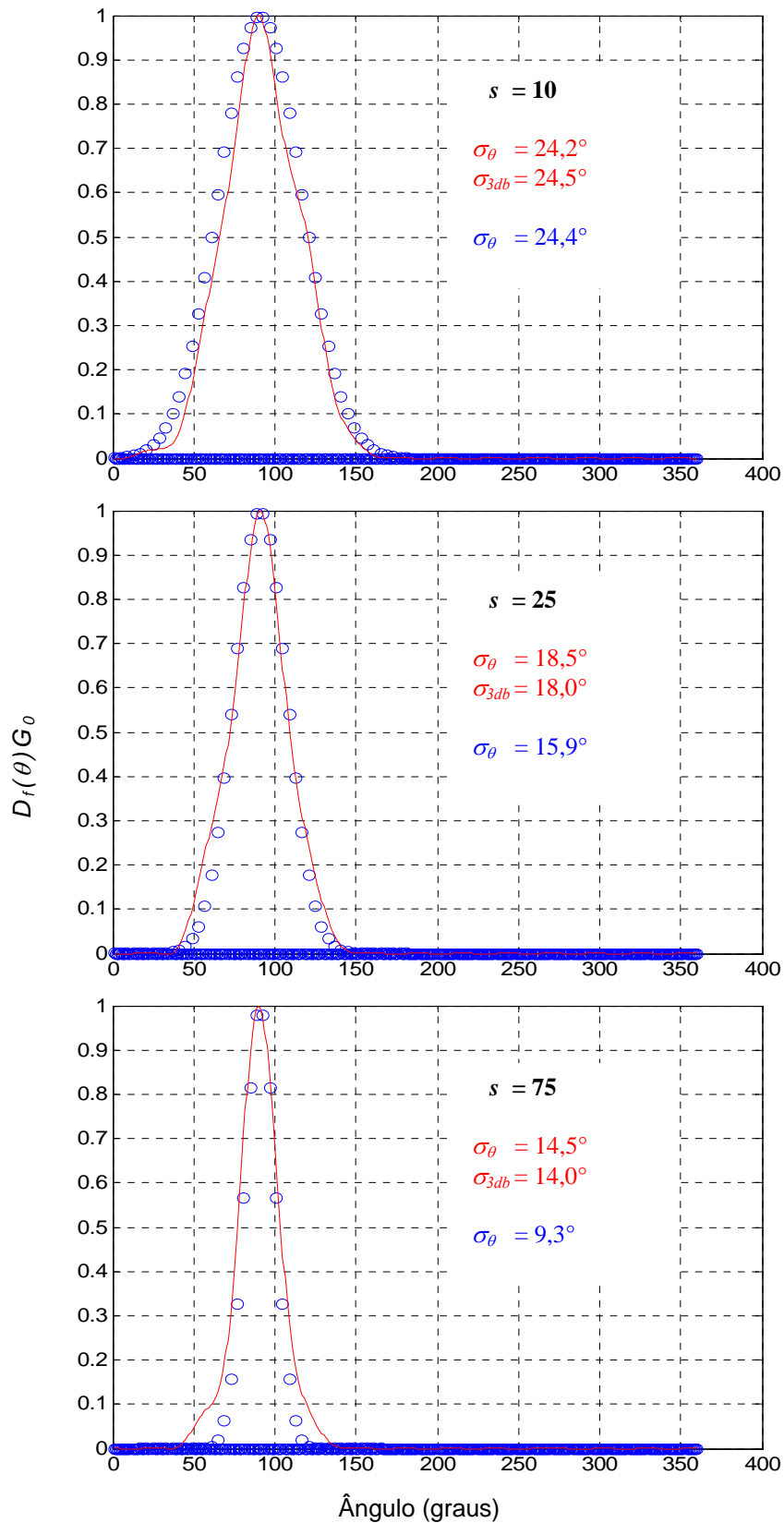


Figura 3.16: Gráficos comparativos entre a distribuição direcional reconstruída pela DAAT (em vermelho) e a distribuição teórica (círculos azuis) indicada pelo parâmetro s , com os respectivos valores de desvio padrão circular σ_θ e ângulo de 3db, σ_{3db} .

3.3.2 Dados Reais

As propriedades da técnica DAAT são avaliadas nesta seção através de sua aplicação a dados reais de ondas, oriundos do modelo comercial de bóia *pitch-roll* conhecido como Ondógrafo Direcional *Waverider*, da fabricante holandesa *Datawell BV*. As informações direcionais produzidas por este equipamento fornecem ainda uma interessante base comparativa para os resultados da DAAT, posto que são obtidas pelo processamento interno dos dados através de técnicas espectrais convencionais já consagradas em literatura (LONGET-HIGGINS *et al*, 1963, KUIK *et al.*, 1988).

Os registros utilizados, cordialmente cedidos pelo Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM), da Marinha do Brasil, compreendem séries temporais de elevação da superfície (η) e deslocamentos ortogonais (η_x e η_y) medidos nos meses de agosto e setembro do ano de 2002, em posição ao sul da Ilha de Cabo Frio, litoral norte do Estado do Rio de Janeiro, sobre isóbata de cerca de 90 metros.

A análise direcional das séries brutas de 1536 pontos foi conduzida segundo duas abordagens distintas: pela técnica DAAT, conforme as etapas já descritas e, paralelamente, por rotinas implementadas para reproduzir a técnica empregada no processamento interno da bóia, através de esquema de alisamento por segmentos fixos de 128 pontos e cálculos direcionais pelas formulações apresentada no item 2.4. Rotinas de preparação dos dados, para seleção de registros em intervalo de 3 horas e remoção de valores espúrios (*spikes*) das séries, são comuns a ambas as técnicas.

Como ilustração, a Figura 3.19 apresenta a evolução do espectro direcional nos meses considerados produzida pela DAAT. É interessante notar que, pelo fato da posição de fundeio da bóia estar “escondida” das ondulações vindas do quadrante norte, os gráficos não apresentam sinais energéticos oriundos dessa seção de direção.

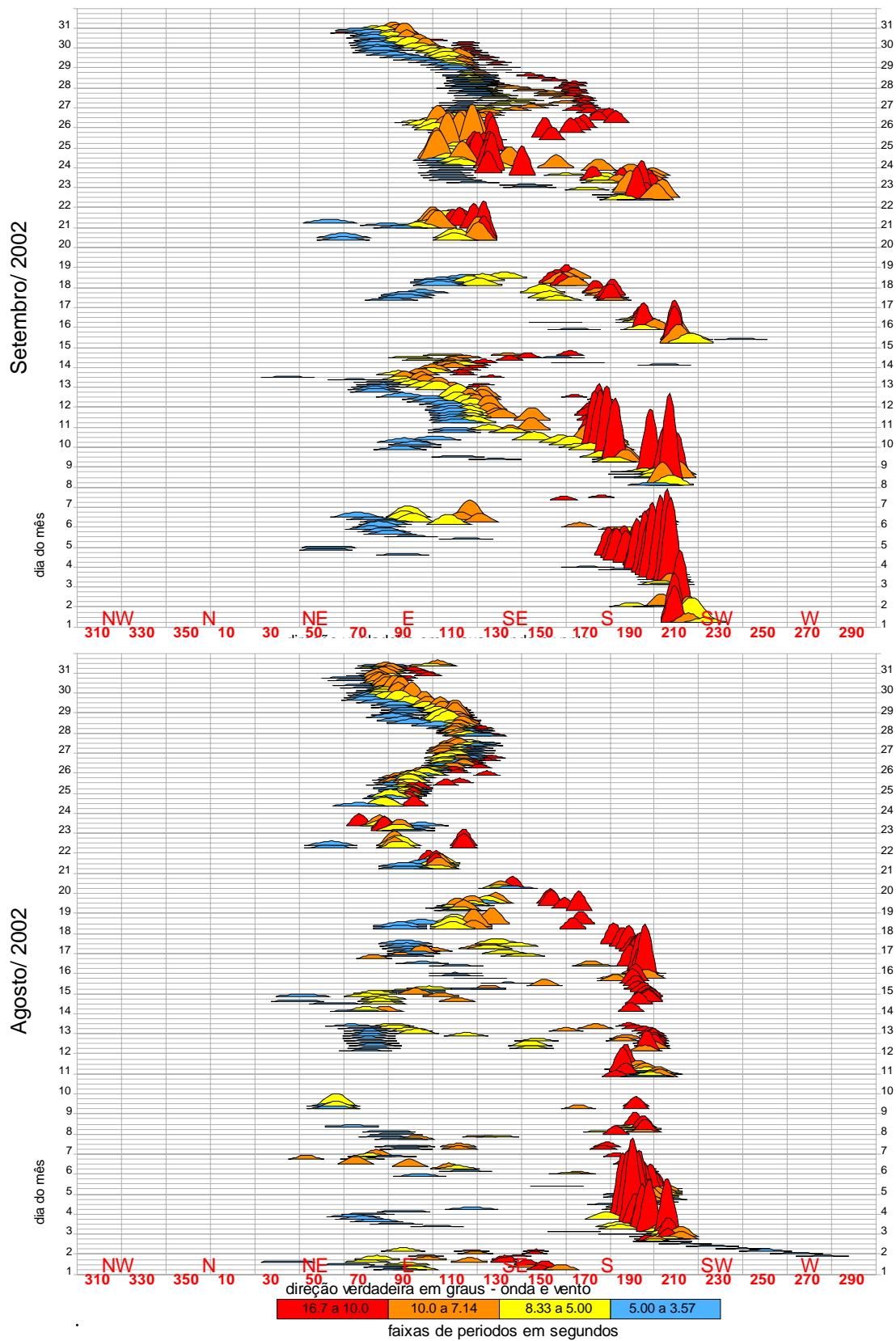


Figura 3.17: Representação gráfica da evolução do espectro direcional em Arraial do Cabo para os meses de agosto e setembro de 2002.

A Tabela 3.3 apresenta o esquema de segmentação e discretização de freqüências imposto aos dados de Arraial do Cabo para os cálculos da DAAT. Neste caso, é suposto que faixa 1 compreenda situações de marulhos, a 2 situações intermediárias entre marulhos gerados não muito longe e vagas formadas por ventos fortes, a 3 para vagas de pistas menores e, finalmente, a faixa 4 associadas a um mar local gerado não muito longe da bóia de medição (PARENTE, 1999).

Tabela 3.3: Esquema de segmentos e faixas de freqüências aplicados às séries de Arraial do Cabo, considerando intervalo amostral de 0,78125 segundo.

N° Faixa	Pontos p/ segmento	Freqüência central da faixa (Período)	Faixa de Freqüência (Período)
1	32	0,08Hz (12.5s)	0,06 a 0,1Hz (16.7 a 10s)
2	32	0,12Hz (8.4s)	0,1 a 0,14Hz (10.0 a 7.14s)
3	16	0,18Hz (6.3s)	0,12 a 0,2Hz (8,4 a 5,0s)
4	16	0,24 Hz (4.2s)	0,2 a 0,28Hz (5,0 a 3,57s)

Ao longo do processamento dos registros pela DAAT, os valores de espectro, direção principal e dispersão direcional (σ_θ e σ_{3db}) são calculados para cada faixa de freqüência. Pela técnica convencional, doravante chamada simplesmente de “Kuik”, estes mesmos parâmetros, com exceção do σ_{3db} , são estimados para todo o espectro de freqüências descrito pela análise, mas apenas os relativos às freqüências centrais das faixas da DAAT, apontadas na tabela acima, são considerados. Visando a comparação com o processamento interno do ondógrafo, os respectivos arquivos direcionais (.spt) são lidos e os parâmetros direcionais referentes a estas freqüências centrais são armazenados.

Primeiramente, os resultados são apresentados de forma a comparar o processamento interno da *Waverider* com o derivado das técnicas de Kuik. Pelos gráficos da Figura 3.18, construídos para os dados do mês de agosto, os valores de direção principal e dispersão nas frequências centrais de 0,08, 0,12, 0,18 e 0,24Hz demonstram clara relação linear entre as medidas, com valores de correlação para direção entre 97% (0,12hz) e 90% (0,24hz), e de dispersão acima de 95% em todas as frequências. Tais diferenças e os eventuais valores espúrios detectados são atribuídos a um controle de qualidade mais apurado feito pela bóia no processamento interno, bem como a introdução de ruídos nos dados brutos durante o processo de transmissão dos arquivos para a base em terra, como verificado visualmente em alguns registros. As mesmas observações são válidas para a análise dos dados do mês de setembro, sendo aceitável admitir que os resultados das técnicas convencionais reproduzem os cálculos do processamento proprietário do ondógrafo.

Na Figura 3.19, a direção obtida pela DAAT nas distintas faixas de frequências é confrontada com os valores de direção da bóia, seja por relação direta, gráficos à esquerda, seja ao longo dos registros do mês, à direita. Para a faixa de menor frequência (central em 0,08hz) a correlação dos valores atinge 90% e nota-se que há maior concordância em torno de 200°, na primeira metade do mês, quando há nítida influência de marulhos de S-SW na região, como também observado pelo gráfico de evolução do espectro (Figura 3.17). Uma situação oposta é percebida para as demais faixas, nas quais há maior concordância dos valores em torno de 100°, na segunda metade do mês, quando o estado de mar passa a ser dominado por ondulações de E-SE. Como já abordado anteriormente, quando em níveis energéticos baixos, a direção na faixa de frequência é errática e os estimadores menos confiáveis. Os resultados mostram que a DAAT foi capaz de obter estimadores de direção mais confiáveis em todas as faixas por adotar menor resolução em frequência e por selecionar os segmentos que compõem os cálculos em função da estabilidade direcional.

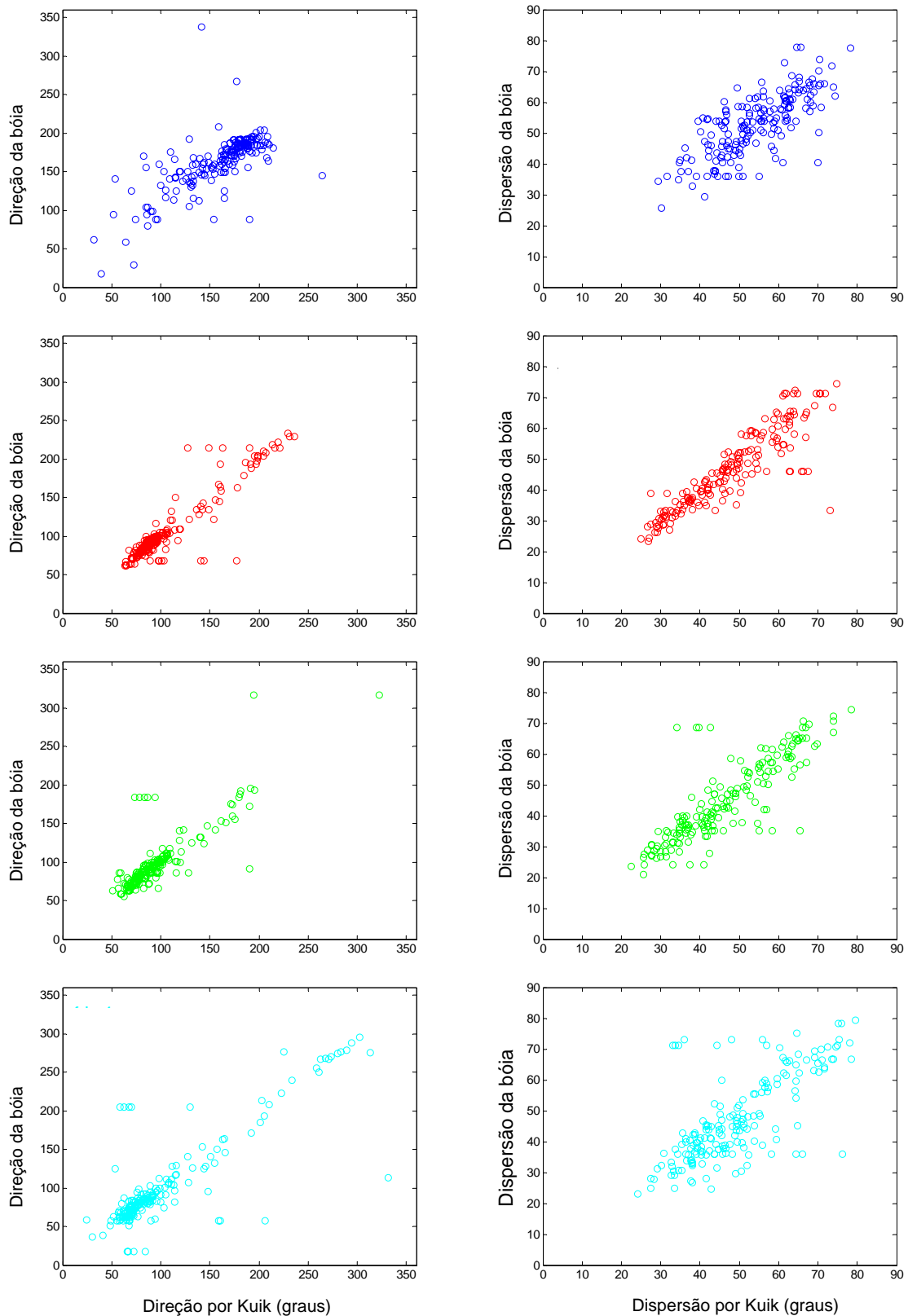


Figura 3.18: Relação de direção principal (gráficos à esquerda) e dispersão (à direita) entre os valores calculados por Kuik e os obtidos pela bóia nas frequências centrais de 0,08hz (azul), 0,12hz (vermelho), 0,18hz (verde) e 0,24Hz (azul claro).

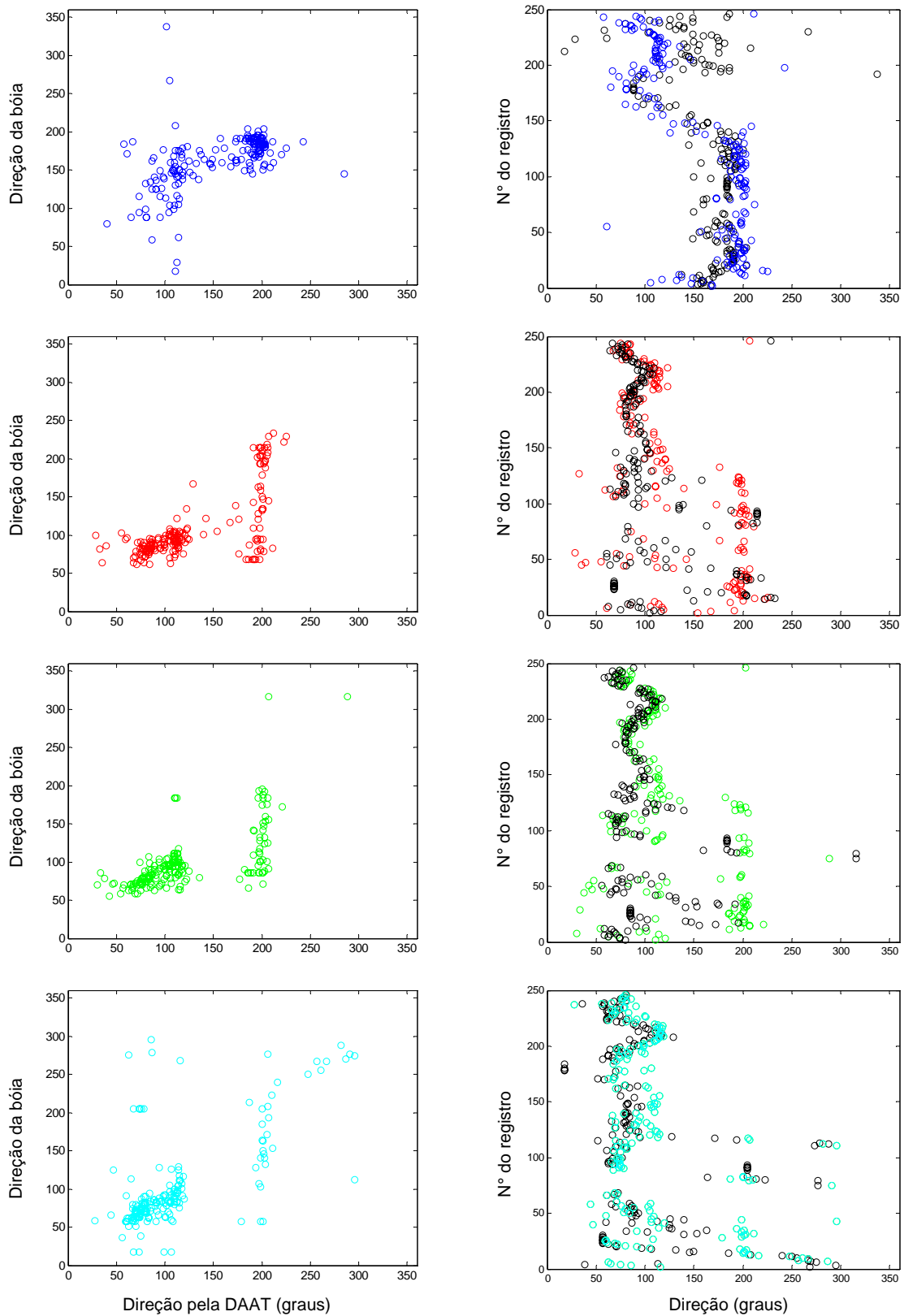


Figura 3.19: Relação entre a direção calculada pela DAAT e a obtida pela bóia (à esquerda), e direção principal ao longo dos registros do mês (direita), com valores da bóia em preto e da DAAT no código de cores das respectivas faixas de frequência.

Os mais importantes resultados da análise dos dados de Arraial de Cabo advêm do cálculo da dispersão direcional σ_θ . Mesmo utilizando um intervalo de integração de $\pm \pi/2$ em torno da direção principal θ_0 da $D_f(\theta)$ para o cálculo do desvio circular segundo as equações 2.27 e 2.28, os valores estimados através da DAAT mostram-se sistematicamente menores e com menos variância do que a dispersão estimada pela bóia, em todas as faixas de frequência consideradas, como ilustram os gráficos da Figura 3.20. Enquanto as médias nas faixas de 1 a 4 situam-se em 23°, 27°, 30,° e 29°, respectivamente, com desvio em torno de 6°, a médias dos valores da bóia nas frequências centrais das faixas, na mesma ordem, foram de 51°, 49°, 46° e 48,1°, com desvios entre 10° (1) e 14° (4).

Como já discutido anteriormente, essas constatações remetem à propriedade da técnica em selecionar os eventos ao logo dos registros de ondas onde há relativa estabilidade direcional e níveis energéticos significantes. Mesmo considerando a baixa resolução espectral da técnica, uma solução de compromisso em benefício à maior resolução direcional, o comportamento típico do parâmetro de dispersão é observado nos histogramas da Figura 3.20, sendo claro o aumento dos valores entre a faixa de menor frequência (em azul) às faixas de maior frequência (3 e 4, em verde e azul claro). Como discutido por PARENTE (1999) e constatado pelas aplicações teóricas e práticas deste estudo, o domínio de variação da dispersão direcional identificado na análise traduz as seguintes situações:

1. Marulho distante, unidirecional, com menores valores dispersão angular;
2. Situações estáveis de vagas (local), quase-local ou combinação de marulhos de direções próximas, com valores de dispersão intermediários;
3. Situações de mar local com variação rápida de direção por intensa evolução meteorológica nas proximidades do ponto de medição, resultando em maior dispersão.

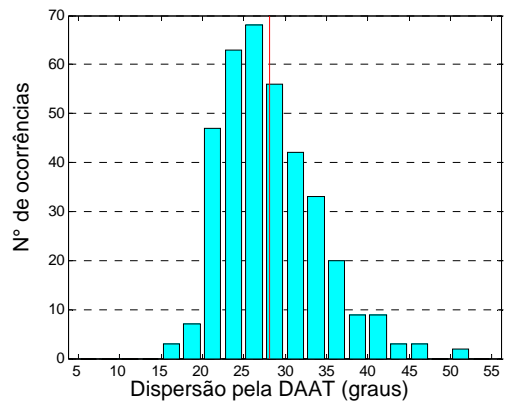
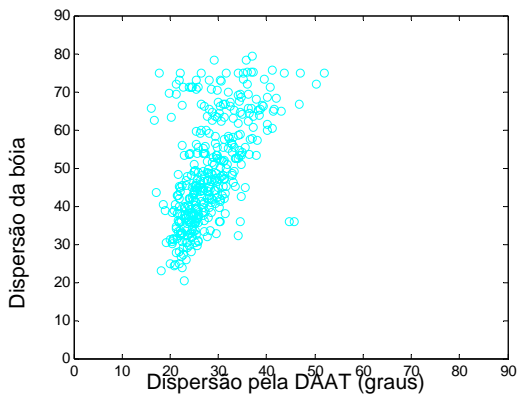
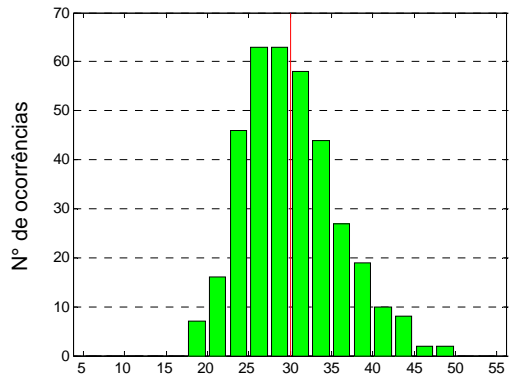
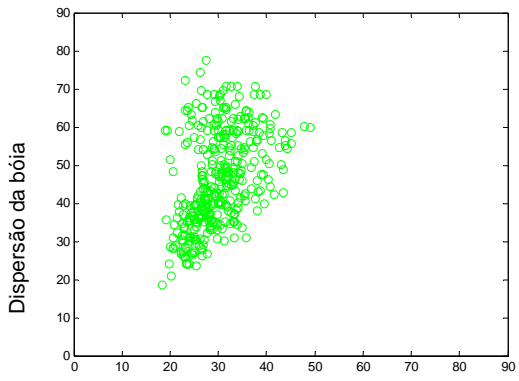
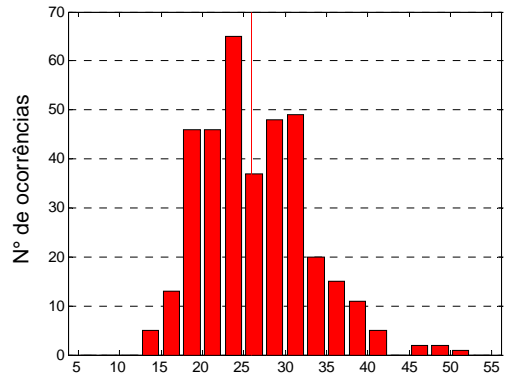
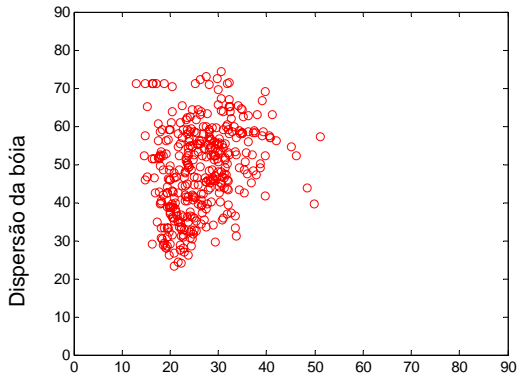
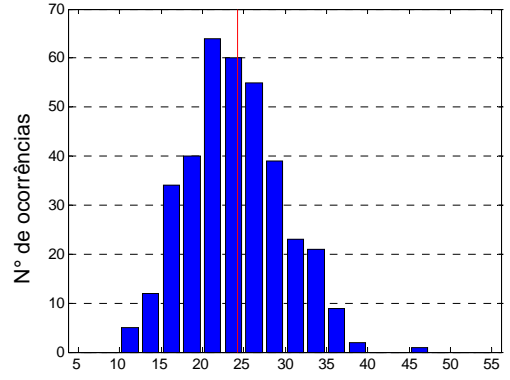
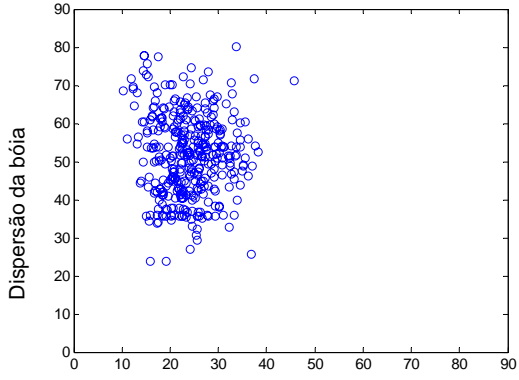


Figura 3.20: Relação entre a dispersão calculada pela DAAT e a obtidas pela bóia (gráficos à esquerda), e histogramas de dispersão para as distintas faixas de freqüência: azul para faixa 1, vermelho para a 2, verde para 3 e azul claro para a 4.

CAPÍTULO 4

Aplicação à Bacia de Campos

4.1 Considerações Iniciais

Em números e importância, a Bacia de Campos, situada no litoral norte do Estado do Rio de Janeiro, constitui a maior bacia petrolífera do país: nos atuais 15 campos em atividade, 36 plataformas e navios-plataforma exploram mais de 750 poços submarinos, de onde são extraídos aproximadamente 80% do petróleo e 40% do gás produzidos diariamente em território nacional (PETROBRAS, 2005).

Acrescenta-se a este cenário inúmeras e complexas atividades marítimas e aéreas, realizadas em regiões com lâminas-d'água que variam de 80 a cerca de 1.900 metros, cuja viabilidade operacional está diretamente ligada às condições meteorológicas e oceanográficas locais, em particular, o clima das ondas de gravidade (VIOLANTE-CARVALHO, 1998; PARENTE, 1999).

No início da década passada, frente à expansão da fronteira de exploração a águas profundas, a PETROBRAS, então única operadora na Bacia de Campos, iniciou um vasto programa de coleta de dados ambientais, denominado Programa de capacitação em Águas Profundas, ou, simplesmente, PROCAP. Como importante elemento deste programa, uma bóia meteo-oceanográfica operou entre março de 1991

a março de 1993 no Campo de Marlim (22°01'S e 39°58'W), em lâmina d'água de 1.250 metros, registrando dados de correntes superficiais, vento, pressão atmosférica e temperatura do ar e do mar. Esta mesma bóia foi reinstalada no Campo de Barracuda (22°38'S e 40°12'W) a uma profundidade de 1.050 metros, permanecendo operacional de janeiro de 1994 a julho de 1995.

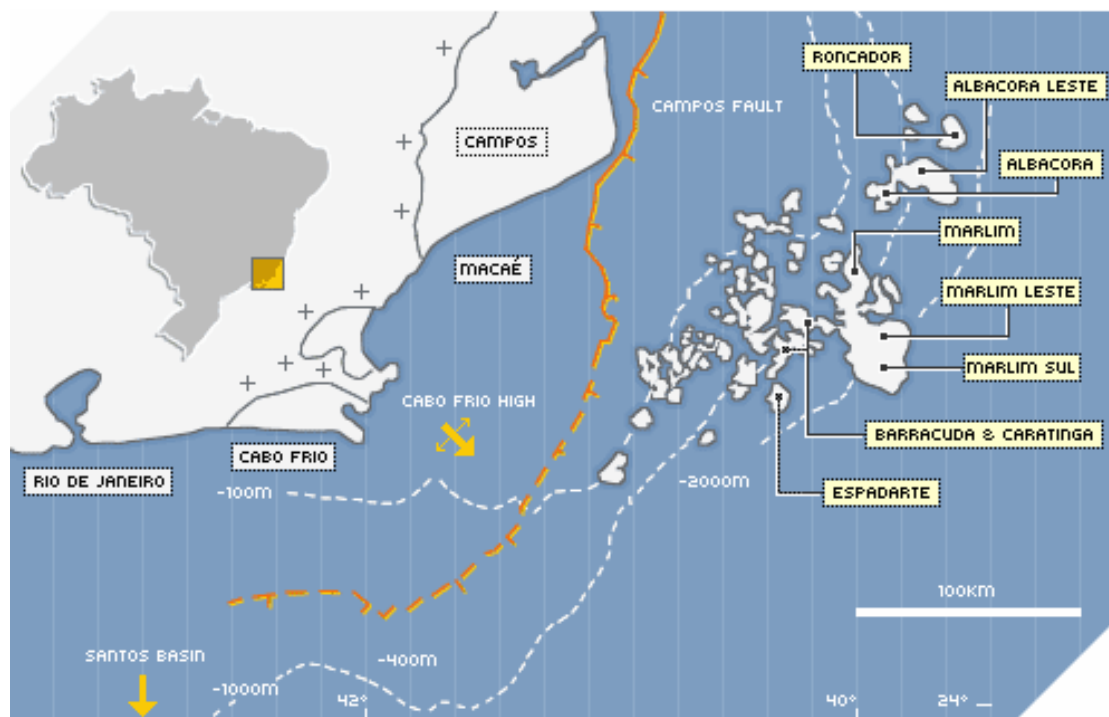


Figura 4.1: Bacia de Campos e os principais campos de exploração em 2005 (Fonte: PETROBRAS 2005).

A partir da grande volume de dados resultante do programa, importantes contribuições aos campos de análise, descrição e previsão do clima de ondas na região foram apresentadas por PARENTE (1999), VIOLANTE-CARVALHO (1998), CANDELLA (1997), SEIXAS (1996) e, mais recentemente, PINHO (2003). A técnica DAAT, detalhada por PARENTE e utilizada em algumas desses trabalhos, suportou a elaboração de uma classificação de mares na Bacia de Campos, apresentada a seguir, que, por sua vez, serviu de referência ao desenvolvimento dos cenários abordados do presente estudo.

4.2 Classificação de Mares

A complexidade do clima de ondas na região é colocada em evidência nos trabalhos citados. VIOLANTE-CARVALHO descreve, a partir dos dados de Marlim, 12 situações distintas de mares e acrescenta que 75% das ocorrências dos espectros de energia de ondas calculados estão relacionadas a mares de dois ou mais picos. SEIXAS mostra a ocorrência de espectros trimodais com três direções distintas.

Proposta por PARENTE *op cit.*, a metodologia de classificação dos estados de mar na Bacia de Campos é baseada na associação a situações meteorológicas de bom tempo e mau tempo, listadas abaixo, e discutidas em seguida.

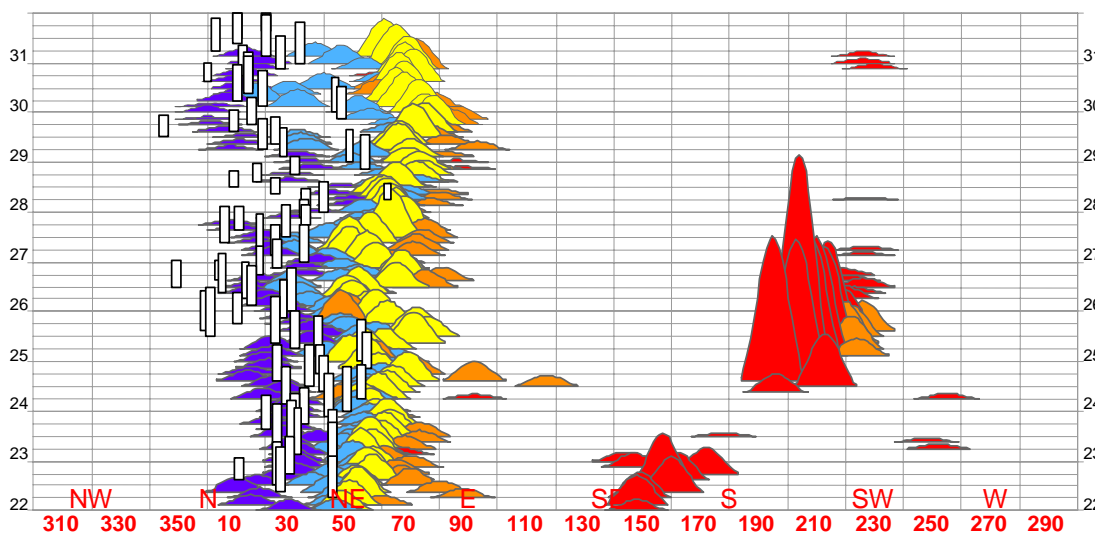
- categoria 11 – Bom Tempo com swell
- categoria 12 – Bom Tempo sem swell
- categoria 21 – Mau Tempo : tempestade de SO
- categoria 22 – Mau Tempo: tempestade de SE

Bom Tempo

É a condição gerada pela influência do Anticiclone do Atlântico Sul (AAS), na qual os ventos dominantes têm origem nordeste, com variações para norte ou para leste conforme o deslocamento meridional da AAS em relação à Bacia de

Campos. Estes sistema de ventos, com intensidades médias entre 4m/s e 6m/s, dão origem a um mar local (vagas), com a mesma direção, e a um mar gerado mais a nordeste, a alguns quilômetros de distância, denominado de “quase-local” pois apresenta características bem parecidas com as das vagas.

PINHO destaca que, freqüentemente, em condição de bom tempo, observam-se marulhos gerados a grandes distâncias ao sul, além das vagas de nordeste. Assim, enquanto as ondas geradas pelos ventos de nordeste atingem períodos máximos de 8 segundos (vagas) e 12 segundos (quase-local), os marulhos que chegam à região têm períodos maiores que 12 segundos. As Figura 4.2, construída com auxílio da DAAT para a última semana de março de 1992, ilustra esta condição de Bom Tempo com a incidência de marulho de sul,



associado, por sua vez, ao campo de ventos mostrado pela Figura 4.3.

Figura 4.2: Exemplo de BOM TEMPO no dia 25/03/1992, indicando a posição normal do AAS, com marulho distante gerado no sul dias antes (22/03). Fonte: PINHO, 2003.

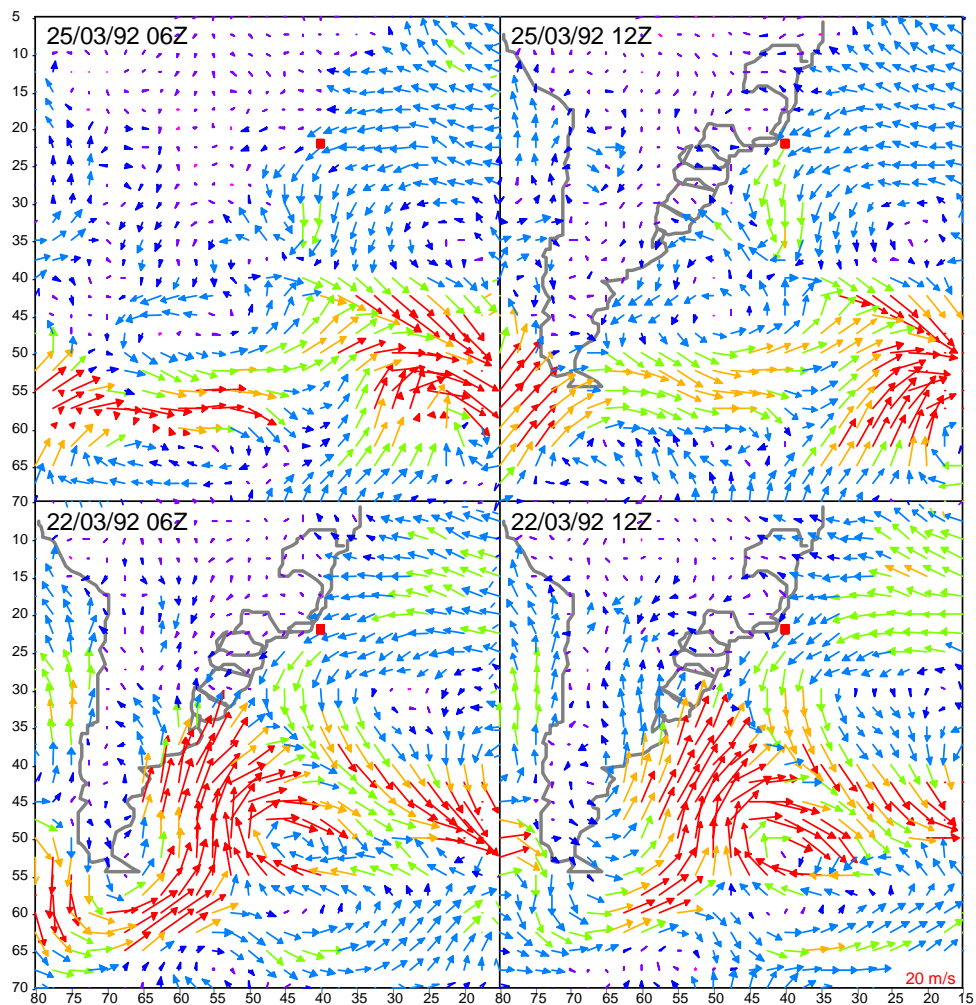


Figura 4.3: Mapas de reanálise usados na avaliação da evolução DAAT de março de 1992, indicando a situação de bom tempo do dia 25/03 com mar local e quase-local e a geração de ondas com grandes pistas no dia 22/03. Fonte: PARENTE, 1999.

Mau Tempo

As condições de Mau Tempo são subdivididas em duas situações: Mares de Sudoeste (21) e Mares de Sudeste (22). A primeira ocorre quando da chegada de ciclone extratropical na região, precedido de frente fria, avançando de sul a um deslocamento médio de 500km por dia. Já a segunda decorre da evolução de

anticiclones subtropicais após a passagem de frente fria e do ciclone extratropical.

O Mar de Sudoeste, condição mais severa de estado de mar na Bacia de Campos, tem origem nos fortes ventos (de até 25m/s) que chegam junto com o ciclone. Após sua passagem pela costa sudeste, os ventos giram gradualmente para sul, sudeste e leste quando, então, a condição de Bom Tempo se estabelece novamente. As ondas resultantes, de períodos superiores 12 segundos e altura significativa duas vezes maior do que em Bom Tempo, também apresentam o mesmo comportamento de direção. Para ilustrar tal situação, a Figura 4.4 revela a evolução do espectro para a última semana de agosto de 1992, onde ondas de S-SO revelam-se como resultado da presença do ciclone a região (Figura 4.5).

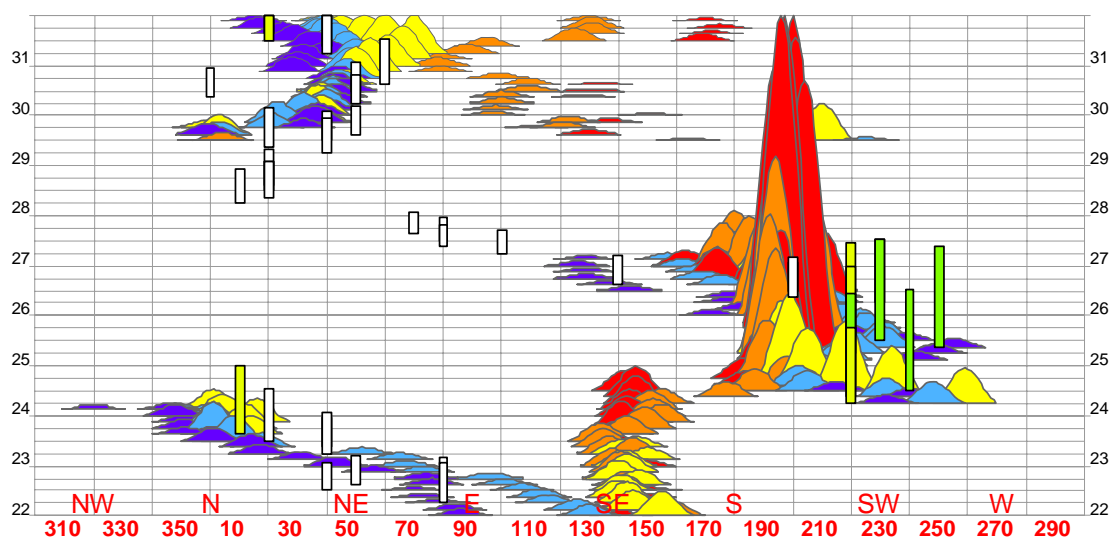


Figura 4.4: Tempestade de SO evoluindo na região da Bacia de Campos, com ventos fortes e ondas grandes, em agosto de 1992. Fonte: PINHO, 2003.

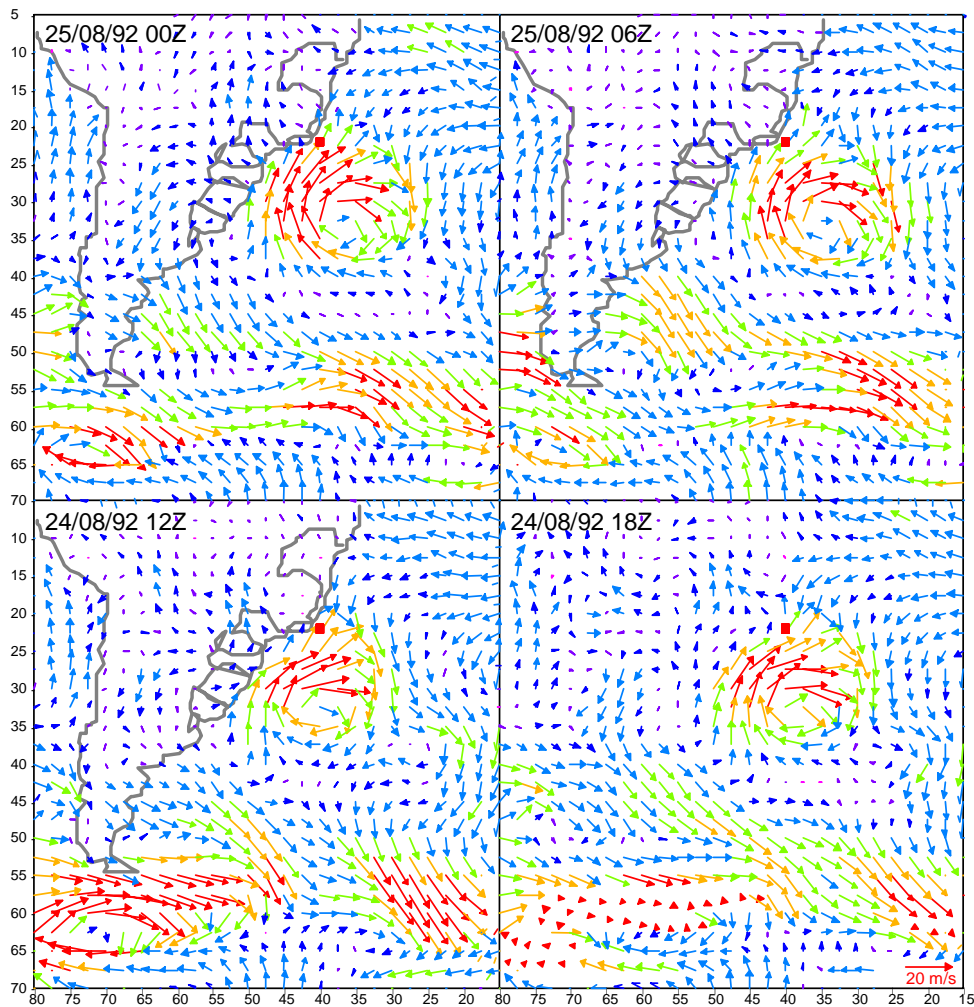


Figura 4.5: Mapas de reanálise de vento construídos para agosto de 1992, indicando a evolução do ciclone na região da Bacia de Campos, ocasionando mau tempo na região. Fonte: PARENTE, 1999.

Já os anticlones subtropicais (Figura 4.7) agem na região quando ciclone extratropical tem sua rota deslocada para o oceano. Neste caso os ventos têm direção sul ou sudeste após a passagem da frente fria. Estes são intensificados no evento de o ciclone estacionar ao norte da Bacia de Campos. As ondulações resultantes, são

classificadas como um quase-local de sudeste a leste com períodos em torno de 9 segundos, como observado pela Figura 4.6.

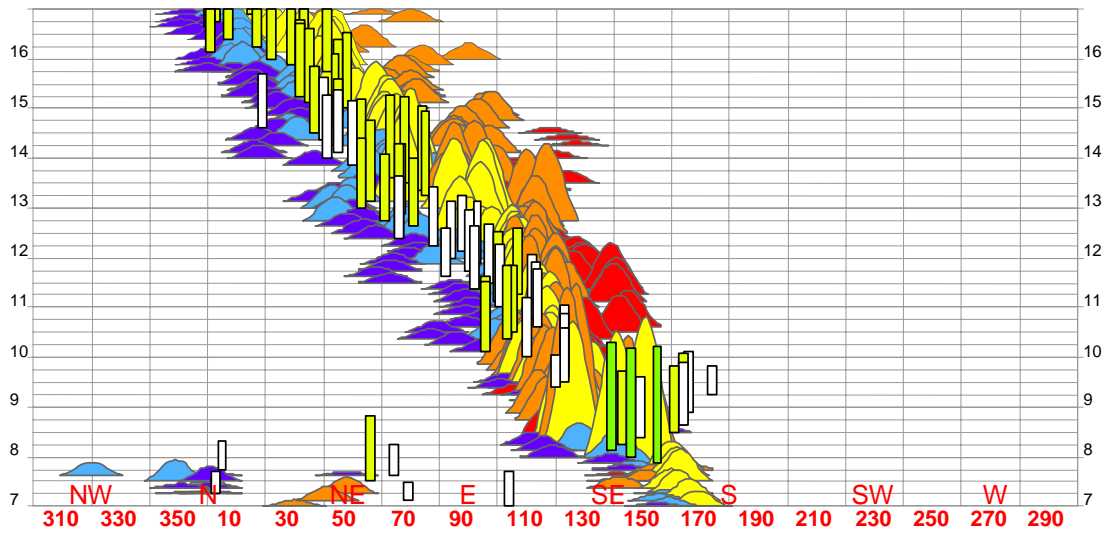


Figura 4.6: Tempestade de SE evoluindo na região da Bacia de Campos, em setembro de 1992. Fonte: PINHO, 2003

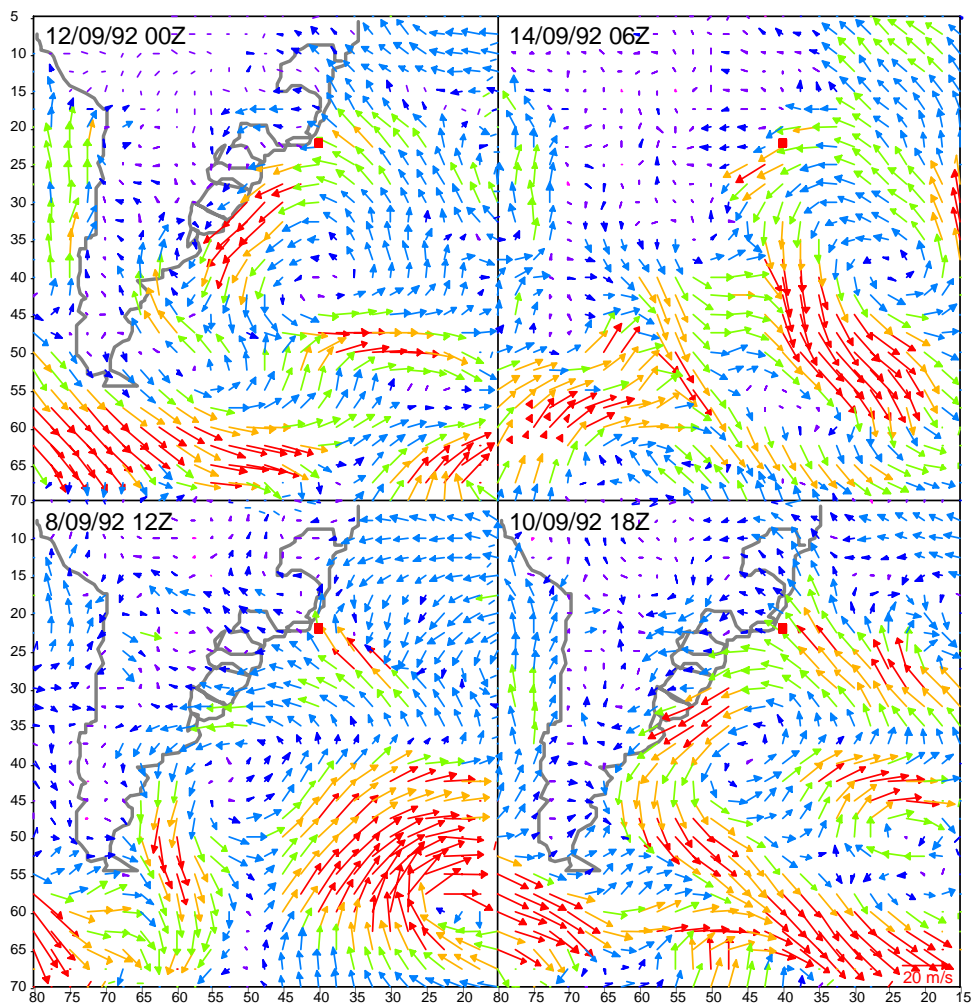


Figura 4.7: Evolução de anticiclone subtropical na situação de setembro de 1992.

4.3 Estudos de Casos

Uma vez que os resultados obtidos pela DAAT mostraram-se consistentes com as descrições teóricas apresentadas neste estudo, em especial à parametrização proposta por GODA & SUZUKI *apud* GODA (1999) em 2.20, a técnica foi aplicada aos dados de ondas da bóia meteo-oceanográfica de Marlim a fim de permitir a análise de seu conteúdo direcional.

Diferentemente do ondógrafo *Waverider*, não há pré-processamento espectral a bordo, os dados são amostrados em intervalo de 1 segundo e as séries medidas de 3 em 3 horas. De forma a identificar as situações de mares descritas, os diagramas de evolução do espectro foram construídos para cada mês do levantamento, segundo faixas de frequência fixas definidas pelo seguinte esquema:

Tabela 4.1: Esquema de segmentos e faixas de frequências aplicados às séries de Marlim para a construção dos diagramas de evolução espectral.

N° Faixa	Pontos p/ segmento	Frequência central da faixa (Período)	Faixa de Frequência (Período)
1	26	0,077Hz (13,0s)	0,058 a 0,096Hz (17,3 a 10,4s)
2	26	0,115Hz (8.7s)	0,096 a 0,135Hz (10,4 a 7,4s)
3	26	0,154Hz (6.5s)	0,135 a 0,173Hz (7,4 a 5,7s)
4	12	0,333Hz (3,0s)	0,29 a 0,38Hz (3,4 a 2,67)

Do total de meses avaliados, foram selecionados para a análise direcional exemplos de períodos nos quais os estados de mar associados às situações de Bom

Tempo e Mau Tempo na Bacia de Campos pudessem ser claramente identificados com base na classificação apresentada, entre elas os casos citados.

Para os cálculos, as rotinas da DAAT foram modificadas de forma que o tamanho dos segmentos na análise fossem ajustados de acordo com os níveis energéticos presentes em cada registro. Tal implementação, comentada anteriormente no item 3.1, visa centrar as faixas investigadas nas frequências de pico do espectro de potência, caracterizando os processos dominantes no momento da medição. Assim, a estimativa dos parâmetros espectro, período de pico, direção principal, dispersão direcional (σ_θ e σ_{3db}) e s em função de σ_{3db} passaram a ser feitos somente nas faixas de frequência resolvidas, em um número máximo de 4 faixas.

Bom Tempo (casos 11 e 12)

Para esta classificação, foram selecionados os registros compreendidos em intervalos de tempo nos meses de dezembro de 1991, março de 1992, outubro de 1994 e fevereiro de 1995, cujos diagramas completos podem ser vistos no Anexo I deste texto. Em comum a todas, a situação meteorológica de bom tempo gerada pela influência da AAS, com ventos de nordeste de relativamente fortes, em outubro/94, a moderados e constantes, em dezembro/91. A incidência de marulhos de SO, caracterizando a categoria 11, é ilustrada nos casos de março/92 e fevereiro/95.

Dos resultados dos cálculos, apresentados em seguida na Tabela 4.2, são constatações:

- Período das ondas predominante entre 5,9 e 6,8 segundos (faixa 3), com valores do desvio circular σ_θ de 23,1° a 25,7°. O maior valor de s , 18, derivado do σ_{3db} , em dez/91, indica um mar local gerado mais distante do ondógrafo.

- A faixa 4, descrevendo as ondulações imediatamente associadas ao vento local, também é bastante freqüente, apresentando valores de σ_θ maiores que a faixa 3, média de 27,3 contra 24,7 daquela.
- A faixa 2 apresenta valores de dispersão bastante discrepantes (σ_{3db} bem menores que σ_θ nos períodos avaliados). Neste caso, supõem-se que a função de distribuição tem a base bastante alargada em função de contribuições energéticas de direções próximas, o que implica num maior valor do desvio circular, enquanto que na freqüência central, ao nível médio, esta é melhor resolvida. Infere-se neste caso a ocorrência de mistura de mares.
- Para os eventos de da categoria 11, os valores de s indicam marulhos não muito distantes (~ 27), com período de onda entre 11,9 e 12,9 s.

Mau Tempo com tempestade de SO (caso 21)

Foram selecionados registros compreendidos em curtos intervalos de tempo nos meses de junho de 1992, agosto de 1992, junho de 1994 e agosto de 1994 (Anexo II) , durante a incidência de fortes ventos de SO. A Tabela 4.3 apresenta os resultados e as seguintes considerações são feitas:

- Como esperado, houve predominância das faixas 1 e 2, valores do desvio circular maiores para mar quase-local (> 8 segundos);
- O valores do parâmetro s para a faixa 1 indicam zonas de geração mais próximas do que no caso da situação 11 e/ou variabilidades do campo de ventos em função do deslocamento do ciclone extratropical.

Mau Tempo com tempestade de SE (caso 22)

Períodos de tempo com essa característica nos meses de maio de 1991, agosto de 2001, setembro de 1992 e março de 1994 (Anexo III) foram analisados.

Dos resultados, observa-se o seguinte:

- Predominância de mares na faixa 2, com períodos de pico entre 8,3 e 9 segundos, com ocorrência significativa da faixa 3 nos meses analisados.
- Nesta faixa, valores mais altos do ângulo de 3db em relação ao desvio circular indica possível variabilidade direcional no campo de geração, o que é plausível em função da evolução do ciclone extratropical.
- Também são notáveis os marulhos presentes pouco tempo antes do sinal do ciclone extratropical, em agosto/91 e setembro/92 (em azul na tabela), com valor médio de s de 24,3, o qual contrasta com os marulhos de maio/91 e março/94, de s médio de igual a 17,5.

Tabela 4.2: Valores médios dos parâmetros desvio circular, ângulo de 3db, período médio de pico, s e ocorrência de pico espectral nas faixas indicadas dos registros classificados como representativos de mar 11 e 12 (em azul).

Bom Tempo (11 e12)			Faixas de frequência			
			1 (*)	2	3	4
Mês/Ano	dias	Parâmetro	$T > 10$ s	$T > 8$ s	$T > 4.5$ s	$T > 3.5$ s
Dez/1991	08 a 28	$\sigma_{\theta} (^{\circ})$	-	22,5	23,1	24,2
		$\sigma_{3db} (^{\circ})$	-	18,6	22,3	23,7
		$\bar{T} (s)$	-	9,2	6,0	4,0
		s	-	26,0	18,0	16,0
		%	-	35	91	35
Mar/1992	22 a 30	$\sigma_{\theta} (^{\circ})$	19,2	23,7	24,8	29,6
		$\sigma_{3db} (^{\circ})$	17,3	20,6	25,7	30,6
		$\bar{T} (s)$	12,9	8,5	6,8	4,0
		s	30,0	21,0	13,6	9,6
		%	35	21	90	21
Out/1994	13 a 25	$\sigma_{\theta} (^{\circ})$	26,4	29,3	25,1	28,7
		$\sigma_{3db} (^{\circ})$	22,3	20,6	28,5	31,9
		$\bar{T} (s)$	11,3	8,9	6,5	4,0
		s	17,0	21,0	11,0	8,8
		%	35	12	98	46
fev/1995	14 a 27	$\sigma_{\theta} (2)$	18,7	25,0	24,7	27,7
		$\sigma_{3db} (^{\circ})$	19,6	24,0	26,4	26,5
		$\bar{T} (s)$	11,9	9,3	5,9	4,0
		s	24,0	15,6	13,0	12,8
		%	24	60	85	32

*: composição das médias: mar/92, dias 25 e 26; fev/95 19 a 22.

Tabela 4.3: Valores médios dos parâmetros desvio circular, ângulo de 3db, período médio de pico, s e ocorrência de pico espectral nas faixas indicadas dos registros classificados como representativos de mar 21.

Mau Tempo – SO (21)			Faixas de frequência			
			1 (*)	2	3	4
Mês/Ano	dias	Parâmetro	$T > 10$ s	$T > 8$ s	$T > 4.5$ s	$T > 3.5$ s
Junho/1992	11 a 13	$\sigma_{\theta} (^{\circ})$	17,7	-	-	-
		$\sigma_{3db} (^{\circ})$	22,0	-	-	-
		$\bar{T} (s)$	11,9	-	-	-
		s	18,7	-	-	-
		%	100	-	-	-
Ago/1992	24 a 27	$\sigma_{\theta} (^{\circ})$	21,2	24,3	21,6	-
		$\sigma_{3db} (^{\circ})$	24,5	27,9	26	-
		$\bar{T} (s)$	11,1	9,4	7,5	-
		s	15	11,6	13,3	-
		%	42	52	4	-
Jun/1994	25 a 30	$\sigma_{\theta} (^{\circ})$	18,0	20,4	-	-
		$\sigma_{3db} (^{\circ})$	22,2	27,4	-	-
		$\bar{T} (s)$	11,8	9,2	-	-
		s	18,4	12	-	-
		%	84	13	-	-
Ago/1994	04 a 07	$\sigma_{\theta} (2)$	20,4	23	27,1	-
		$\sigma_{3db} (^{\circ})$	25,1	27,7	26,6	-
		$\bar{T} (s)$	10,7	9,2	6,4	-
		s	14,4	11,8	12,8	-
		%	23	77,5	19	-

Tabela 4.4: Valores médios dos parâmetros desvio circular, ângulo de 3db, período médio de pico, s e ocorrência de pico espectral nas faixas indicadas dos registros classificados como representativos de mar 22.

Mau Tempo – SE (22)			Faixas de frequência			
			1 (*)	2	3	4
Mês/Ano	dias	Parâmetro	$T > 10$ s	$T > 8$ s	$T > 4.5$ s	$T > 3.5$ s
Mai/1991	6 a 20	$\sigma_{\theta} (^{\circ})$	21,6	25,1	28,9	27,5
		$\sigma_{3db} (^{\circ})$	23,3	29	30,2	33,75
		$\bar{T} (s)$	11,0	8,7	6,8	4,3
		s	16,2	10,4	9,8	7,9
		%	46	45	29	2
Ago/1991	10 a 25	$\sigma_{\theta} (^{\circ})$	21,1	24,4	26,0	30,5
		$\sigma_{3db} (^{\circ})$	21,1	27,4	29,0	33,5
		$\bar{T} (s)$	11,1	8,4	6,3	4,0
		s	20,3	12	10,4	8,0
		%	12	78	43	14
Set/1992	8 a 20	$\sigma_{\theta} (2)$	21,7	25	28,5	31,2
		$\sigma_{3db} (^{\circ})$	17,9	27,4	31,2	31,2
		$\bar{T} (s)$	11,7	8,3	6,9	3,9
		s	28,3	12	9,2	9,2
		%	08	60	42	18
Março/1994	7 a 12	$\sigma_{\theta} (2)$	22,3	24,8	-	-
		$\sigma_{3db} (^{\circ})$	22	28,1	-	-
		$\bar{T} (s)$	10,7	9,0	-	-
		s	18,7	11,4	-	-
		%	5	97	-	-

*: para ago/91, dias 10 a 12; para set/92, dias 02 a 04.

A análise dos valores médios em cada situação (Tabela 4.5) confirmam o comportamento dos parâmetros de dispersão em função da frequência de oscilação das ondas, pelo qual o desvio circular e ângulo de 3db têm seu mínimo na faixa de marulhos e máximos nas ondulações associadas à ação do vento local. Dos casos analisados, a menor dispersão ocorreu nas situações de bom tempo sob influência de marulho (faixa 1) e a maior na faixa de alta frequência dos Mares de Sudeste.

Tabela 4.5. Valores Médios dos parâmetros direcionais nas distintas situações de mares.

		Faixas de frequência			
		1	2	3	4
Bom Tempo (11 e 12) *	$\sigma_{\theta} (^{\circ})$	18,9	25,1	24,4	27,6
	$\sigma_{3db} (^{\circ})$	18,5	20,9	25,7	28,1
	s	27	20,9	13,9	11,8
Mau Tempo – SO (21)	$\sigma_{\theta} (^{\circ})$	19,3	22,6	24,4	-
	$\sigma_{3db} (^{\circ})$	23,4	27,7	26,3	-
	s	16,6	11,8	13,0	-
Mau Tempo – SE (22)	$\sigma_{\theta} (^{\circ})$	21,9	24,8	27,8	30,9
	$\sigma_{3db} (^{\circ})$	22,6	27,9	30,1	32,4
	s	17,5	11,5	9,8	8,6

*: para faixa 1, média formada pelas situações isoladas de: mar/92 e ago/91.

No tocante às diferenças verificadas entre os parâmetros direcionais nas distintas faixas, o agrupamento dos valores de s , derivado do ângulo de 3db, em função do desvio circular para cada tipo de mar (Figura 4.8) fornece interessantes indicações sobre a distribuição de energia reconstruída pela DAAT:

- Nos Mares de SO, a aproximação dos pares com a relação teórica entre as grandezas indica que as distribuições direcionais em cada faixa são bem resolvidas, principalmente em função da alta energia característica dessa condição de agitação. Dessa forma, ambas as técnicas de cálculo satisfatórias para descrever a dispersão.
- Nos Mares de SE tal afirmação, com alguma concessão, é verdadeira para as faixas 2, 3 e 4. Para a faixa de menor frequência, a diferença entre as grandezas indica forte interferência na distribuição direcional, possivelmente causada por mistura de mares de direções próximas. Tal assunção é reforçada uma vez que nessas situações a faixa de marulhos somente é detectada momentos antes da evolução do mar pelo ciclone extratropical;
- Por fim, em relação à condição de bom tempo, onde predominam os mares locais, as maiores diferenças entre os parâmetros de dispersão são percebidas. Nesta condição, a baixa energia de agitação e a variabilidade do campo de ventos locais respondem pela distribuição energética menos resolvida.

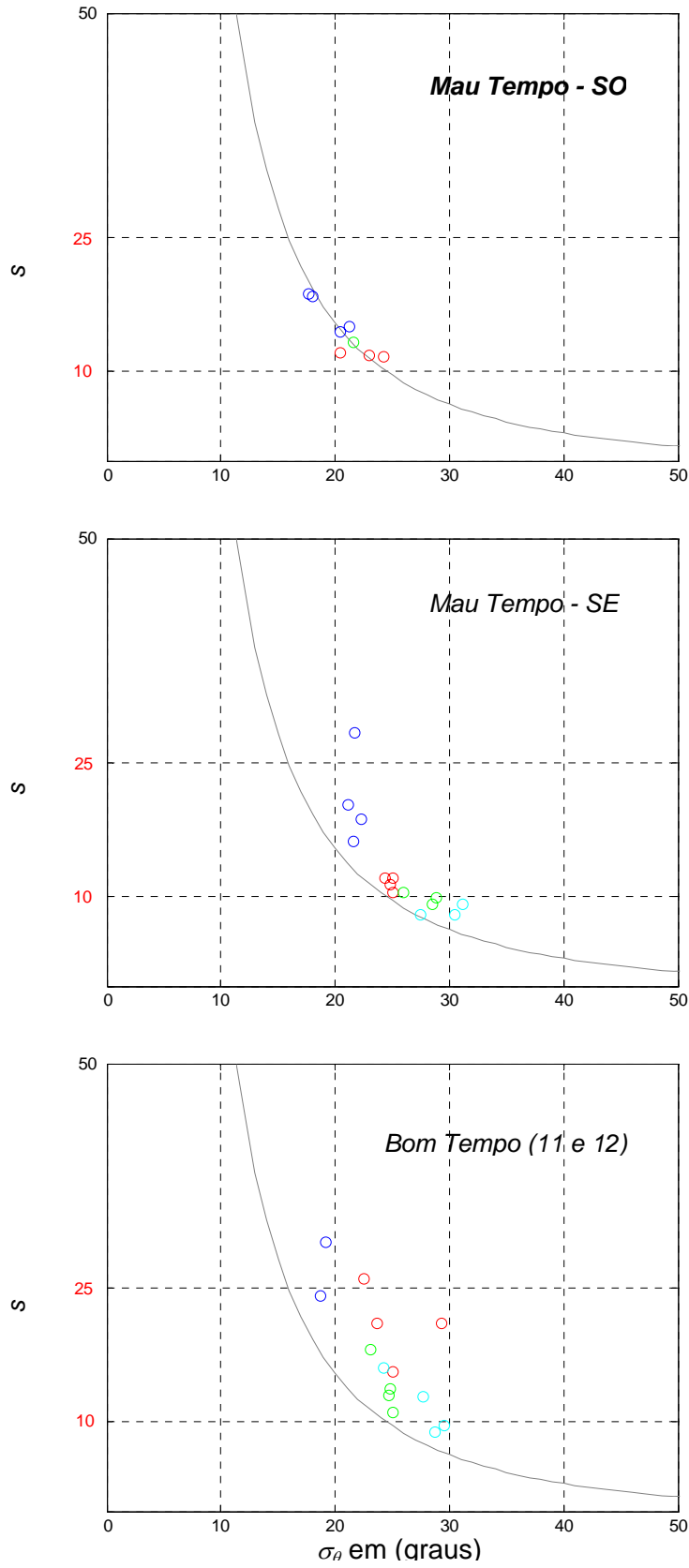


Figura 4.8: Relação entre valores de desvio padrão circular σ_θ e parâmetro s nas situações analisadas.

4.4 Estatística Geral

Investigando as diferenças dos valores dos parâmetros de dispersão direcional obtidas para um mesmo registro, foi possível determinar a influência do intervalo de integração em torno da direção principal θ_0 , conforme já abordado na seção 3.3.2. As Figuras 4.9 e 4.10, em seguida, representam exemplos de $D_f(\theta)$ obtidos pela DAAT a partir de dois registros distintos de março de 1992 (em Bom Tempo com swell - Mar 11), e ilustram esta análise. Enquanto que na Figura 4.10 os valores de desvio circular σ_θ e ângulo de 3db σ_{3db} se equivalem (18°), na Figura 4.9 a existência de picos energéticos secundários dentro do intervalo de integração - como que em situações de mistura de mares próximos - impõe significativa diferença entre os parâmetros de dispersão (16° para o ângulo de 3db e 19° para o desvio circular).

Portanto, visando eliminar ou reduzir o efeito da energia adjacente à direção principal no cálculo do desvio circular, o código da DAAT foi alterado de forma a aplicar um intervalo de integração adaptado ao contorno da distribuição direcional de energia de cada registro processado. O critério adaptativo utilizado determina o intervalo com base nos mínimos energéticos em torno da direção principal.

Os resultados obtidos com base nesta nova implementação da DAAT, como demonstrado pelos gráficos da Figura 4.11, revelam melhores correlações entre desvio circular e ângulo de 3db para as faixas de frequência investigadas: 79%, 71%, 72% e 63%, respectivamente. Esta figura também permite caracterizar distribuições normais dos valores de espectro normalizado segundo a dispersão direcional (por desvio circular), para as faixas 1, 2 e 3. Cabe ressaltar que na construção das correlações entre desvio circular e ângulo de 3db, os dados foram filtrados segundo um limiar mínimo de energia, considerando apenas os registros cujo valor de espectro fosse maior ou igual a 10% do espectro máximo da faixa, evitando a possível interferência de registros de baixa energia relativa.

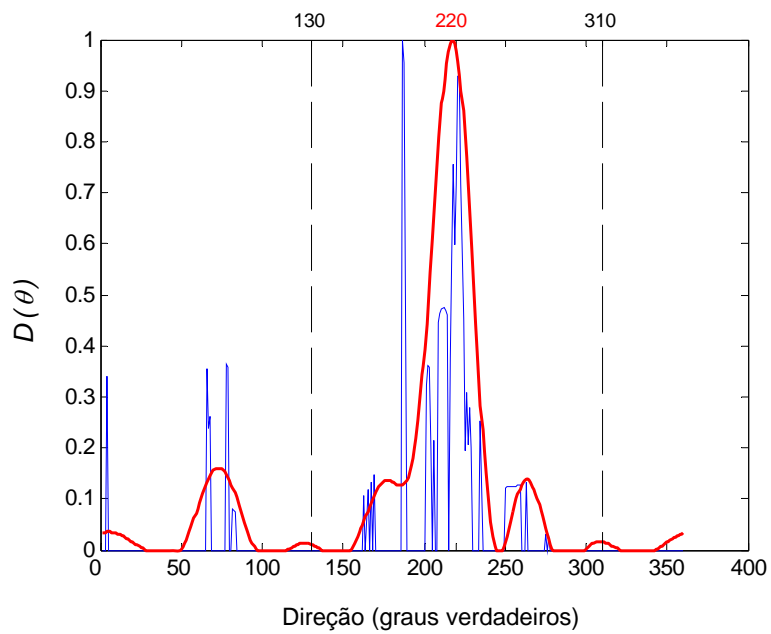


Figura 4.9: $D_f(\theta)$ para registro de março de 1992, evidenciando picos secundários de energia dentro do intervalo de integração (linha tracejada) em torno da direção principal. A linha vermelha indica a distribuição filtrada para o cálculo de σ_{3db}

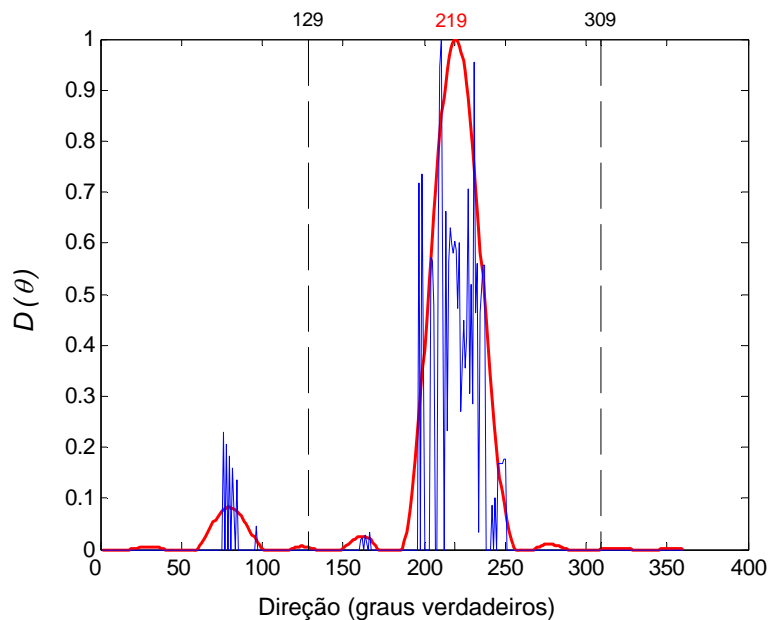


Figura 4.10: $D_f(\theta)$ para registro de março de 1992, intervalo de integração (linha tracejada) em torno da direção principal e distribuição filtrada para o cálculo de σ_{3db} .

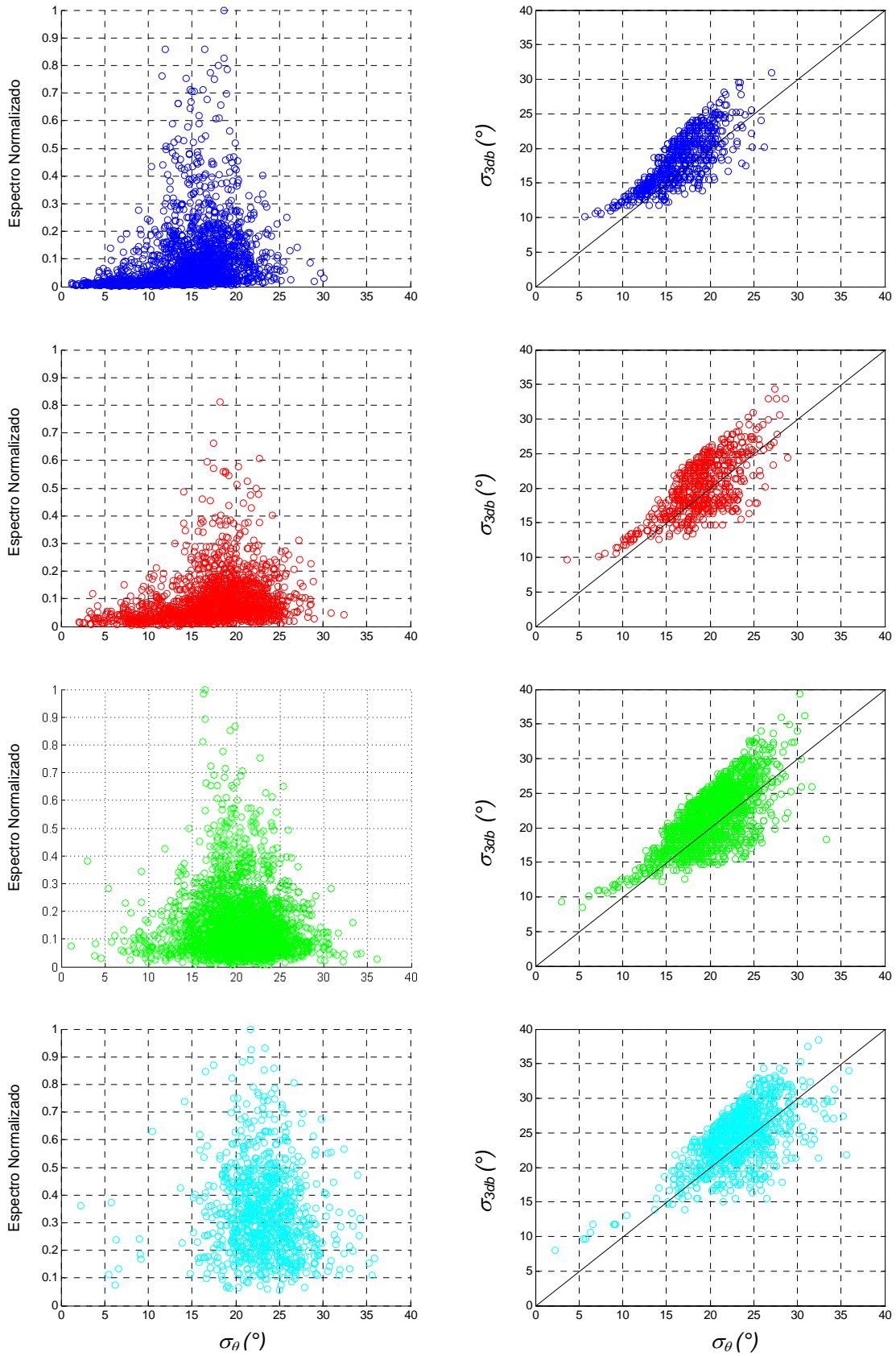


Figura 4.11: À esquerda, distribuição dos valores de espectro normalizado segundo desvio circular para as faixas de freqüência 1 (azul), 2 (vermelho), 3 (verde) e 4 (azul claro). À direita, relação entre desvio circular e ângulo de 3db para as mesmas faixas.

Uma visão geral da relação entre a dispersão direcional dos registros de ondas de Marlim com os sistemas que lhes deram origem foi obtida pela análise de ocorrência dos resultados de acordo com a direção principal. Esta análise permitiu a construção, para as distintas faixas de frequência investigadas, de distribuições de probabilidade conjuntas segundo intervalos de dispersão e de direção verdadeira.

Assim, o histograma da Figura 4.12 revela que as ondulações de maior período Bacia de Campos são originárias primordialmente entre SE e SO, associadas, portanto, às condições de Mau Tempo e *swell* em Bom Tempo já abordadas. Em termos numéricos, das observações acima de 10 segundos, 60% recaem entre as direções 175° e 225° e 50% entre 12° e 18° de dispersão direcional. Quanto à faixa 2, na Figura 4.13, há uma distribuição menos concentrada, com ocorrências significativas entre 60° e 200°, indicando associação com as tempestades do quadrante sul e sua evolução sobre o Oceano Atlântico. Em termos de dispersão, 65% das observações enquadram-se entre 15 e 24°. As faixas 3 e 4, nas Figuras 4.14 e 4.15, mostram forte relação com o Sistema de Bom Tempo na região, havendo concentração das observações entre as direções 0° e 60°. A dispersão nestas faixas é maior, com 72% de ocorrência recaindo entre 18 e 27° (faixa 3), e 63% entre 21 a 27° (faixa 4).

Investigando a relação entre os valores de dispersão com os períodos de pico identificados pela DAAT, a Figura 4.16 evidencia as observações feitas pela análise de ocorrência, demonstrando a associação do parâmetro de dispersão direcional com o estado de mar. Por esta figura, estabelece-se intervalos de variação da dispersão direcional às faixas de frequência abordadas, sendo notável ainda a variabilidade crescente dos valores com o período. A imposição de um limiar de energia de 10% do valor máximo da faixa para a representação dos resultados revela, pela Figura 4.17, uma significativa redução da variância dos valores nas faixas 1 e 2.

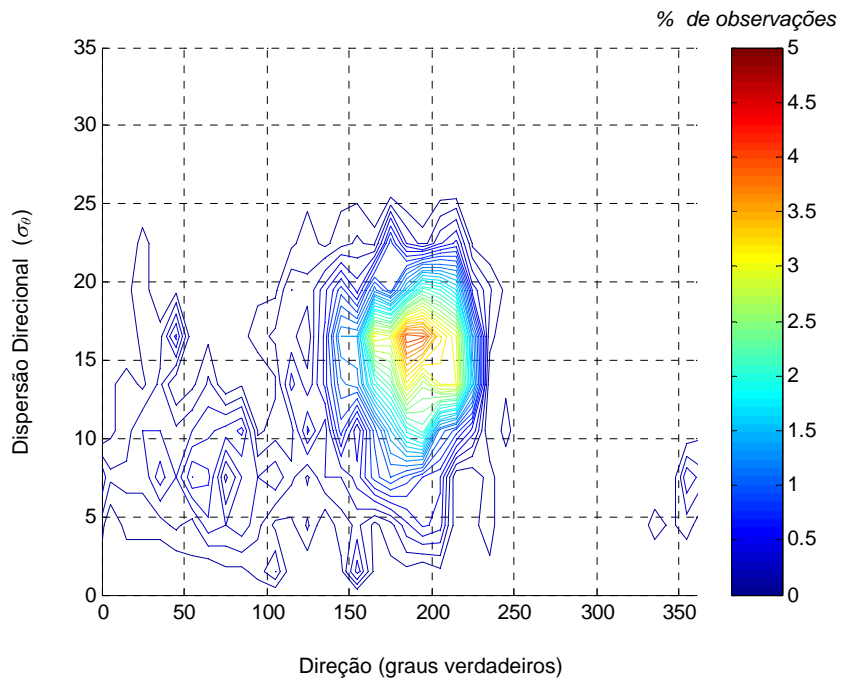


Figura 4.12: Distribuição conjunta de direção e dispersão direcional para os resultados na faixa 1 de freqüências.

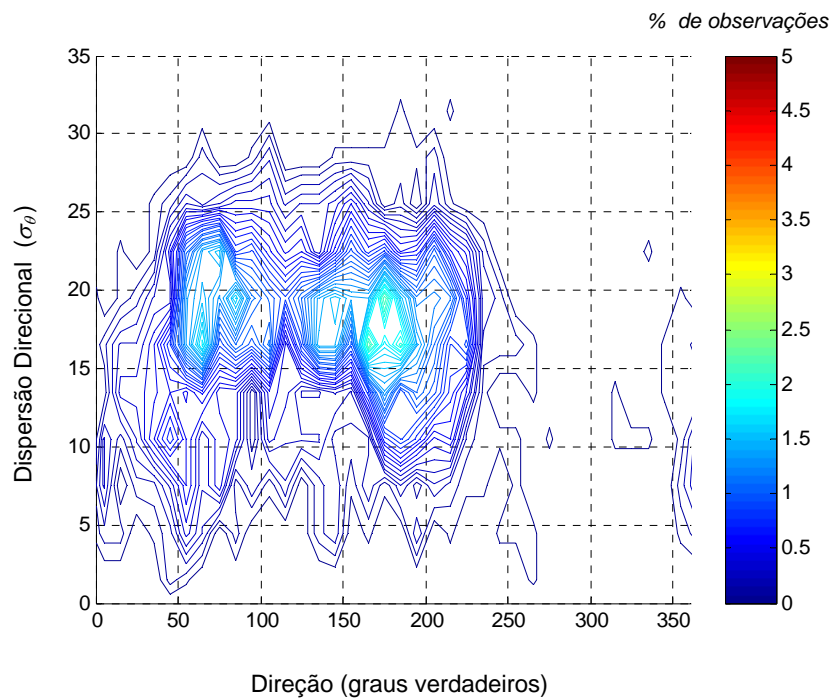


Figura 4.13: Distribuição conjunta de direção e dispersão direcional para os resultados na faixa 2 de freqüências.

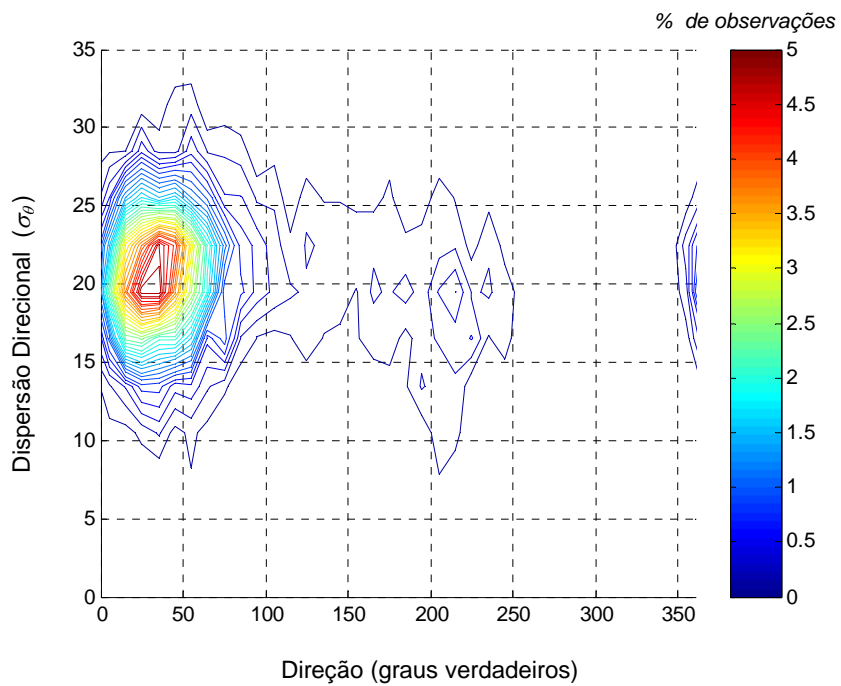


Figura 4.14: Distribuição conjunta de direção e dispersão direcional para os resultados na faixa 3 de frequências.

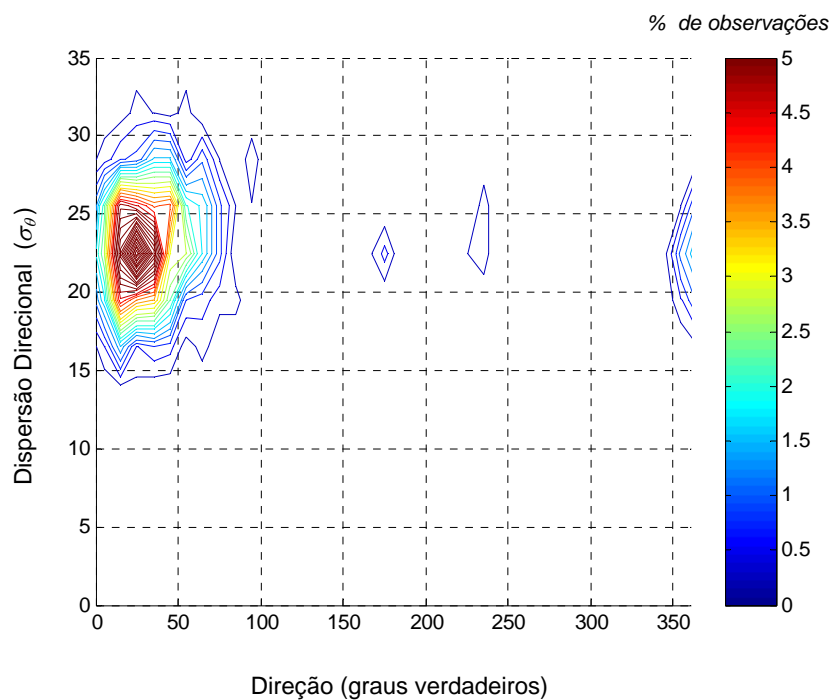


Figura 4.15: Distribuição conjunta de direção e dispersão direcional para os resultados na faixa 4 de frequências.

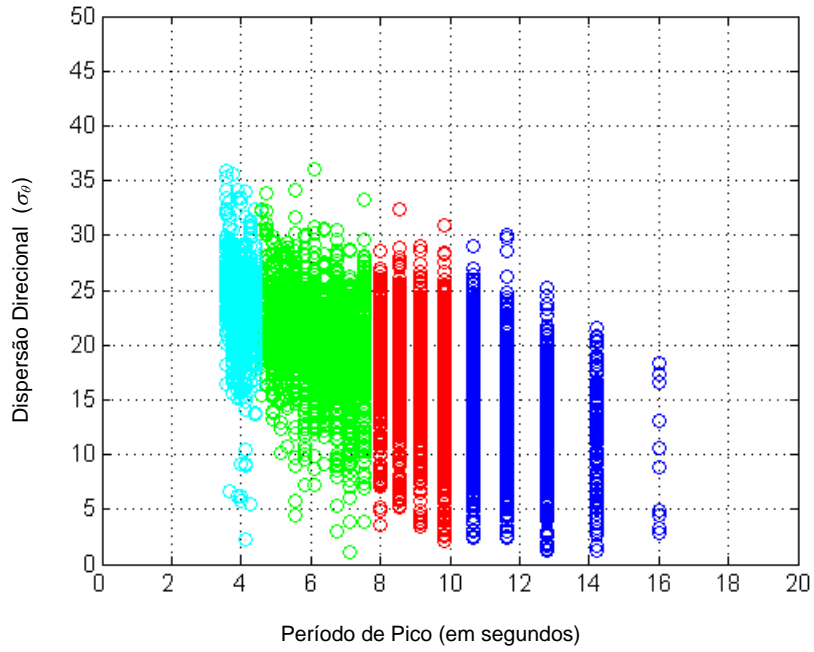


Figura 4.16: Relação entre período de pico e dispersão direcional para a série histórica analisada. A escala de cores observa a convenção adotada ao longo deste trabalho.

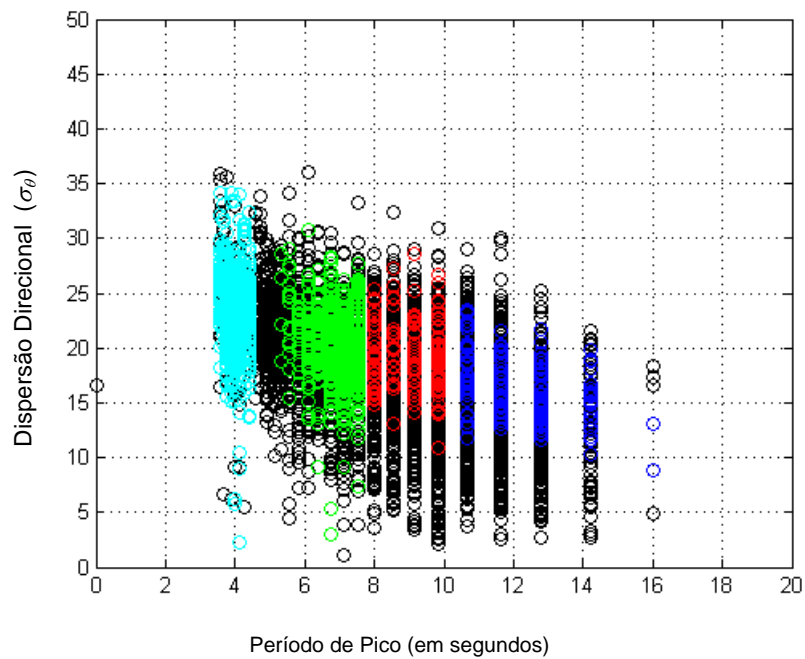


Figura 4.16: Relação entre período de pico e dispersão direcional para a série histórica analisada (em preto, ao fundo), com valores associados aos registros de maior energia em cor.

CAPÍTULO 5

Conclusões e Recomendações

Pode-se concluir pelos resultados apresentados, tanto decorrente das simulações quanto dos dados reais, que resolução espacial obtida pela reconstrução da distribuição direcional de energia $D(\theta)$ em faixas de frequência permite a estimação da dispersão e do espectro direcional com melhor acurácia do que técnicas espectrais convencionais. Isto é possível porque a curva de $D(\theta)$ calculada pela DAAT é formada pela combinação de eventos selecionados em função da estabilidade direcional e do conteúdo energético, permitindo a detecção de direções diferentes em uma mesma faixa de frequências. O sacrifício em resolução decorrente deste processo de seleção, o que somente é possível em intervalos pequenos de tempo, mostrou-se satisfatório em melhorar a consistência do estimador e, ao mesmo tempo, adequado para descrever os mares na Bacia de Campos.

Demonstrou-se também que os valores de dispersão calculados através da $D(\theta)$ estão muito mais consistentes com a parametrização proposta por GODA & SUZUKI (1975), em função do valor de s no modelo \cos^{2s} , do que os estimados pela técnica de análise espectral convencional. Quanto a esta, baseada em esquema de alisamento por segmentos fixos e nas formulações de KUIK *et al* (1988) para os cálculos direcionais em função das componentes de Fourier, foi possível verificar sua utilização no processamento interno do ondógrafo direcional *Waverider*.

Pela aplicação da técnica DAAT aos dados do Campo de Marlim, observa-se o comportamento esperado para a dispersão direcional em função da frequência de oscilação das ondas, sendo válido ressaltar:

1. Os menores valores de dispersão foram detectados para marulhos em situação de Bom Tempo;
2. Em situações de Mau tempo, a dispersão na faixa de frequência de marulhos é relativamente maior, indicando a combinação de ondulações de direções próximas;
3. Os maiores valores de dispersão ocorrem em situações de mar local com rápida variação de direção, típicas de evolução de sistemas meteorológicos nas proximidades do ponto de medição, como em Mau tempo de SE,
4. Em situações estáveis de mar local e quase-local, produzidos pelo anticiclone estacionado na região, os valores de dispersão são altos.

Em relação às diferenças notadas no cálculo da dispersão pelas técnicas do desvio circular e do ângulo de 3db, posto que fora da direção principal da $D(\theta)$ o número de graus de liberdade do estimador é menor, verifica-se que o ângulo de 3db representa o intervalo angular associado ao grau de liberdade máximo, enquanto que o desvio circular tende a ser mais influenciado pelo restante da distribuição. Neste caso, um aumento do tempo de observação, em que pese os limites relacionados com o esforço de amostragem e também a falta de estacionaridade do processo, tende a melhorar quantidade de informações (aumentando o número de graus de liberdade) e, conseqüentemente, a estimação da dispersão pela DAAT.

Referências Bibliográficas

1. BLACKMAN, R. B., TUKEY, J. W., 1958. *The Measurement of Power Spectra*. 1st edition, New York, Dower Publications, Inc.
2. BORGMAN, L. E., 1969, "Directional Spectra Models for Design Use". In: *Offshore Technology Conference*, pp.721-746. Houston, USA.
3. BORGMAN, L. E., 1982, "Directional Wave Spectra from Wave Sensors". In: EARLE, M.D., MALAHOFF, A. (eds), *Ocean Wave Climate*, vol.8, Marine Sciences Series, New York, USA, Plenum Press.
4. BURG, J. P., 1982, *Maximum entropy spectral analysis*, PhD dissertation, Stanford University, USA.
5. DONELAN, M. A., HAMILTON, J., HUI, W. H., 1985. "Directional Spectra of Wind Generated Waves", *Philosophical transactions of Royal Society*, pp. 509-562.
6. EMERY, W. J., THOMPSON, R. E., 1997, "Time-Series Analysis Methods". In: *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*, 1st ed., chapter 5, Oxford, UK, Elsevier Science Ltd.
7. EWANS, K. C., 2001, "Directional Spreading in Ocean Swell". In: *Proceedings of the 4th International Symposium Waves: Ocean Wave Measurement and Analysis*, vol.1. pp. 517-529, San Francisco, USA, September.

8. FISHER, N. I., 1993, *Statistical Analysis of Circular Data*, 1st ed., Cambridge, UK, Cambridge University Press.
9. GODA, Y., 1982, *Random Seas and design of Maritime Structures*. Tokyo, Japan, University of Tokyo Press.
10. GODA, Y., 1985, "Simulation in Examination of Directional Resolution". In: *Proceedings of the Conference on Directional Wave Spectra Applications*, Berkeley, USA, University of California, ASME Press, September.
11. GODA, Y., 1999, "A Comparative Review On The Functional Forms Of The Directional Wave Spectrum", *Coastal Engineering Journal*, vol. 41, n°1, pp. 1-20.
12. HASSELMAN, K., 1973, "Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay During the North Sea Wave Project, JONSWAP", *Deutsch Hydrogh. Z.*, suppl. A, 8(12).
13. LONGUET-HIGGINS, M. S., CARTWRIGHT, D. E., SMITH, N. D., 1963, "Observations of the directional spectrum of the sea waves using the motions of a floating buoy" In: *Proceedings of the Conference on Ocean Wave Spectra*, Maryland, USA, Prentice-Hall, pgs 111-136.
14. LYGRE, A. AND KROGSTAD, H. E., 1986, "Maximum Entropy Estimation of the Directional Distribution in Ocean Wave Spectra", *Journal of Physical Oceanography*, vol.16, pp. 2052-2060.
15. KROGSTAD, H. E., 2001, "Second Order Wave Spectra and Heave/Slope Wave Measurements". In: *Proceedings of the 4th International Symposium Waves: Ocean Wave Measurement and Analysis*, vol.1, pp.288-295, San Francisco, USA, September.

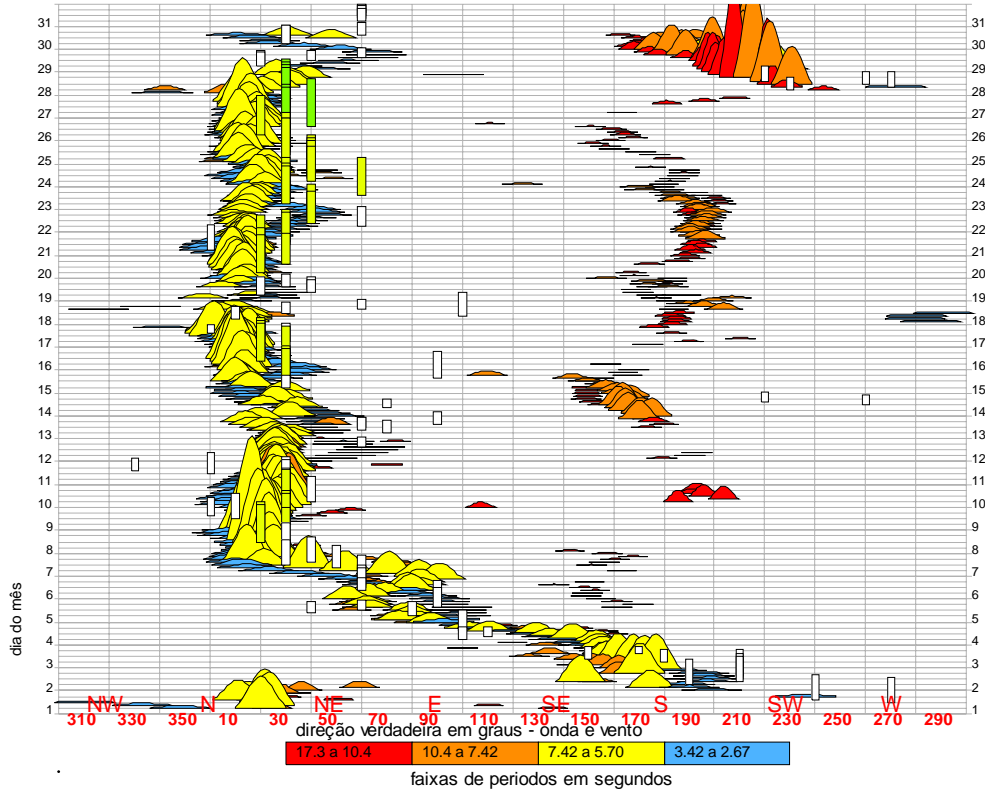
16. KINSMAN, B. *Wind Waves*. 1st ed., Englewood Cliffs, New Jersey, Ed. Prentice Hall, 1965.
17. KOBUNE, K., HASHIMOTO, N., 1986. "Estimation Of Directional Spectra From The Maximum Entropy Principle", In: *Proceedings of 5th International Offshore And Polar Engineering Conference*, Tokyo, Japan, vol.I, pp. 80-85.
18. KUIK, A. J., VAN VLEDDER, G. PH. AND HOLTHUIJSEN, L. H., 1988, "A Method for the Routine Analysis of Pitch-and-Roll Buoy Wave Data", *Journal of Physical Oceanography*, vol.18, pp. 1020-1034.
19. MASSEL, S. R., BRINKMAN, R. M., 1998, "On the Determination of Directional Wave Spectra for Practical Applications", *Applied Ocean Research*, vol.20, pp.357-374.
20. MELO, E., 1982, *Investigações sobre a Análise da Agitação Marítima*, Tese de Mestrado do Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 86pps.
21. OCHI, M. K., 1998. *Ocean Waves: The Stochastic Approach*. Cambridge Ocean Technology Series 6, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
22. PARENTE, C. E., 1999. *Uma Nova Técnica Espectral para Análise Direcional de Ondas*. Tese de Doutorado em Física - UFRJ, Rio de Janeiro, 111pps.
23. PETROBRAS, 2005. Portal Corporativo na *Internet*, através do endereço: http://www2.petrobras.com.br/Petrobras/portugues/plataforma/pla_bacia_campos.htm.
24. PINHO, U. F., 2003, *Caracterização dos Estados de Mar na Bacia de Campos*, Tese de Mestrado do Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 123pps.

25. SEIXAS, N.A., 1997, *Análise Direcional de Ondas*, Tese de Doutorado, Observatório Nacional, UFRJ, Rio de Janeiro, 143 pps.
26. SOUZA, M. H. S., 1988, *Clima de Ondas ao Norte do Estado do Rio de Janeiro*, Tese de Mestrado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, 181 pps.
27. STEPHEN, F. B., KOLLSTAD, T., 1991, "Field Trials of the Directional Waverider", In: *Proceedings of 1st International Offshore and Polar Engineering Conference*, vol.III, pp. 55-63.
28. TOBA, Y., 1978, "Stochastic form of the growth of wind waves in a single parameter representation with physical implications", *Journal of Physical Oceanography*, vol. 8, n^o 3, pp.494-507.
29. TUCKER, M. J., 1989, "Interpreting Directional Data from Large Pitch-Roll-Heave buoys", *Ocean Engineering*, Vol. 16, pp. 173-192.
30. VIOLANTE-CARVALHO, N., 1998, "*Investigações sobre o clima de ondas na bacia de Campos e correlação com situações meteorológicas associadas*", Tese de Mestrado do Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 120pps.
31. WANG, D. W., 1992, "Estimation of Wave Directional Spreading in Severe Seas". In: *Proceedings of 2nd International Offshore and Polar Engineering Conference*, vol.III, pp. 146-153.

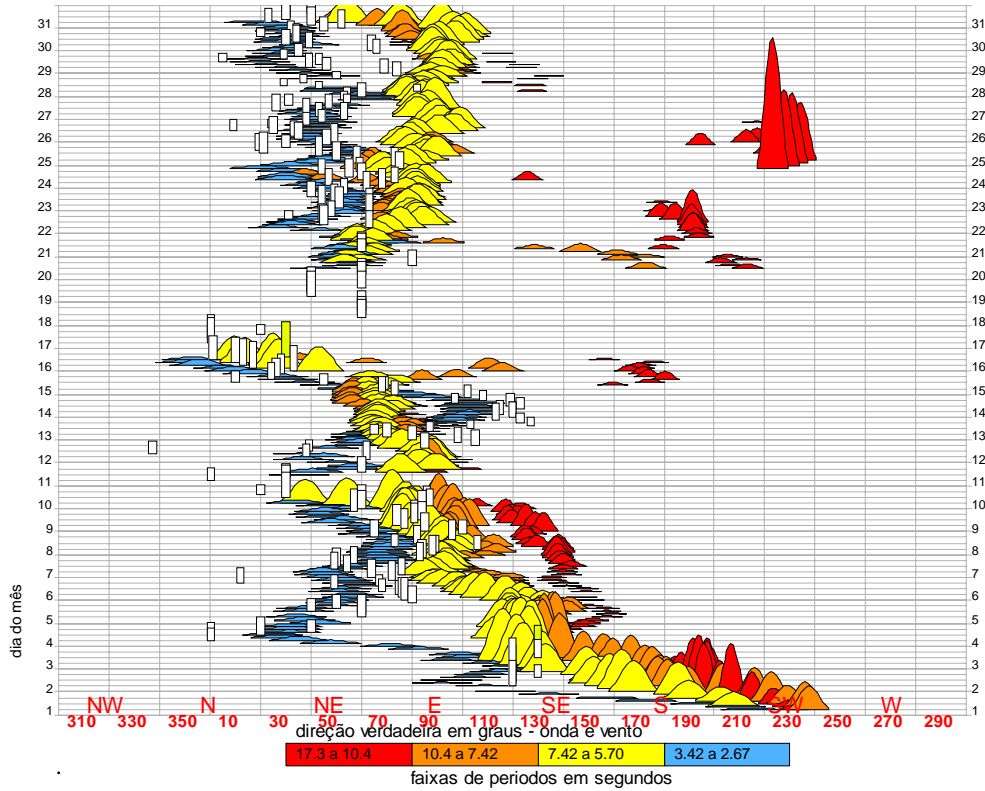
ANEXO I

PLEDS para Condição de Mar 11 e 12

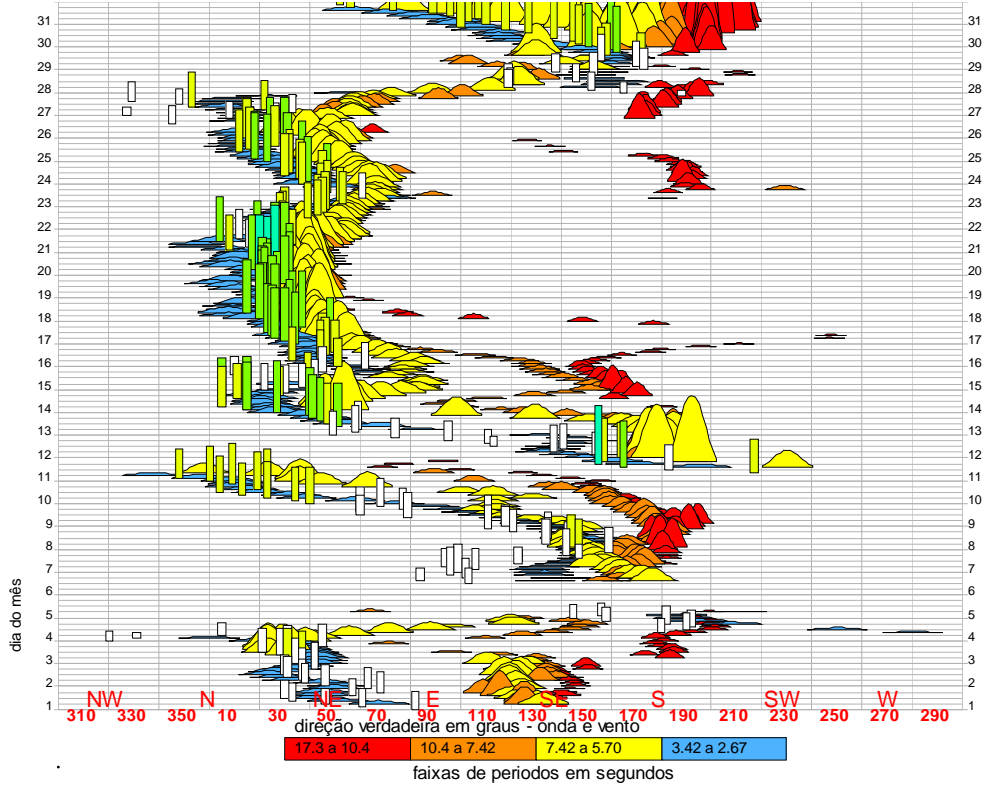
ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS-MARLIM-dez/91



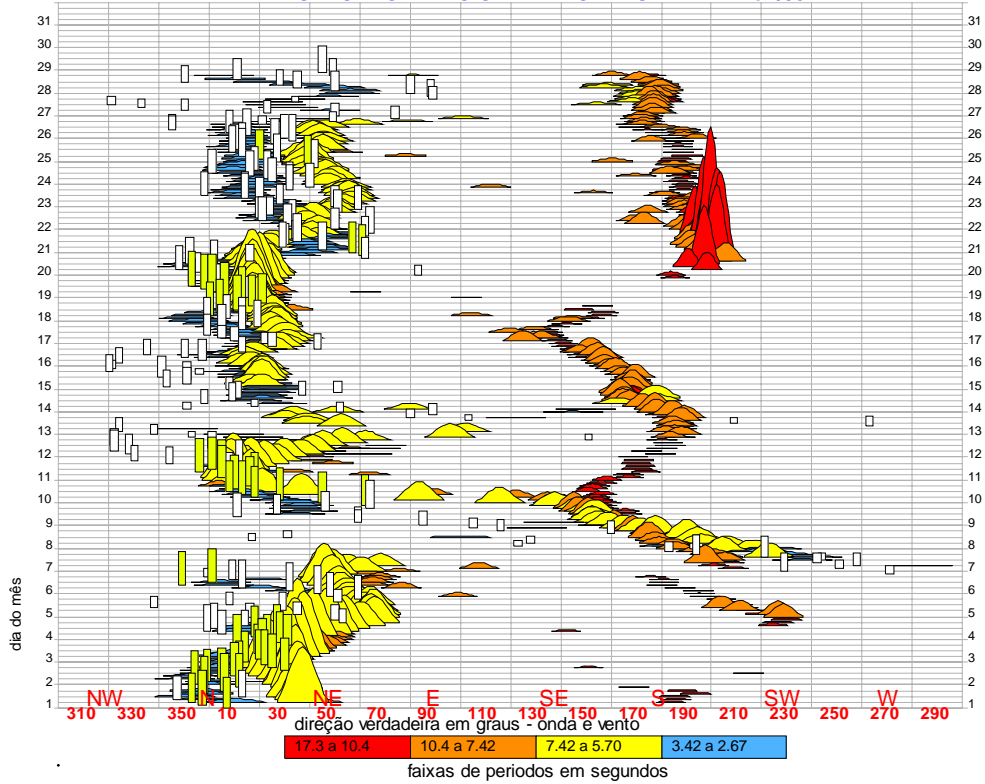
ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS-MARLIM-mar/92



ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS-MARLIM-out/94



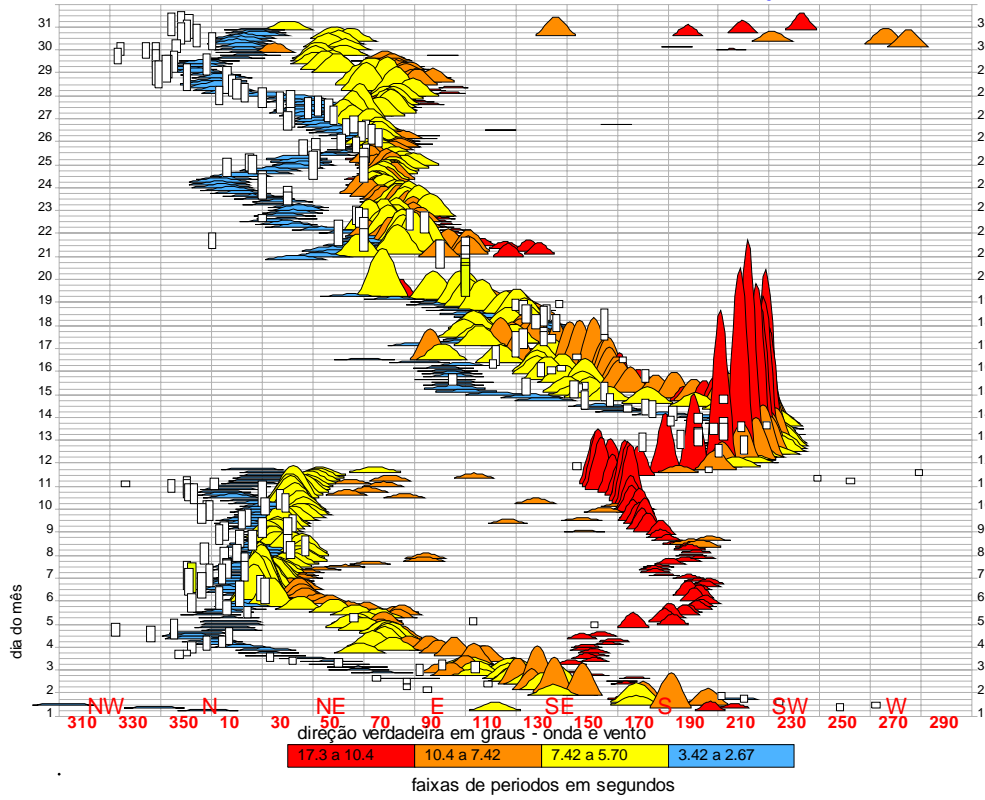
ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS-MARLIM-fev/95



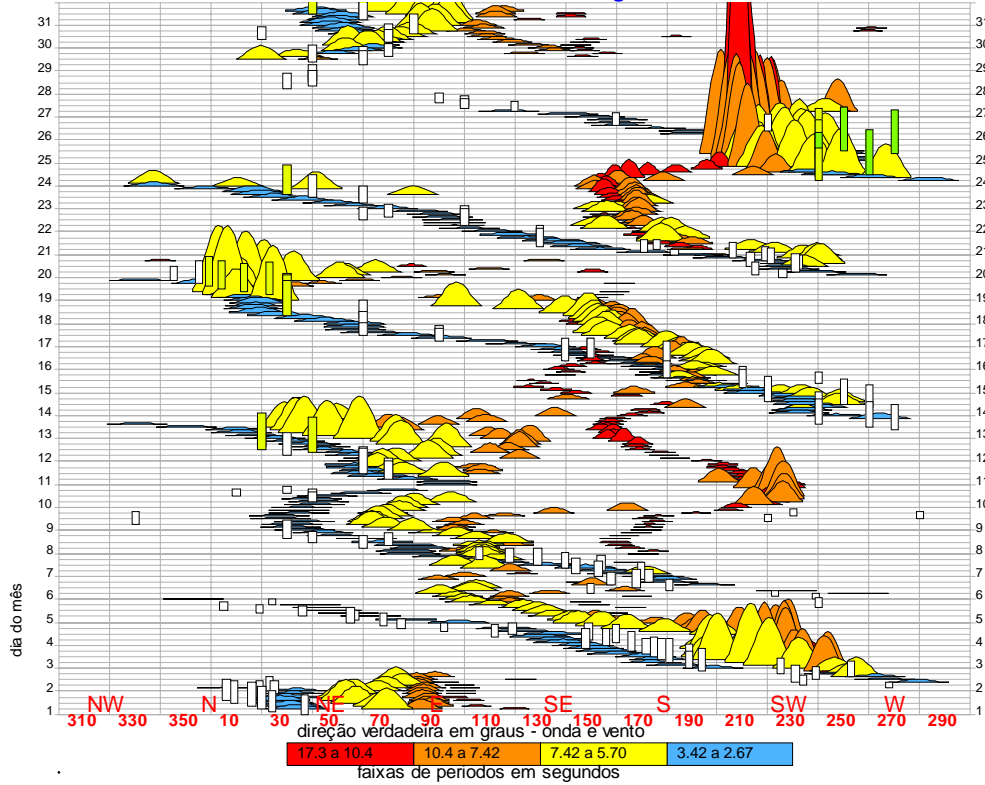
ANEXO II

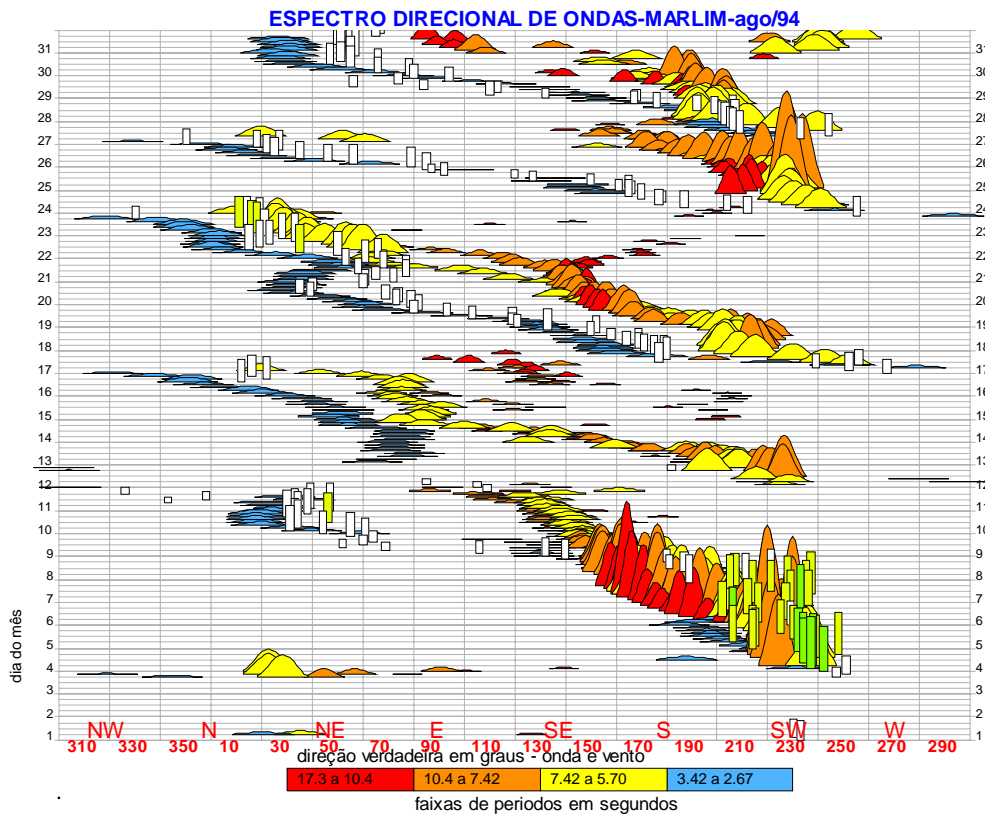
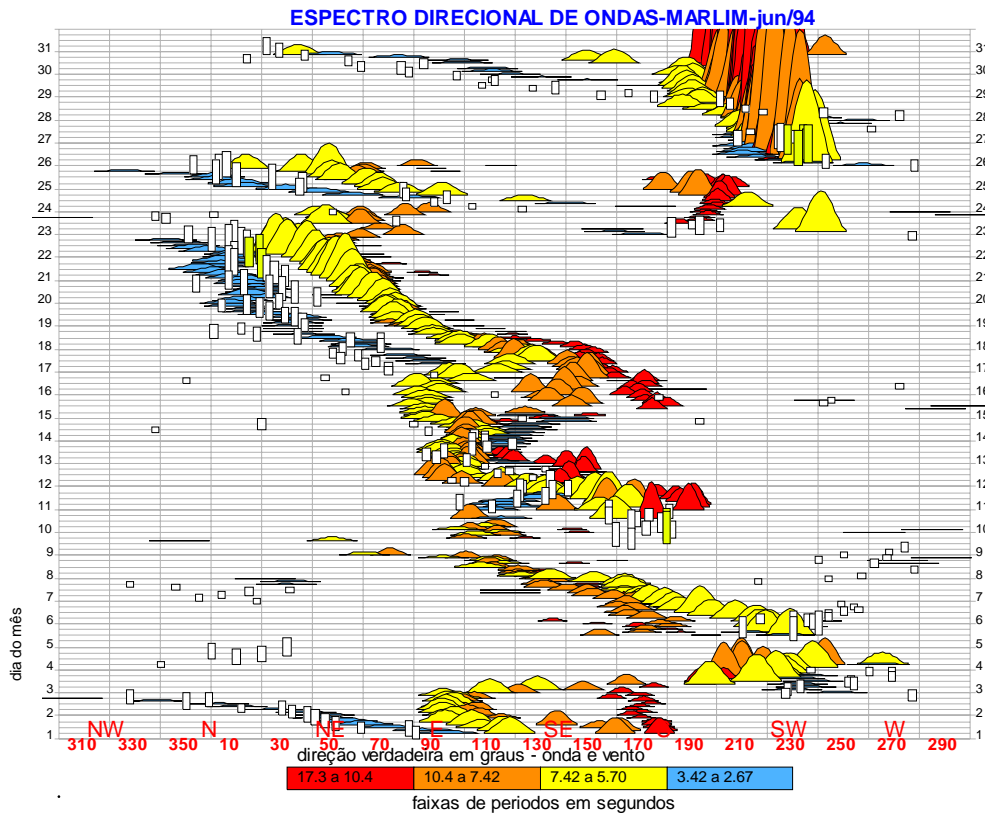
PLEDS para Condição de Mar 21

ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS-MARLIM-jun/92



ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS-MARLIM-ago/92

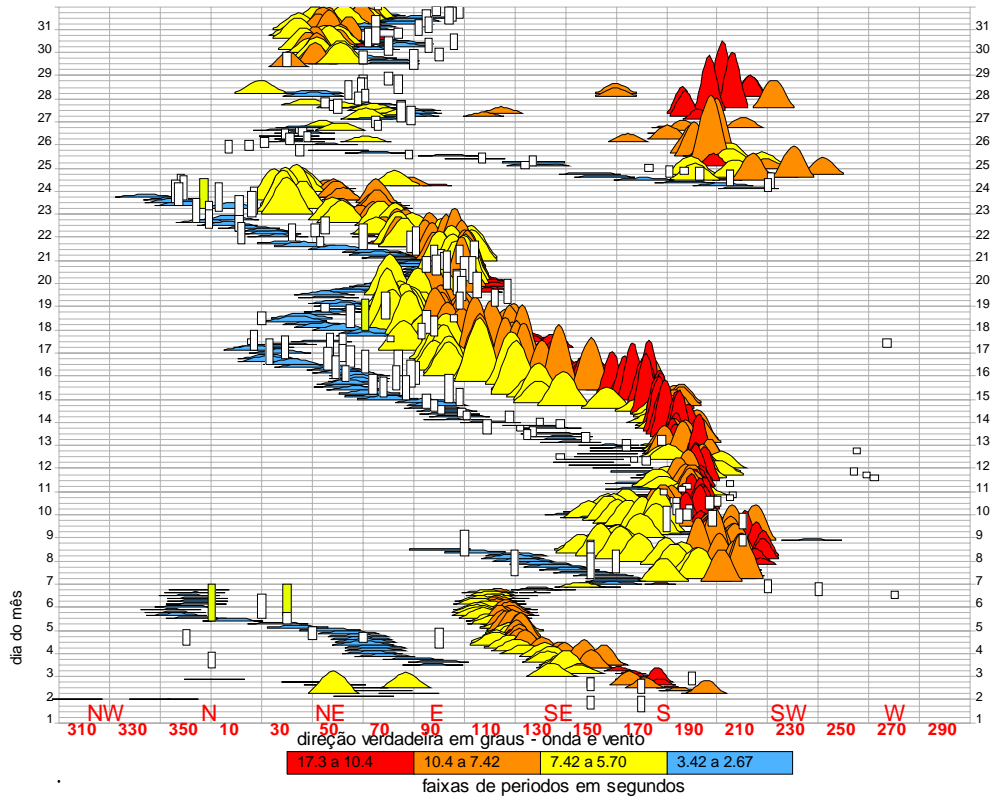




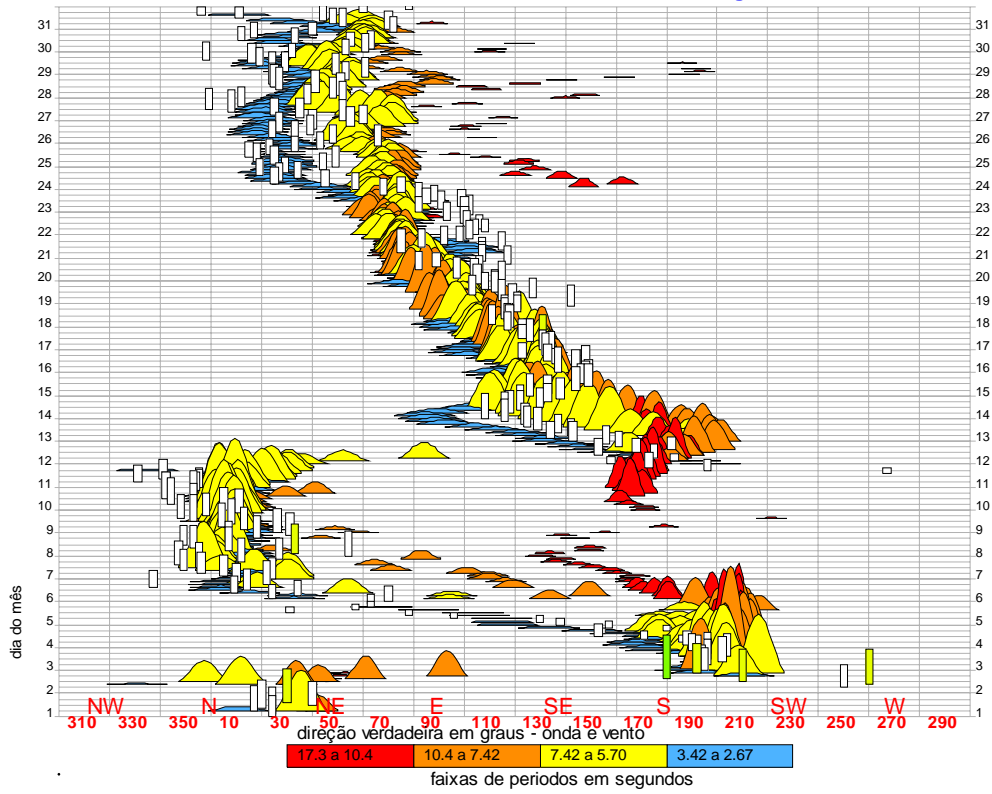
ANEXO III

PLEDS para Condição de Mar 22

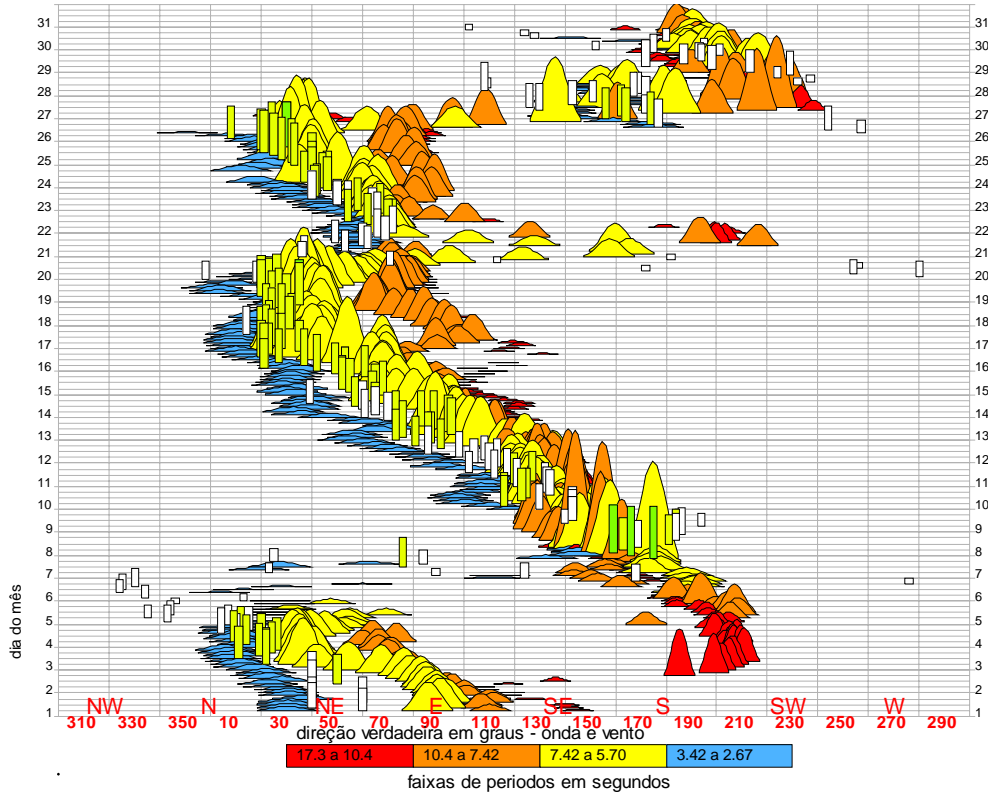
ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS-MARLIM-mai/91



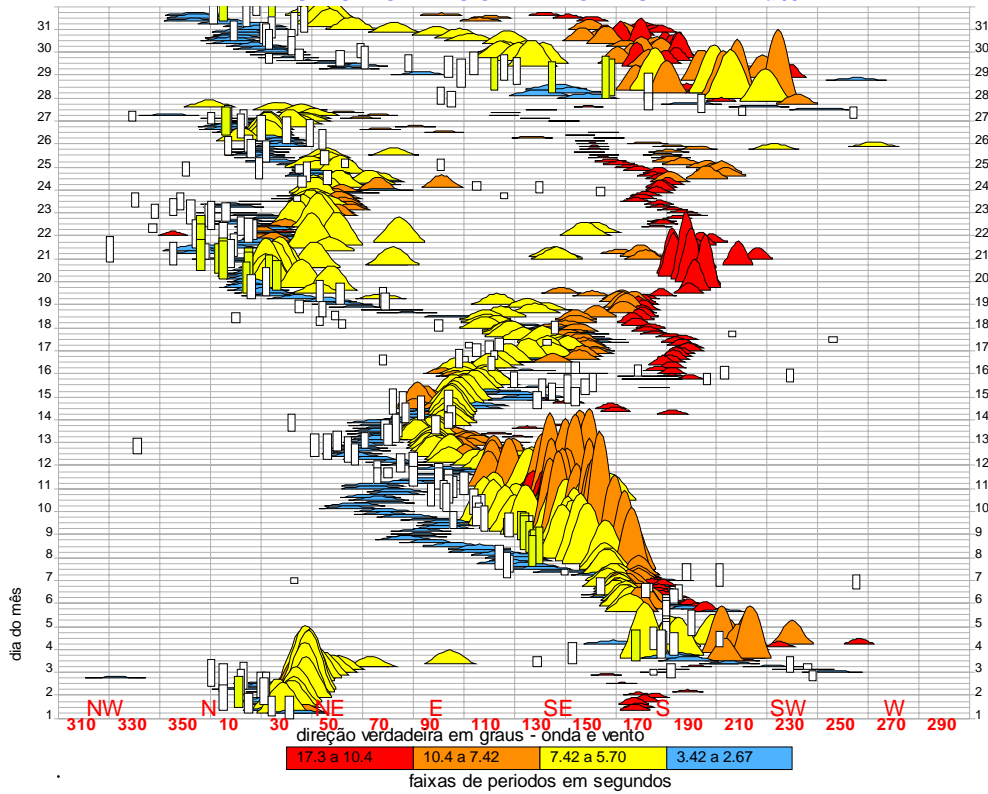
ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS-MARLIM-ago/91



ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS-MARLIM-set/92



ESPECTRO DIRECIONAL DE ONDAS-MARLIM-mar/94



Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)