

**UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA  
E ENERGIA**



**ESPECTROS DIRECCIONAIS DAS ONDAS MARÍTIMAS  
DO ASAR DO ENVISAT - SUA UTILIZAÇÃO NA  
AVALIAÇÃO DO RECURSO ENERGÉTICO**

Miguel Ricardo Praça Bruck

Mestrado em Ciências Geofísicas – Variante Oceanografia

2008

**UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA  
E ENERGIA**



**ESPECTROS DIRECCIONAIS DAS ONDAS MARÍTIMAS  
DO ASAR DO ENVISAT - SUA UTILIZAÇÃO NA  
AVALIAÇÃO DO RECURSO ENERGÉTICO**

**Miguel Ricardo Praça Bruck**

Dissertação orientada pelo Professor Doutor José da Silva (FCUL)  
e co-orientada pela Doutora Maria Teresa Pontes (INETI)

Mestrado em Ciências Geofísicas – Variante Oceanografia

2008

# Índice

Lista de Figuras	2
Agradecimentos	4
Introdução	5
1. Ondas Marítimas	7
1.1 Ondas Sinusoidais	8
Energia e Potência das Ondas Sinusoidais	10
Potência	11
1.2 Agitação marítima	12
Potência da Agitação Marítima	14
Direcção	14
2 ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar)	16
2.1 Fundamentos da detecção por sistemas ASAR.	16
2.2 O ASAR e as ondas marítimas	19
3. Dados	24
3.1 ASAR	25
3.2 Bóia - Ondógrafo	26
3.3 Dados Seleccionados	27
4. Metodologia	28
Parâmetros de qualidade	28
5. Resultados	29
5.1 Comparação de parâmetros integrais	30
5.2 Comparação da forma espectral	35
5.3 Comparação da direcção	42
6. Conclusões	48
Referências	49
ANEXO 1	51
ANEXO 2	52

## Lista de Figuras

Fig. 1.1 – Representação dos diferentes tipos de ondas marítimas. (Holthuijsen, 2007)	7
Fig. 1.2-Representação esquemática de uma onda sinusoidal	8
Fig. 2.1 – Representação das diferentes bandas do espectro electromagnético	16
Fig. 2.2 – Representação da geometria de detecção remota por um sistema RADAR	17
Fig. 2.3 – Representação da emissão e recepção de um impulso radar.	17
Fig. 2.3 – Representação da construção de uma antena de abertura sintética (SAR)	18
Fig.2.5 – Representação de duas ondas electromagnéticas com diferentes fases na banda K	18
Fig.2.6 – Representação das medições do tipo “wave mode”.	20
Fig.2.6 –Imagette SLC wave mode	21
Fig.2.7 – Esquema do processo de obtenção do produto ASA_WVW_2P	22
Fig.3.1 – Localização das bóias – ondógrafo em águas profundas da rede NDBC	26
Fig. 5.1 Comparação de $H_s$ da bóia 51001 vs $H_s$ ASAR para distância máxima de 100km	34
Fig. 5.3 – O mesmo da Fig. 5.1 para $T_z$	31
Fig.5.2 – O mesmo da Fig.5.1 para $T_e$	31
Fig.5.4 – O mesmo da Fig.5.1 para $P$	31
Fig.5.7 – O mesmo que a Fig.6.5 para $T_z$	32
Fig.5.6 – O mesmo que a Fig.6.5 para $T_e$	32
Fig.5.8 – O mesmo que a Fig. 6.5 para $P$	32
Fig.5.9. - Comparação de $H_s$ da bóia 51028 vs $H_s$ medido pelo ASAR	33
Fig. 5.11 - O mesmo que Fig.6.9 para $T_z$	33
Fig.5.10 – O mesmo que a Fig 6.9 para $T_e$ .	33
Fig.5.13 – Comparação de $H_s$ da bóia 51028 vs $H_s$ ASAR	34
Fig 5.15 – O mesmo que Fig. 5.13 para $T_z$	34
Fig.5.14 - O mesmo que a Fig.5.14 para $T_e$	34
Fig 5.16 – O mesmo que a Fig. 5.13 para $P$	34
Fig.5.17. – $S(f)$ ASAR vs bóia 41001 4/1/06 2.39 AM dx=32 km dt=21 min.	36
Fig. 5.19 – $S(f)$ ASAR vs bóia 41001 19/4/2006 3 AM, dx=32 km, dt=21 min.	36
Fig.5.18 – O mesmo que na Fig 5.17 para dx=70 km	36
Fig. 5.20 – O mesmo que a Fig 5.18 para dx =70 km	36
Fig.5.21 – $S(f)$ ASAR vs Bóia 41002 5/3/06 2:53, dx=27 km, dt = 7min.	37

Fig.5.22 -O mesmo que Fig 5.21, dx=82 km, dt=8 min.	37
Fig.5.23 - $S(f)$ ASAR vs bóia 44008 15/05/06 2:23, dx= 53 km, dt= 23min.	38
Fig.5.24 $S(f)$ ASAR vs bóia 44008 11/12/06 2:23, dt=23 min, dx=53 km.	38
Fig.5.25 $S(f)$ ASAR vs bóia 44008 15/11/06 14:53, dx=20 km, dt= 7 min.	38
Fig.5.26 $S(f)$ ASAR vs bóia 44008 6/03/6 2:23 AM, dx= 65 km, dt= 23 min.	38
Fig.5.27 $S(f)$ ASAR vs bóia 41040 10/01/06 13:30 ,dx=38 km, dt =30 min.	39
Fig.5.28 $S(f)$ ASAR vs bóia 41040 25/01/06 1:33 ,dx=50 km, dt =27 min.	39
Fig.5.29 - $S(f)$ ASAR vs bóia 46005 11/4/06, dx=34 km, dt=4 min.	39
Fig.5.30 – O mesmo que na Fig. 5.29 para dx=67 km	39
Fig.5.31 - $S(f)$ ASAR vs bóia 46059 6/1/06 46059 18:52, dx=38 km, dt=8 min.	40
Fig.5.32 - $S(f)$ ASAR vs bóia 46059 21/4/06 18:52, dx= 38 km ,dt=8 min.	40
Fig.5.33 - $S(f)$ ASAR vs bóia 51028 15/01/06 8:25 AM ,dx= 34 km, dt= 25min.	41
Fig.5.34 – O mesmo que na Fig. 5.33 para dx = 69 km	41
Fig.5.35 - $S(f)$ ASAR vs bóia 51028 17/09/06 8:26 AM, dx =30 km, dt =34 min.	41
Fig.5.36 – O mesmo que na Fig. 5.35 para dx= 72 km.	41
Fig.5.39 – $S(f, \theta)$ do ASAR da medição da fig. 5.37	43
Fig.5.41 – $S(f, \theta)$ do ASAR da medição da fig. 5.40	43

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer em primeiro lugar a todos os que tornaram possível a execução e elaboração desta tese de mestrado, em particular ao Professor José da Silva e à Doutora Teresa Pontes por terem sido meus orientadores. Aos meus colegas José Cândido, André Candelária e Jean-Baptiste Saulnier que me apoiaram e discutiram os resultados e também deram contribuição para resolver as dificuldades surgidas, e também a todos os outros amigos e colegas, o meu muito obrigado.

Quero agradecer igualmente ao Dr. Fabrice Collard da BOOST Technologies, França, por me ter respondido às diversas questões que surgiram ao longo deste trabalho, e assim contribuiu para a minha formação no domínio das medições remotas da agitação marítima.

Ao INETI agradeço por me ter acolhido e me ter possibilitado realizar este trabalho.

Quero também referir que os dados do ASAR do satélite ENVISAT, ASA\_WVW\_2P foram fornecidos pela European Space Agency (ESA) através do contrato de categoria-1 id-3936 “Advanced Ocean Surface Data: Wave Energy and Primary Production”.

## INTRODUÇÃO

A energia das ondas marítimas é uma fonte de energia que merece actualmente grande atenção, sendo muito importante conhecer o clima e o recurso energético das ondas do mar para seleccionar os locais para a instalação dos sistemas de conversão e efectuar o seu dimensionamento. Através da medição efectuada pelas bóias – ondógrafo é possível obter uma caracterização da agitação marítima. Contudo as bóias – ondógrafo são instrumentos que só efectuam medidas num ponto, sendo escassos os dados existentes destes sistemas de medição. Através da detecção remota é possível obter uma cobertura espacial global, sendo a realização das medidas independentes da existência de fortes tempestades o que não acontece muitas vezes com as bóias que se danificam ou ficam inoperacionais nos casos extremos. O radar – altímetro, o primeiro instrumento de detecção remota usado para efectuar medidas remotas no espaço de agitação marítima, fornece informação de alta qualidade da altura das ondas, mais precisamente a altura significativa. Mais recentemente em detecção remota é utilizado o sensor SAR (Synthetic Aperture Radar) que, para além de medir a altura e o período das ondas marítimas, consegue também medir a direcionalidade. O sensor SAR mais avançado é o ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) que se encontra a bordo do satélite de observação terrestre da Agência Espacial Europeia (ESA) ENVISAT lançado em 2001. O sensor ASAR opera no domínio das microondas, mais precisamente na banda C. Este sensor é chamado de “all weather sensor”, pois as microondas são capazes de penetrar as nuvens e são menos sensíveis às condições atmosféricas, do que a luz.

Neste trabalho foram utilizadas medições da agitação marítima que são obtidas a partir do modo de observação do tipo “wave mode”, denominado “ASAR wave mode ocean wave spectra” (ASA\_WWW\_2P) que distribuídas pela ESA. Este produto consiste em espectros direccionais  $S(f, \theta)$  que são estimados por um algoritmo que infere essa informação a partir de uma imagem de radar ASAR “wave mode” de dimensões 5 km por 5 km.

Neste trabalho realizou-se um estudo de validação das medidas do ASAR procedendo à comparação de parâmetros integrais agitação marítima, nomeadamente altura significativa  $H_s$ , período de cruzamento de zeros  $T_z$ , período de energia  $T_e$ , período de pico  $T_p$ , direcção média, assim como da forma espectral  $S(f)$  e a direcção média por banda de frequência  $\theta(f)$  obtidas a partir do ASAR e das medições de bóias-ondógrafo da rede norte Americana NDBC ( National Data Buoy Center).

Este “produto” do ASAR é obtido na primeira fase da implementação, o que tem permitido aumentar o número de medições disponíveis. Um dos outros modos de observação mais desejados devido à sua grande área de cobertura é a implementação do algoritmo de medição de agitação

marítima para imagens do tipo “Wide swath mode”, que consiste numa imagem de radar da superfície oceânica de dimensões 400 km por 400 km. Este modo torna possível obter pelo menos uma medição por cada dia durante vários dias consecutivos, existindo apenas uma falha temporal de 1 a 3 dias (ENVISAT, 2008).

Este trabalho constitui uma verificação independente da qualidade, das limitações, e de possíveis vantagens, dessas medições feitas pelo sensor ASAR, tendo em consideração o seu uso para avaliação/ monitorização correcta do recurso energético.

# 1. ONDAS MARÍTIMAS

As ondas marítimas são geradas por diversos fenómenos, gerando cada um destes fenómenos ondas de frequência (ou período) típicos. Os mais importantes desses fenómenos do ponto de vista energético são a atracção gravítica que origina as marés, e o vento que origina as ondas oceânicas comuns.

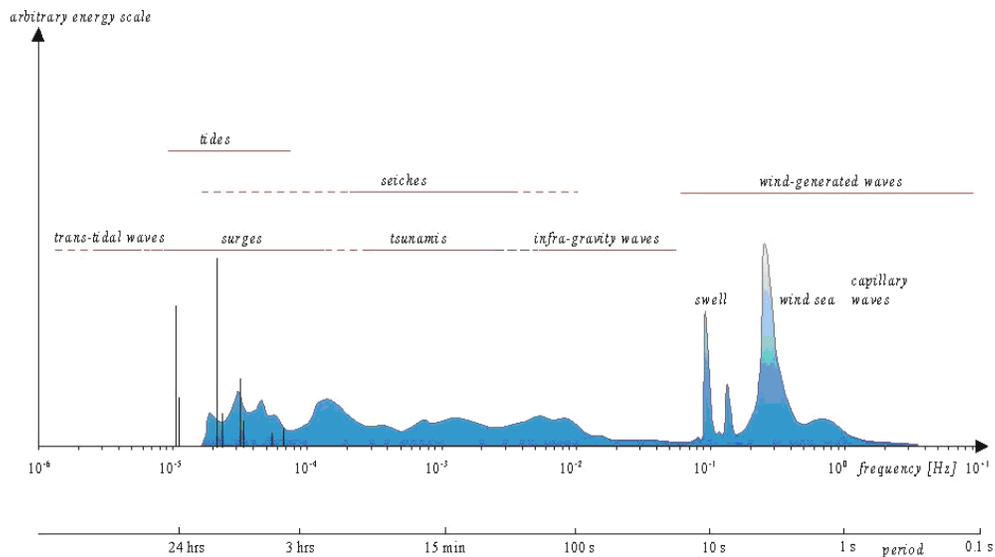


Fig. 1.1 – Representação dos diferentes tipos de ondas marítimas (in Holthuijsen, 2007)

Ao soprar sobre a superfície oceânica o vento origina pequenas ondas devido à transferência de parte da sua energia para a água através do atrito. À medida que o vento continua a soprar, as pequenas ondas já existentes na superfície oceânica vão aumentando de tamanho. Se essas oscilações forem “alimentadas” pela acção do vento durante um certo tempo, aumentam de intensidade, essas oscilações tornam-se ondas marítimas.

A altura e o comprimento de onda dessas oscilações da superfície do mar (ondas marítimas) dependem da intensidade do vento, do período de tempo durante qual actua, e do *fetch* isto é, do comprimento da superfície oceânica sobre a qual o vento actua. Na zona de geração das ondas, a agitação é muito irregular, com diferentes comprimentos de onda, (período) e direcção. Nessa zona a agitação denomina-se vaga (*wind sea*).

As ondas geradas pelo vento são progressivas, isto é, propagam-se para fora da zona de geração podendo percorrer dezenas de milhares de quilómetros praticamente sem dissipação. Por outro lado, durante esse percurso as ondas tornam-se mais regulares, o seu comprimento de onda aumenta e a direcção torna-se mais definida. A agitação nestas condições denomina-se ondulação (*swell*).

## 1.1 Ondas Sinusoidais

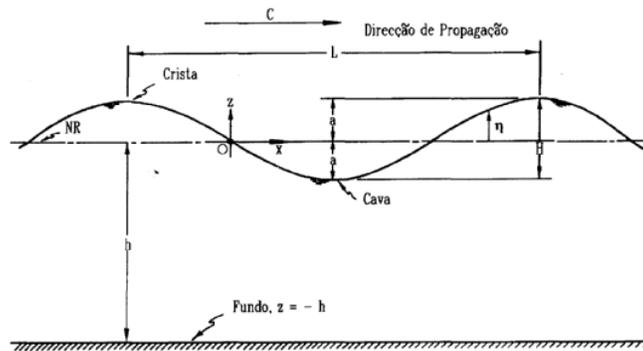


Fig. 1.2-Representação esquemática de uma onda sinusoidal

As ondas sinusoidais são caracterizadas pela altura  $H$  (distância da cava à crista), período  $T$  (intervalo de tempo que decorre entre a passagem de duas cristas ou duas cavas sucessivas no mesmo ponto) e comprimento  $\lambda$  (distância entre duas cristas ou cavas consecutivas) que está relacionado com  $T$ .

A frequência da onda é o inverso do período

$$f = \frac{1}{T} \quad (1.1)$$

e a frequência angular  $\omega$  relaciona-se com  $T$  através de

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (1.2)$$

O número de onda é dado por

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.4)$$

A velocidade de propagação da forma da onda ou velocidade de fase calcula-se através

$$C = \frac{\lambda}{T} \quad (1.5)$$

ou

$$C = \frac{\omega}{k}. \quad (1.6)$$

Em ondas de pequena amplitude ( $a = \frac{H}{2}$ ) a elevação da superfície do mar pode ser representada por

$$\eta = a \cos(kx - \omega t), \quad (1.7)$$

isto é, a elevação da superfície da água varia de um modo sinusoidal, periódico tanto no tempo como no espaço.

No caso de ondas de gravidade, a frequência angular  $\omega$  relaciona-se com o número de onda  $k$  através da relação de dispersão (e.g. Goda, 1985)

$$\omega^2 = gk \tanh kh \quad (1.8)$$

e a velocidade de fase é expressa por

$$C^2 = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{K} = \frac{g}{k} \tanh(kh) \quad (1.9)$$

sendo  $g$  a aceleração da gravidade e  $h$  a profundidade.

Em águas muito profundas ( $h \gg \lambda$ , na prática para  $h$  superior a  $\frac{\lambda}{2}$ ),  $\tanh(kh) \rightarrow 1$  e a relação de dispersão reduz-se a

$$\omega^2 = gk \quad (1.11)$$

e a velocidade de fase vem dada por

$$C^2 = \frac{g}{k}. \quad (1.12)$$

## Energia e Potência das Ondas Sinusoidais

A densidade média de energia cinética  $Ec$ , obtém-se integrando entre o fundo e a superfície do oceano a energia cinética de uma partícula de fluido de altura  $dz$ , comprimento  $dx$  e largura unitária.

$$Ec = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\lambda} dx \int_{-h}^{\eta} \frac{1}{2} \rho (u^2 + w^2) dx dz \quad (1.13)$$

Em águas profundas a componente horizontal da velocidade  $u$  e a componente vertical da velocidade  $w$  são calculados aproximadamente pelas expressões

$$u = a \omega \exp kz \cos(kx - \omega t) \quad (1.14)$$

$$w = a \omega \exp kz \sin(kx - \omega t) . \quad (1.15)$$

Em teoria linear pode-se substituir por zero o limite superior da integração em  $z$  obtendo-se

$$Ec = \frac{\rho a^2 \omega^2}{4k} [1 - \exp(-2kh)]. \quad (1.16)$$

Em águas profundas, sendo  $\omega^2 = gk$  como já tínhamos visto, resulta que  $Ec$  vem

$$Ec = \frac{1}{4} \rho g a^2 . \quad (1.17)$$

A densidade média de energia potencial  $Ep$  em relação ao nível da superfície em repouso pode calcular-se através de:

$$Ep = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\lambda} dx \int_0^{\eta} \rho g z dz = \frac{1}{2} \rho g \frac{1}{\lambda} \int_0^{\eta} \eta^2 dx = \frac{1}{4} \rho g a^2 \quad (1.18)$$

o que mostra que as energias cinética e potencial são iguais.

A densidade média de energia total das ondas de gravidade calcula-se através da soma das duas componentes

$$E = E_c + E_p = \frac{1}{2} \rho g a^2 = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (1.19)$$

Nos sistemas dispersivos, isto é, sistemas em que a velocidade de fase  $C$  depende do comprimento de onda, a energia  $E$  propaga-se a uma velocidade diferente da velocidade de fase, designada por velocidade grupo  $C_g$ . A velocidade de grupo de ondas é dada por

$$C_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (1.20)$$

donde se obtém

$$C_g = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] C \quad (1.21)$$

Em águas profundas, como o valor do seno hiperbólico é muito maior que o seu argumento, isto é,

$\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x}{\sinh(x)} \rightarrow 0$ , resulta que a velocidade de grupo para águas profundas é metade da velocidade

de fase  $C$

$$C_g = \frac{g}{2\omega} = \frac{gT}{4\pi} = \frac{C}{2}. \quad (1.22)$$

### Potência

A potência ou fluxo médio de energia é a taxa média de transferência de energia por unidade de comprimento da frente de onda que se calcula através da expressão

$$P = EC_g. \quad (1.23)$$

Sendo a densidade média total de energia é dada por (1.19) então temos

$$P = \frac{1}{2} \rho g a^2 C_g \quad (1.24)$$

Em águas profundas como  $C_g$  é dada por (1.22) a potência vem

$$P = \frac{1}{32\pi} \rho g^2 H^2 T \quad (1.25)$$

## 1.2 Agitação Marítima

O mar contém ondas com uma larga gama de frequências  $f$  e de direcções  $\theta$ , contribuindo para a variância (ou energia) de um sinal aleatório. A variância  $\sigma^2$  que representa a densidade de energia total é dada por

$$\sigma^2 = \int_0^{2\pi\infty} \int_0 S(f, \theta) df d\theta \quad (1.28)$$

$S(f, \theta)$  é o espectro direccionado que, como a designação indica, é a distribuição da densidade de energia nos domínios da frequência e da direcção de propagação.

Por vezes não se consideram as características direccionais, utilizando-se apenas o espectro de frequência  $S(f)$  que se relaciona com o espectro direccionado através de

$$S(f) = \int_0^{2\pi} S(f, \theta) d\theta \quad (1.29)$$

A informação contida no espectro  $S(f, \theta)$  ou  $S(f)$  é geralmente condensada através de parâmetros de altura, período e direcção no caso de  $S(f, \theta)$ .

Esses parâmetros são na maior parte obtidos a partir dos momentos espectrais  $m_n$  de ordem  $n$ , definidos por

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df \quad (1.30)$$

A altura significativa das ondas  $H_s$  (altura média do terço superior das ondas) é calculada a partir de

$$H_{m_0} = 4m_0^{1/2} . \quad (1.31)$$

Para caracterizar o período das ondas utilizam-se vários parâmetros

O período médio de cruzamento de zeros consecutivos  $T_z$  obtém-se através de

$$T_z = \left( \frac{m_0}{m_2} \right)^{1/2} \quad (1.32)$$

Este parâmetro não é adequado para o estudo do recurso energético das ondas pois é fortemente dependente das frequências altas (através de  $m_2$ ) que contêm pouca energia e apresentam elevada variabilidade.

O parâmetro mais adequado para a avaliação do recurso energético é o chamado período médio de energia  $T_e$  que se define por

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (1.33)$$

Que sendo função de momentos de ordem baixa  $m_{-1}$  é assim mais sensível à banda de baixa frequência do espectro, onde se encontra concentrada a maior parte da energia. Este período representa exactamente o período médio de toda a energia contida no espectro.

Outro parâmetro importante é o período de pico que corresponde ao inverso da frequência de pico, que é a frequência do espectro para a qual a densidade de energia é máxima.

$$T_p = \frac{1}{f_p}$$

## Potência

Como já foi referido, em teoria linear a agitação marítima pode ser considerada como a soma de muitas ondas de frequência e direcção diferentes.

A potência da agitação marítima num determinado ponto, depende da energia contida no espectro direccional e da velocidade de propagação da energia (Velocidade de Grupo), e calcula-se pela expressão

$$P = \rho g \int_0^{2\pi\infty} \int_0 S(f, \theta) C_g(f, h) df d\theta \quad (1.34)$$

sendo  $\rho$  a densidade da água do mar que é aproximadamente  $1025 \text{ kg/m}^3$

Em águas profundas,  $C_g = \frac{gT}{4\pi}$ , pelo que a potência pode calcular-se por:

$$P = \frac{\rho g^2}{4\pi} \int_0^{2\pi\infty} \int_0 S(f, \theta) f^{-1} df d\theta \quad (1.35)$$

Como a partir de (1.31) se obtém  $m_0 = \frac{H_s^2}{16}$  e sabendo que  $T_e$  é dado por (1.33) em águas profundas a potência virá finalmente

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e = 0.4906 H_s^2 T_e \quad (1.36)$$

que é expressa em kW/m (ou MW/km) se  $H_s$  é expressa em metros e  $T_e$  é expresso em segundos.

## Direcção

Como já foi referido anteriormente a informação contida no espectro direccional é condensada em diversos parâmetros, e no caso da direcção o parâmetro mais comum é a direcção média que é obtido a partir da seguinte expressão

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} \left( \frac{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S(f) \sin(\theta(f)) df}{\int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S(f) \cos(\theta(f)) df} \right) \quad (1.37)$$

em que  $\theta(f)$ , a direcção média por banda de frequência é definida por

$$\theta(f) = \tan^{-1} \left( \frac{\int S(f, \theta) \sin \theta d\theta}{\int S(f, \theta) \cos \theta d\theta} \right). \quad (1.38)$$

Contudo o parâmetro definido em (1.37) não é adequado em certos climas de ondas onde geralmente existem vários sistemas de ondas (grupos de ondas com frequência próxima) com direcções diferentes.

A direcção da agitação marítima pode também ser definida não por uma média das direcções, mas pela direcção da banda de frequências com mais energia – direcção predominante. Este é o parâmetro utilizado pela NOAA

$$\theta_{NOAA} = \theta(f(S \max)) \quad (1.39)$$

A diferença entre os parâmetros de direcção calculados através das duas fórmulas será tanto maior quanto maior for o número de sistemas de ondas nesse estado de mar com direcção diferente. A aplicação de (1.39) através da qual se calcula a direcção predominante é especialmente útil em zonas onde coexistem diversos estados de mar com direcções bastante diferentes, como é o caso do Oceano Pacífico. Neste trabalho utilizou – se para a medição da direcção das ondas a convenção náutica. A direcção das ondas marítimas é medida a partir do Norte geográfico e representa a direcção de origem das ondas.

## 2. ASAR – ADVANCED SYNTHETIC APERTURE RADAR

### 2.1 Fundamentos da detecção por sistemas ASAR

O sensor ASAR a bordo do ENVISAT é um sistema de detecção remota baseado em ondas de radar, mais especificamente microondas da banda C. A localização desta banda de frequência no espectro electromagnético é representada na figura seguinte.

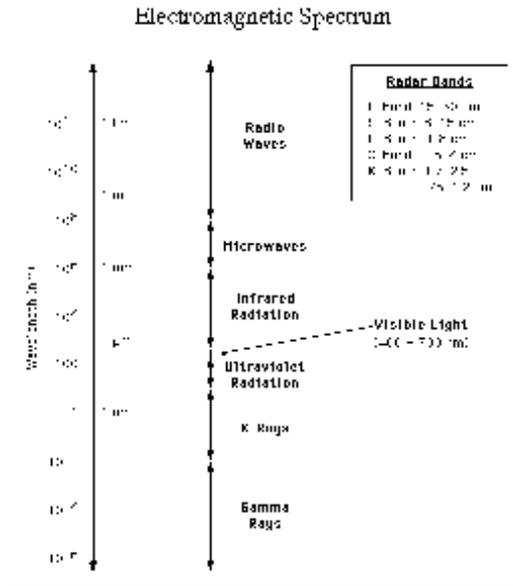


Fig.2.1 – Representação das bandas do espectro electromagnético (in ASAR Product Handbook, 2007)

O sensor ASAR é um sensor activo que ao contrário dos sistemas ópticos que precisam da iluminação do Sol, possui a sua própria fonte de iluminação, isto é um feixe de microondas coerente. Num feixe coerente as ondas electromagnéticas emitidas estão todas em fase, tal como um feixe de um laser. A antena ASAR é uma estrutura que é composta por pequenas secções chamadas de “radiadores”, pequenos emissores que tem controlo independente da fase e amplitude sobre o impulso emitido. A informação de cada uma desses emissores pode ser ponderada independentemente também, o que torna o ASAR muito versátil. O ASAR é um sensor lateral, que enquanto o satélite se desloca na direcção A (ver Figura 2.2), ilumina a superfície terrestre (no nosso caso, o Oceano) com o seu feixe ao longo de uma determinada área (chamada de “swath”) de largura C. Como se pode verificar na figura abaixo, a área “swath” é varrida ligeiramente à direita do nadir, o ponto directamente abaixo do sensor, representado por B.

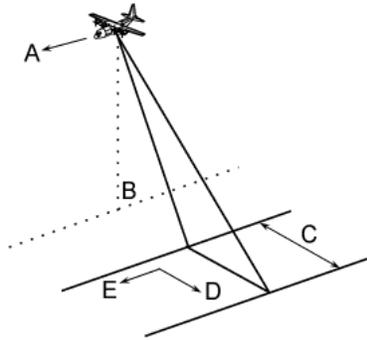


Fig. 2.2 – Representação da geometria de detecção remota por um sistema RADAR (in ASAR Product Handbook, 2007)

O feixe emitido pelo ASAR vai iluminando a superfície e o eco é recebido numa fracção de segundo depois. O tempo durante o qual cada alvo é iluminado pelo feixe é chamado de tempo de integração. O feixe do ASAR ilumina uma determinada área que contém diversos alvos. Cada alvo encontra-se a uma distância diferente da antena (ASAR), pelo que os seus ecos são recebidos em tempos diferentes.

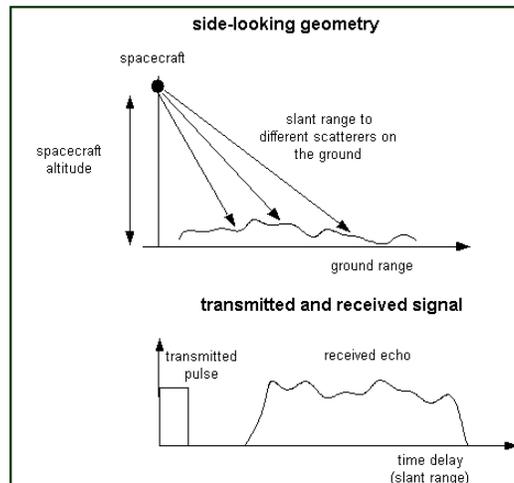


Fig. 2.3 – Representação da emissão e recepção de um impulso radar (in ASAR Product Handbook, 2007)

A distância a que cada alvo se encontra da antena é a “dimensão alcance” (*range*) da imagem SAR. Durante a transmissão de um impulso e a sua recepção o satélite encontra-se em movimento no espaço, pelo que o impulso é transmitido e recebido de diferentes localizações. Deste modo se forma a dimensão azimute da imagem SAR. Para dois objectos serem distinguidos como distintos numa imagem radar é necessário que o impulso completo reflectido de cada objecto seja recebido separadamente. Se os impulsos estiverem sobrepostos (ou colados) os dois objectos serão igualmente sobrepostos (colados) na imagem. Este processo encontra-se representado na Figura 2.3

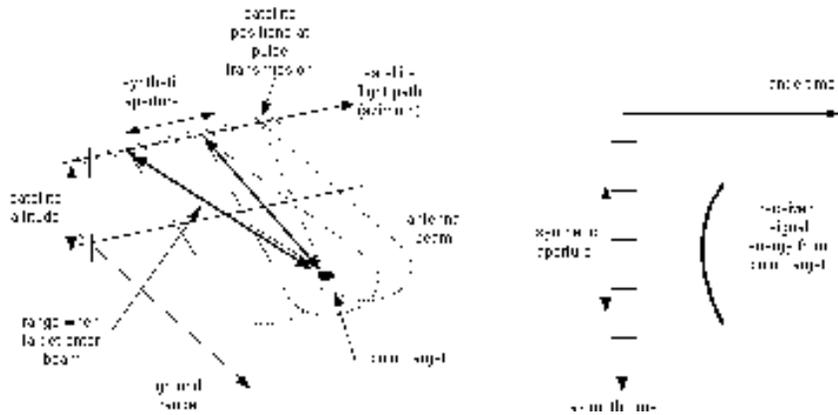


Fig. 2.3 – Representação da construção de uma antena de abertura sintética (SAR), in ASAR Product Handbook, 2007.

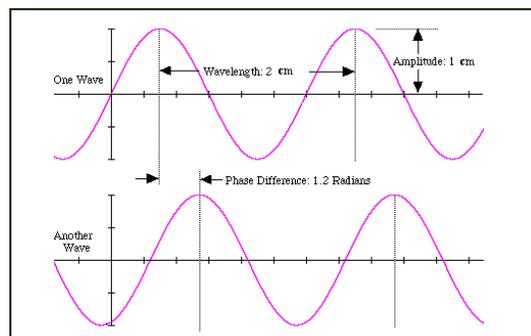


Fig.2.5 – Representação de duas ondas electromagnéticas com diferentes fases na banda K (in ASAR Product Handbook, 2007)

O sinal de azimute é uma aproximação linear FM (frequência modulada), cuja frequência varia com a variação do tempo em azimute. Mais concretamente no sistema de detecção SAR a resolução da dimensão do azimute é conseguido devido ao efeito de *Doppler* que se deve ao movimento relativo entre o satélite e a superfície terrestre, ou seja o sensor mede uma diferença de frequência do feixe reflectido em relação à frequência original do feixe emitido. Mais concretamente a dimensão de azimute, que supostamente é uma dimensão de uma certa “espessura” vai ser determinada pela largura de banda de frequências (chamada de banda de frequências *Doppler*) em que cada uma dessas frequências está associada a uma diferente posição da superfície oceânica. As diferentes mudanças de frequência associadas a cada eco são registadas numa “echo store” a bordo do satélite para depois esses sinais serem correctamente adicionados sequencialmente de forma a criar uma imagem completa a partir das diferentes medições. Este processo é bastante complexo e precisa de um sistema de navegação preciso mas consegue

replicar o efeito de se estar a usar (ou sintetizar) uma antena virtual grande. Dai se chamar radares de abertura sintética (Synthetic Aperture Radar).

A interpretação da transformação do sinal de retorno em relação ao sinal original resulta na criação de uma imagem. As imagens de radar são compostas por “pixels”, tal como uma fotografia normal. A tonalidade do “pixel” é função do valor da amplitude (intensidade) do eco. As zonas escuras na imagem do radar representam valores baixos de valor de amplitude, as zonas brilhantes representam valores altos de amplitude do eco. A intensidade do sinal recebido varia por diversos motivos, nomeadamente devido à difusão provocada por partículas existentes na atmosfera, às propriedades reflectoras dos materiais, propriedades eléctricas e ao seu conteúdo de humidade. Objectos húmidos tendem a reflectir mais intensamente (ficam mais brilhantes) e objectos secos serão mais escuros. A excepção para este caso será uma superfície lisa, que reflectirá os impulsos de radar para fora do alvo. Esses objectos ficam escuros, por isso fotografias do oceano são mais escuras.

## **2.2 O ASAR e as Ondas Marítimas**

O SAR é o único instrumento de detecção remota capaz de medir as características direccionais das ondas. A partir dos dados ASAR é possível obter um espectro direccional  $S(f, \theta)$  e não apenas a direcção média por banda de frequência  $\theta(f)$  e energia por banda de frequência  $S(f)$  como é o caso da bóia - ondógrafo. Infelizmente existe limitação importante, que até hoje não foi ultrapassada correctamente. A limitação é consequente da técnica de resolução da dimensão azimute “antena sintética”, que para alvos estacionários funciona muito bem, obtendo – se uma boa resolução, o mesmo não acontece para alvos em movimento. Como foi referido na secção anterior, de um modo simples, a imagem radar obtida pela antena sintética é construída a partir da mudança das frequências e do tempo a que é recebido o eco. Um sistema complexo de navegação GPS associa cada eco recebido a uma posição na superfície terrestre. Durante o varrimento pelo feixe, as ondas marítimas vão - se deslocando. A medida que as ondas marítimas são mais pequenas torna-se cada vez mais difícil para o processador de construção de imagem saber de que posição provém cada eco, pois não consegue determinar com exactidão a velocidade relativa entre o sensor e cada superfície reflectora associada a cada “pixel”. Especialmente se essa superfície reflectora for constituída por ondas marítimas de frequência muito alta.

O primeiro algoritmo que conseguiu estimar a agitação marítima a partir de uma imagem SAR como função do campo de ondas marítimas observado foi desenvolvido por Hasselmann e Hasselmann (1991) e modificado posteriormente por Krogstad (1992). Os algoritmos actualmente

usados de estimação do espectro de agitação marítima a partir do espectro de energia da imagem SAR (obtenção de um campo de ondas a partir da intensidade da imagem) actuais são aproximações da transformação de Hasselmann e Hasselmann (1991) e já eram aplicados com sucesso com imagens SAR do satélite de observação terrestre da ESA, os ERS-1 e ERS-2. A limitação desses algoritmos consiste no facto de as medições (espectro) de agitação marítima medido pelo SAR não serem válidas, sem terem sido primeiro combinadas com um espectro de agitação marítima gerado por modelos de análise marítima, como o modelo WAM (Wave analysis model). Este procedimento tem de ser feito principalmente para resolver o problema da direccionalidade das ondas, mais exactamente para determinar o sentido de propagação das ondas. No caso do algoritmo usado para obter as medições de agitação marítima usadas neste trabalho, não é necessário nenhum espectro de agitação marítima inicial. As medições de agitação marítima do ENVISAT, usadas neste trabalho são derivadas unicamente a partir de imagens ASAR. Como já foi referido existem vários modos de operação do sensor ASAR para os diversos tipos de aplicação (interferometria, monitorização, etc.) muitas das quais para aplicações da superfície terrestre e não para a superfície oceânica. No nosso caso em que nos interessam as medições feitas da superfície oceânica, as mais importantes desse tipo, são as medições do tipo “wave mode”. O sensor ASAR quando está a funcionar em “wave mode” realiza medições de uma pequena área da superfície oceânica, que se denomina de “wave cell”. Estas “células” têm a dimensão de 5 (dimensão azimute) por 5-10 km (dimensão range) e são medidas a intervalos de 100 km.

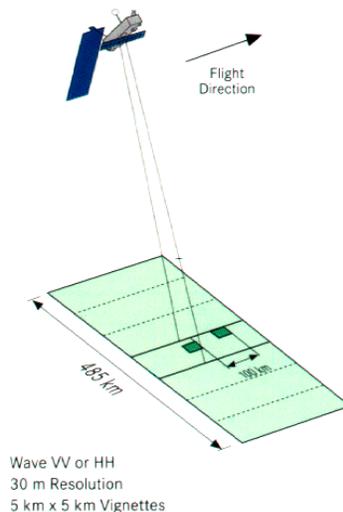


Fig.2.6 – Representação das medições do tipo “wave mode”, in ASAR Product Handbook, 2007.

Essas medições podem ser aleatórias dentro da mesma “swath”. Em teoria 400 destas células são medidas ao longo de cada órbita, mas na prática o número de medições é inferior. Cada uma dessas “células” é processada para criar uma imagem denominada de SLC (Single Look Complex), também designada por “imageette”. O termo SLC significa basicamente que é uma imagem ASAR que contém informação de amplitude e de fase do sinal recebido da superfície oceânica. Uma imagem SAR típica do oceano contém riscas como se pode observar na Figura 2.6 abaixo, que são as ondas marítimas.

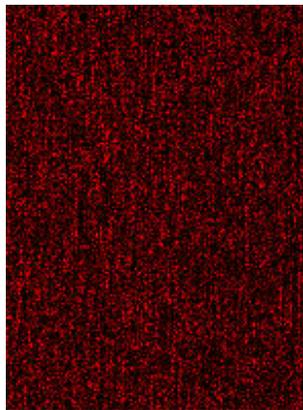


Fig.2.6 –Imageette SLC wave mode, in ASAR Product Handbook (2007).

As imagens SAR estão corrompidas pelo efeito de “speckle” que é um efeito causado por se recorrer a feixes de iluminação coerentes. Existe também o problema do sentido de propagação das ondas. Este problema é resolvido recorrendo ao novo algoritmo utilizado para obter as medições usadas neste trabalho. A partir de uma imagem SLC é possível criar sub - imagens a partir das diferentes bandas de frequências em azimute, sendo que cada frequência em azimute corresponde a uma visualização pelo sensor de um ângulo diferente. Este método resolve o problema da ambiguidade da direcção das ondas.

O processo de obtenção das medições de agitação marítima é um processo complexo e que foge do objectivo deste trabalho. Um esquema da obtenção dos espectros de agitação marítima usados neste trabalho (level 2 product) a partir das imagens SLC (level 1product) está exemplificado na Figura 2.7.

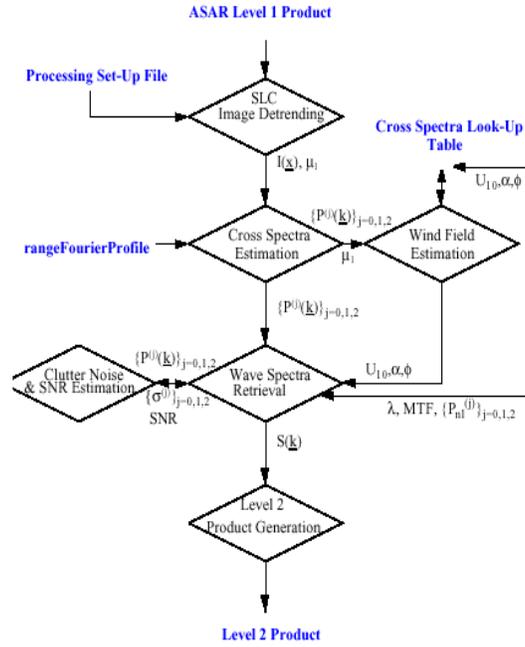


Fig.2.7 – Esquema do processo de obtenção do produto ASA\_WVW\_2P  
(in ASAR Product Handbook, 2007)

O espectro direccional  $S(f, \theta)$  não é dado directamente nas medições ASAR. É necessário calculá-lo a partir de passos explícitos no manual (Johnsen H., 2005). O espectro ASAR está codificado em valores no formato bytes, e tem de ser convertido para o formato float usando a expressão

$$\tilde{S}_{n,m} = S_{n,m} \frac{S_{\max} - S_{\min}}{255} + S_{\min} \quad (1.40)$$

em que  $n, m \in (0, N_{k-1}) \times (0, N_{\theta}-1)$

$S_{\min}$  é usualmente zero, e  $S_{\max}$  é um valor diferente em cada uma das medições. O espectro  $\tilde{S}_{n,m}$  tem unidades m<sup>4</sup> e densidade espectral por número de onda  $k$  numa grelha polar  $(k, \theta)$ . Para se converter para um espectro direccional por banda de frequência  $S_{n,m}$ , este é multiplicado por

$$k \frac{dk}{df} = 4\pi k_n \sqrt{\frac{k_n}{g}} \quad (1.41)$$

onde  $k_n$  é o número de onda. O espectro  $S_{n,m}$  tem agora unidades  $m^2$ .

O número de onda é apresentado numa escala logarítmica. O número de onda  $k_n$  é dado em unidades (rad/m) e é obtido pela seguinte fórmula

$$k_n = \frac{2\pi}{\lambda_0} \alpha^n \quad n \in (0, N_{k-1}) \quad (1.42)$$

em que

$$\alpha = \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_{N_{k-1}}} \right)^{1/N_{k-1}} \quad (1.43)$$

O espaçamento em número de onda  $dk_n$  e em frequência  $df_n$  pode ser calculado por

$$dk_n = \frac{1}{2} \left( \alpha - \frac{1}{\alpha} \right) k_n \quad n \in (0, N_k - 1) \quad (1.44)$$

$$df_n = \frac{1}{2} \left( \sqrt{\alpha} - \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \right) f_n \quad n \in (0, N_k - 1) \quad (1.45)$$

em que

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{gk_n} \quad (1.46)$$

é a relação de dispersão para águas profundas (as medições deste sensor para este produto são sempre em águas profundas). As direcções são medidas a partir do norte geográfico no sentido dos ponteiros do relógio (convenção meteorológica) por  $\theta_m = \theta_0 + m\Delta\theta$  em que  $\Delta\theta = 10^\circ$ . O resultado final será um espectro direccional  $S(f, \theta)$  que consiste numa matriz composta por 24 (frequência) x 36 (direcção) elementos.

### 3. DADOS

Neste trabalho foram utilizados dois tipos de dados; medições da agitação marítima efectuadas pelo sensor ASAR e medições efectuadas por bóias - ondógrafo da rede norte americana NDBC, De seguida complementa-se a informação sobre cada sensor.

#### 3.1 ASAR

Foram utilizadas neste trabalho medições de agitação marítima feitas pelo sensor ASAR a bordo do ENVISAT. Estas medições de agitação marítima foram geradas por um algoritmo aplicado à imagem de radar obtida pelo ASAR, resultando espectros direccionais. As medições de agitação marítima realizadas pelo sensor ASAR são consideradas praticamente instantâneas. O produto ASA\_WVW\_2P utilizado neste trabalho será referido adiante por medição realizada pelo (sensor) ASAR.

Em cada medição além do espectro direccional é fornecida também a frequência de corte, que corresponde à frequência das ondas marítimas acima da qual o sensor ASAR perde a capacidade de medir correctamente a componente azimutal dessas ondas. Contudo considera-se que a componente em alcance (*range*) é medida correctamente para todas as frequências. Quanto maior for a frequência da onda marítima em relação à frequência de corte mais degradada poderá ser a medição. Assim desde sensivelmente a frequência de 0.04 Hz (ondas com cerca de 950 m de comprimento de onda) até à frequência de corte a ESA garante que as ondas são medidas correctamente. Para frequências superiores à frequência de corte a qualidade de medição de ondas marítimas não tem a garantia da ESA pois a medição poderá sofrer degradação. No processamento dos dados foram aplicadas as “*flags*” de qualidade mencionadas no manual do ASAR (Johnson, 2005). Neste trabalho foram apenas considerados os espectros que *passaram* os parâmetros “*confidence\_swell*”, (isto é, espectros direccionais obtidos com sucesso a partir da imagem SAR), e “*land\_flag*” (sem interferência de terra ou de objectos detectáveis); por último foi aplicado um critério de qualidade relacionado com a variância normalizada da imagem. De acordo com o manual, se a modulação de onda (“*waveform*”) na imagem é fraca, a relação SNR (rácio entre o ruído de fundo do sinal e o sinal real) pode ser demasiada baixa para ser possível obter informação útil, apesar de se conseguir por vezes obter um espectro a partir da imagem. Nesse caso quando só existe ruído de “*speckle*” a variância normalizada  $\sigma_1$  deveria ser teoricamente 1. Contudo se a imagem ASAR estiver contaminada por objectos estranhos (por exemplo barcos, ilhas, derrames de óleo, perturbações atmosféricas) a variância normalizada toma valores mais elevados do que seria esperado. Sendo assim a variância normalizada  $\sigma_1$  pode ser

considerada uma “flag” de controlo da qualidade dos dados ASAR. Johnson (2005) considera que as medições ASAR que apresentam  $\sigma_1 \in [1.05, 1.4]$  são normalmente imagens de boa qualidade. Para filtrar as imagens de ASAR consideradas com probabilidade de possuírem menor qualidade aplicaram-se as “flags” de controlo mencionadas no referido manual do ASAR.

Note-se que se acima se refere o termo probabilidade referente à qualidade das imagens desprezadas porque o estudo de qualidade das imagens de ASAR deste tipo não está ainda num estado maduro para que se possa garantir que ao aplicar essas “flags” as medições rejeitadas sejam efectivamente não aceitáveis.

É também importante referir que foi rejeitado um número considerável de medições com valores de  $\sigma_1$  bastante próximos dos limites de qualidade do manual (muitas vezes diferindo em menos de 5% dos limites aceitáveis  $\sigma_1$ ).

### **3.2 Bóia-Ondógrafo**

O segundo tipo de informação de agitação marítima utilizada neste trabalho consiste em dados de agitação marítima obtidos por bóias-ondógrafo da rede dos Estados Unidos NDBC (National Data Buoy Center) na maioria dos casos para o período de tempo de 2005 e 2006, sendo em que 4 casos (bóias 41001, 41002, 46005, 46059) só se obtiveram as medições em 2006. Estes dados são compostos por espectros de energia  $S(f)$  e direcção média por banda de frequência  $\theta(f)$ . Ao contrário das medições realizadas pelo ASAR, as medições da bóia não são instantâneas. Os espectros obtêm-se por análise de Fourier de uma série temporal da elevação da superfície do mar com duração de 20 a 40 minutos. Estes dados fornecidos pela NDBC já foram sujeitos a um controlo básico de qualidade.

### 3.3 Dados Seleccionados

Foram seleccionadas medições efectuadas por 13 bóia - ondógrafo localizadas em águas profundas, que realizaram de medições a pequena distância no espaço e no tempo do ASAR.

Quadro 1 - Bóias – ondógrafo da rede americana NDBC seleccionadas para a verificação das medições do sensor ASAR do satélite ENVISAT (NM – milhas náuticas).

Identificação Bóia	Lat. (°N)	Long. (°W)	Localização
41001	34.68	72.66	150 NM East of Cape HATTERAS
41002	32.33	75.44	250 NM East of Charleston, SC
41040	14.48	53.03	West Atlantic
41041	14.51	46.00	Middle Atlantic
44004	38.48	70.43	HOTEL 200NM East of Cape May,NJ
44008	40.50	69.43	NANTUCKET 54NM Southeast of Nantucket
46005	46.05	131.02	WASHINGTON 315NM West of Aberdeen,
46006	40.89	137.45	WASE PAPA - 600NM West of Eureka, CA
46059	37.98	130.00	CALIFORNIA - 357NM West of San Francisco, CANW HAWAII 170
51001	23.43	162.21	NM West Northwest of Kauai Island
51002	17.19	157.78	SW HAWAII 215 NM South SouthWest of Hilo, H
51003	19.09	160.66	W HAWAII 205 NM Southwest of Honolulu, HI
51004	17.59	152.46	SE HAWAII 185 NM Southeast of Hilo, HI
51028	0.00	153.89	Christmas Island

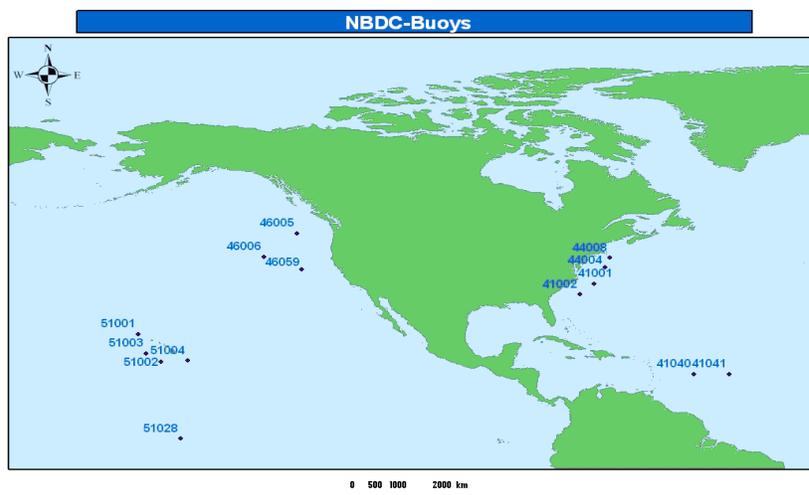


Fig. 3.1 – Localização das bóias – ondógrafo em águas profundas da rede NDBC utilizadas neste trabalho

Numa primeira fase consideraram-se como *colocados* os pares de medições bóia-ASAR cuja distância espacial máxima é de 100 km para se conseguir obter uma amostra significativa, mas numa fase posterior seleccionaram-se pares de medidas com distância máxima de menos de 40km. No entanto deve referir-se que em oceano aberto não existe em geral uma variação

significativa das condições de agitação em distâncias da ordem de 100 km, o mesmo não acontecendo em zonas costeiras onde podem ocorrer variações importantes em distâncias muito menores devido ao abrigo pela costa e ilhas. Note-se também que a distância máxima de 100km foi utilizada em estudos semelhantes (e.g Johnson *et al.*, 2006, Aouf *et al.*, 2006).

No que se refere à separação temporal entre medições ASAR e bóia – ondógrafo, adoptou-se o período de 60 minutos durante o qual (excepto em tempestades) a agitação marítima se mantém praticamente constante.

Deve-se referir que das bóias seleccionadas apenas as bóias 51001 e 51028 estão equipadas com o sensor Hippy 40, que é um sensor mais sensível às componentes de baixa frequência. Este aspecto é revelado nas figuras onde se comparam os espectros do ASAR e bóia (Fig. 5.21 e seguintes).

#### 4. METODOLOGIA

Nesta secção apresenta-se a metodologia de comparação entre medições de dados espectrais de agitação marítima medido pelo ASAR e bóia – ondógrafo aplicado neste trabalho. Visto que a informação produzida pelas bóias consiste em espectros de frequência  $S(f)$  e direcção média por banda de frequência  $\theta(f)$ , estas distribuições foram calculadas a partir do  $S(f, \theta)$  do ASAR. Obtido. Como acima referido, na comparação ASAR-bóia utilizaram-se os parâmetros integrais não direccionais  $H_s$ ,  $T_e$ ,  $T_z$ ,  $T_p$  e  $P$ . Estes parâmetros foram calculados para a banda de frequências em que é especificado o espectro do ASAR, que é mais estreita que a banda de frequências medidas pela bóia – ondógrafo, ou seja entre 0.044177 Hz e 0.2281 Hz (4.38 s) que corresponde a ondas marítimas com comprimento de onda de cerca de 30 metros.

Para o caso da direcção média, seleccionou-se a direcção predominante que se calcula através de (1.39) pois na zona do Oceano Pacífico considerada ocorrem geralmente dois e mesmo três sistemas de agitação (um *wind-sea* – vaga e um ou dois *swells*- ondulação) no mesmo estado de mar.

##### Parâmetros de qualidade

Define-se erro  $E_i$  como a diferença entre o valor medido pelo ASAR  $X_{ASAR}$  e o valor considerado o “valor verdadeiro”, sendo este o medido pela bóia ondógrafo ( $X_b$ )

$$E_i = X_{ASAR} - X_b. \quad (1.48)$$

Nas comparações entre os parâmetros de agitação marítima medidos pela bóia ondógrafo e pelo sensor ASAR, para avaliar a qualidade das medições realizadas pelo sensor ASAR foram utilizados os seguintes parâmetros de erro.

O viés  $V$  é definido por

$$V = \overline{E_i} = \overline{X_{ASAR} - X_b}, \quad (1.49)$$

o erro médio quadrático  $E_{rms}$  definido por

$$E_{\text{rms}} = \sqrt{E_i^2} = \sqrt{(X_{\text{ASAR}} - X_b)^2}, \quad (1.50)$$

o índice de dispersão  $S_i$  definido por

$$S_i = \frac{E_{\text{rms}}}{X_{\text{ASAR}}}, \quad (1.51)$$

Calculou-se também a correlação entre as duas séries de pares de medidas através do coeficiente de determinação  $R^2$  que representa a proporção de variabilidade entre duas séries de dados

$$R^2 = \left( \frac{\sum (X_b - \overline{X_b})(X_{\text{ASAR}} - \overline{X_{\text{ASAR}}})}{\left( \sum (X_b - \overline{X_b})^2 \right)^{1/2} \left( \sum (X_{\text{ASAR}} - \overline{X_{\text{ASAR}}})^2 \right)^{1/2}} \right)^2. \quad (1.52)$$

## 5. RESULTADOS

Nesta secção apresentam – se os resultados das comparações entre as medições realizadas pelo sensor ASAR e pelas bóias – ondógrafo da rede americana de bóias NDBC. Os resultados incluem as estatísticas de erro dos parâmetros integrais acima referidos, e também representações gráficas dos valores da bóia e do ASAR. Finalmente são também apresentados comparações gráficas de  $S(f)$  e da direcção média por frequência. Nestes gráficos foi incluída a frequência de corte  $f_c$  da medição realizada pelo ASAR, que corresponde à frequência máxima a que o sensor consegue medir correctamente a superfície oceânica em ambos os domínios espaciais (azimute e alcance).

Como é óbvio o espaçamento espacial e temporal entre medições afecta o “estatuto” de uma determinada medição de ser considerada uma medição equivalente a outra. No estudo apresentado neste relatório, as medições ASAR disponíveis não são muito numerosas, (apenas uma por 100km). Adicionalmente acontece por vezes que a única medição ASAR feita cada 100km não possa ser válida (aplicação dos critérios de qualidade). De forma a conter dentro um número aceitável de medições para fazer um estudo estatístico foi imposta como distância máxima entre medições a distância de 100 km. Deve referir-se que a análise da qualidade das medidas ASAR

através da comparação com as medidas de bóia merece cuidado. Nesta avaliação de qualidade é importante a comparação visual dos espectros de energia  $S(f)$  e de  $\theta(f)$  para além da análise das estatísticas de erro referentes aos parâmetros integrais de agitação.

### 5.1 Comparação de parâmetros integrais

Foi feito um estudo de verificação da qualidade das medições do ASAR comparando parâmetros de agitação marítima  $H_s, T_e, T_z$  e também  $P$  obtidos a partir das medidas do ASAR e das 13 bóias - ondógrafo seleccionadas, para distâncias máximas inferiores a 100km. Os resultados estão apresentados no Quadro 1. A verificação do parâmetro  $T_p$  encontra-se no Quadro A2 do anexo 2.

Quadro 2 – Verificação dos parâmetros integrais mais importantes das medições de agitação marítima feitas pelo sensor ASAR, com medições das bóias da rede americana NDBC. Dx: distância máxima entre medições ASAR e bóia - ondógrafo; (1) Bóia - ondógrafo com o acelerómetro Hippy 40 (mais sensível às baixas frequências). Foram utilizados dados de bóia para 2005 e 2006 excepto para (2) com dados disponíveis apenas para o período de 2006.

Buoy	Obs	Dx km	$H_{mo}$ (m)				$T_{10}$ (s)				$T_{02}$ (s)				$P$ (kW/m)			
			$R^2$	viés	Erms	Si	$R^2$	viés	Erms	Si	$R^2$	viés	Erms	Si	$R^2$	viés	Erms	Si
41001 <sup>2</sup>	26	90	0.37	-0.07	0.62	0.26	0.39	0.93	1.09	0.14	0.33	0.61	0.86	0.12	0.26	1.07	14.61	0.61
41002 <sup>2</sup>	16	100	0.21	-0.06	0.50	0.27	0.72	1.12	1.33	0.16	0.62	0.89	1.15	0.16	0.18	0.33	7.52	0.51
41040	73	100	0.71	0.05	0.31	0.14	0.74	0.73	0.88	0.11	0.61	0.38	0.57	0.08	0.72	1.64	6.15	0.31
41041	79	90	0.61	0.05	0.28	0.14	0.92	0.74	0.88	0.11	0.89	0.41	0.54	0.07	0.59	1.89	6.99	0.35
44004	53	100	0.63	-0.28	0.93	0.29	0.69	1.08	1.30	0.15	0.58	0.82	1.11	0.14	0.37	-8.66	41.16	0.74
44008	39	100	0.72	0.10	0.65	0.25	0.65	1.57	1.73	0.22	0.43	1.20	1.49	0.21	0.72	7.57	19.82	0.60
46005 <sup>2</sup>	88	90	0.48	0.08	0.75	0.27	0.71	1.54	1.72	0.19	0.52	1.45	1.78	0.23	0.53	6.49	22.34	0.59
46006	66	100	0.64	0.23	0.68	0.34	0.62	0.54	1.00	0.10	0.43	0.87	1.14	0.14	0.54	5.21	20.91	0.85
46059 <sup>2</sup>	76	80	0.52	-0.21	0.76	0.26	0.47	0.91	1.36	0.14	0.46	0.95	1.30	0.16	0.52	-5.30	25.83	0.53
51001 <sup>1</sup>	52	100	0.62	0.09	0.40	0.19	0.67	0.70	0.93	0.11	0.68	0.49	0.80	0.10	0.57	2.42	7.49	0.39
51002	36	100	0.73	-0.04	0.36	0.15	0.75	1.19	1.30	0.16	0.80	0.70	0.80	0.11	0.85	2.08	7.30	0.27
51003	40	100	0.62	-0.02	0.33	0.16	0.58	0.78	1.07	0.12	0.68	0.42	0.69	0.09	0.56	0.85	6.56	0.35
51004	51	100	0.63	0.06	0.36	0.16	0.88	0.81	0.95	0.11	0.33	0.22	1.20	0.15	0.55	2.87	10.01	0.42
51028 <sup>1</sup>	69	90	0.34	0.05	0.25	0.12	0.61	0.47	0.82	0.09	0.8	0.26	0.52	0.06	0.24	1.51	5.47	0.29

O Quadro 2 mostra que nuns casos as medições ASAR têm uma aproximação boa das medições efectuadas pelas bóias, e noutros casos é razoável. Valores de  $S_i$  para  $H_s$  abaixo de 20% podem considerar-se bons. Para o período de energia o valor de  $S_i$  varia entre 9 e 22 % sendo na maior parte dos casos menor que 16 %, o que constitui um bom resultado. Para os valores de  $P$  o valor de  $S_i$  é bastante elevado, c que seria de esperar uma vez que a potência é dada pelo produto  $H_s^2$  e  $T_e$ . Este resultados são comparáveis e em muitos casos melhores que os resultados do modelo WAM para o largo da costa oeste dos EUA na zona da ilha S. Nicolas (ver anexo 2).

A comparação de  $S(f)$  (Figs. 5.17 e seguintes) permitiu verificar que excepto para as bóias 51001 e 51028, os espectro não contém componentes para as baixas frequências que é precisamente a banda na qual o ASAR mede com qualidade. Contacto com a NDBC confirmou que apenas as referidas bóias 51001 e 51028 dispõem de acelerómetro Hippy 40 que tem mais sensibilidade a esta gama de frequência. Assim apresentam-se seguidamente os resultados detalhados das comparações com estas bóias, para distância máxima de 100 km e também para distância máxima de cerca de 35km.

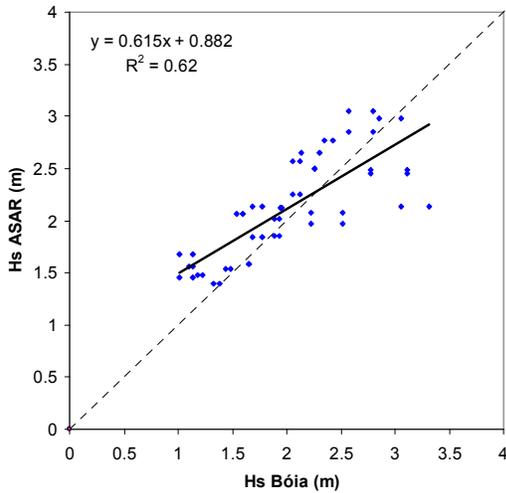


Fig. 5.1 Comparação entre  $H_s$  da bóia 51001 vs  $H_s$  medida pelo ASAR para distância máxima de 100km (2005 e 2006) Nobs. = 52

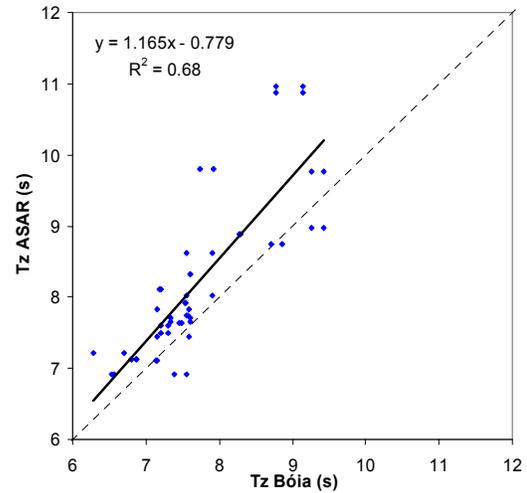


Fig.5.3 – O mesmo da Fig. 5.1 para  $T_z$

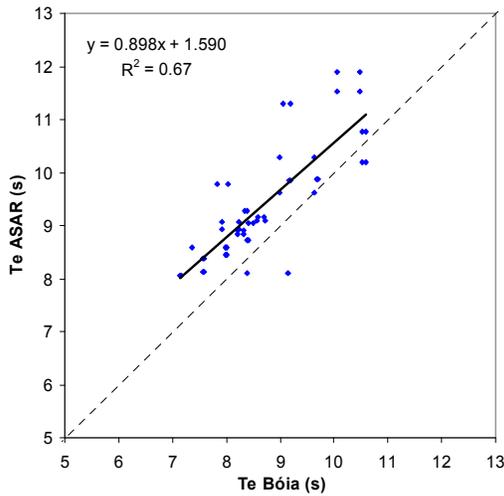


Fig.5.2 – O mesmo da Fig.5.1 para  $T_e$

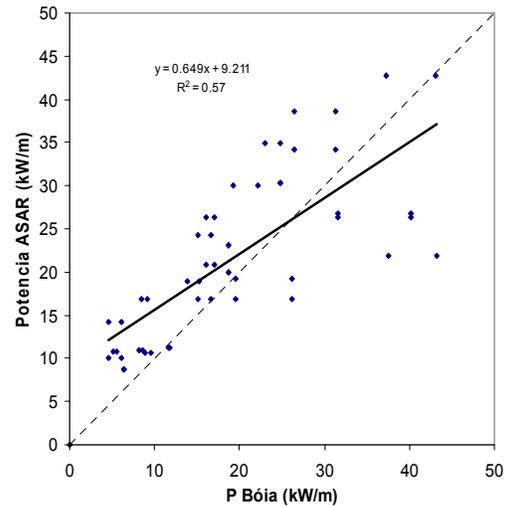


Fig.5.4 – O mesmo da Fig.5.1 para P

Quadro 3 – Estatísticas de erro das medições feitas pelo sensor ASAR para uma distância máxima de 34 km da bóia 51001.

	$H_s$ (m)	$T_e$ (s)	$T_z$ (s)	$T_p$ (s)	$P$ (kW/m)
<b>Viés</b>	0.07	0.63	0.45	0.42	1.19
<b><math>E_{rms}</math></b>	0.36	0.93	0.85	0.97	6.13
<b><math>S_i</math></b>	0.18	0.11	0.11	0.10	0.34

As figuras seguintes apresentam a comparação entre  $H_s, T_e, T_z$  e  $P$  obtidos a partir das medições da bóia - ondógrafo 51001 e das medições do ASAR, para distância inferior a 34 km .

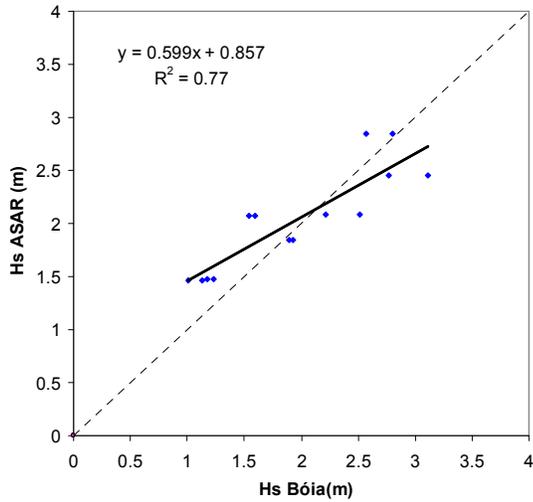


Fig.5.5 – Comparação de  $H_s$  da bóia 51001 vs  $H_s$  medida pelo ASAR para distância máxima de 34 km (2005 e 2006) Nobs. =14

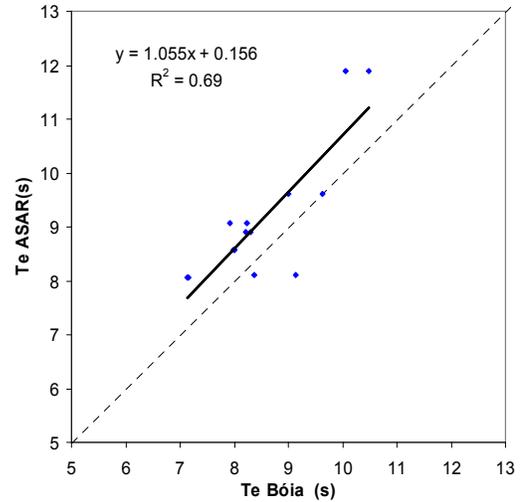


Fig.5.6 – O mesmo que a Fig.6.5 para  $T_e$

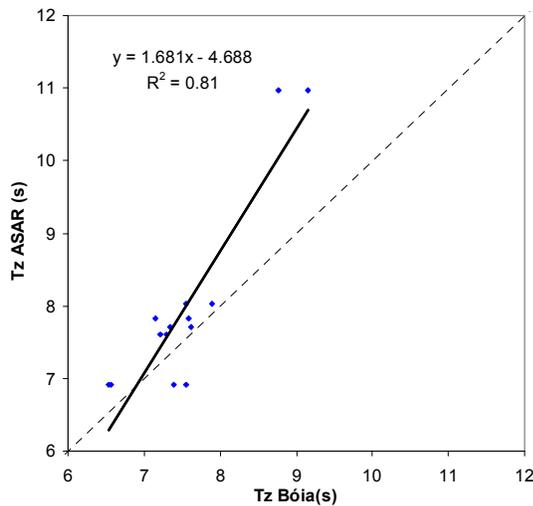


Fig.5.7 – O mesmo que a Fig.6.5 para  $T_z$

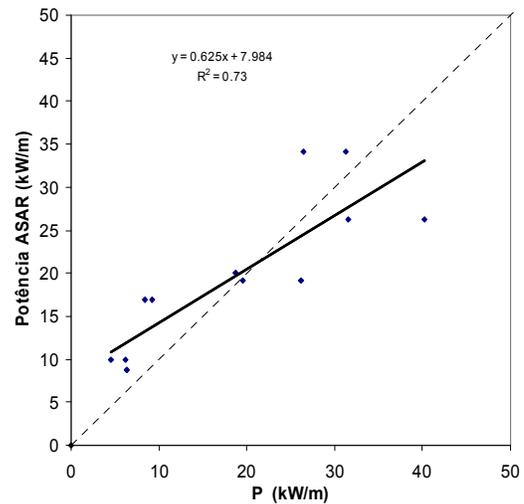


Fig.5.8 – O mesmo que a Fig. 6.5 para  $P$

### 5.1.2 Comparação de parâmetros integrais entre medições ASAR e bóia – ondógrafo 51028

As figuras seguintes apresentam a comparação entre  $H_s$ ,  $T_e$ ,  $T_z$  e  $P$  obtidos a partir das medições da bóia – ondógrafo 51028 e das medições do ASAR a uma distância inferior a 100 km.

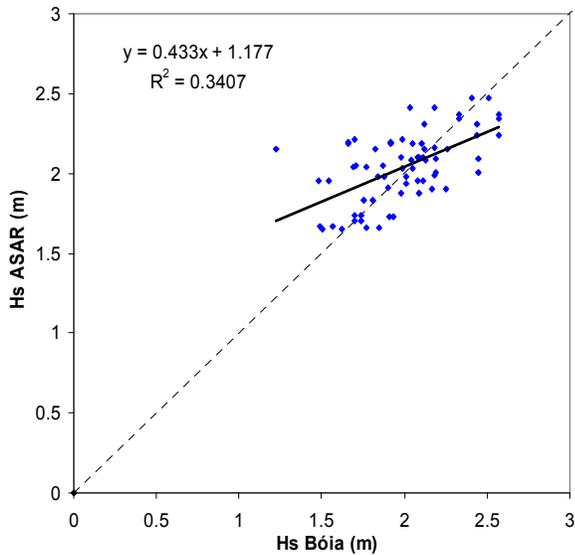


Fig.5.9. - Comparação de  $H_s$  da bóia 51028 vs  $H_s$  medido pelo ASAR para 2005 e 2006, para uma separação espacial máxima de 100km. Nobs:69

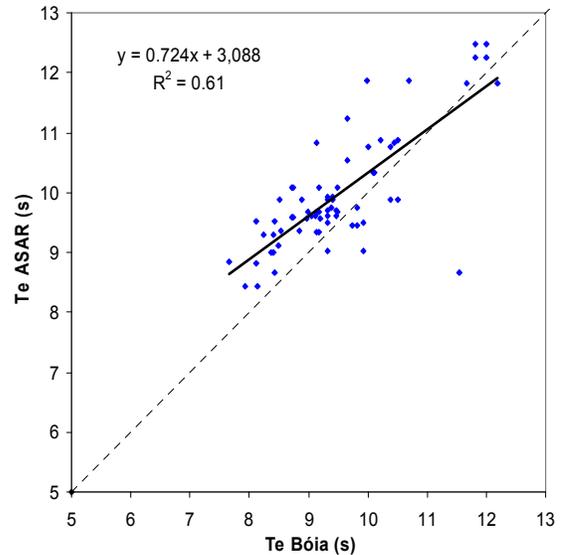


Fig.5.10 – O mesmo que a Fig.5.9 para  $T_e$ .

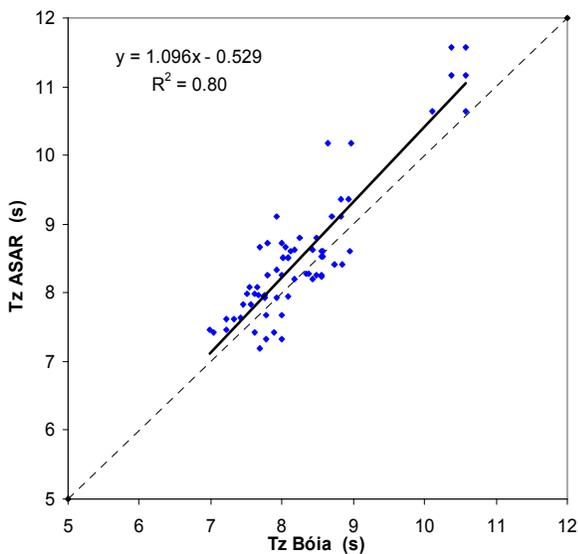


Fig. 5.11 - O mesmo que Fig.6.9 para  $T_z$

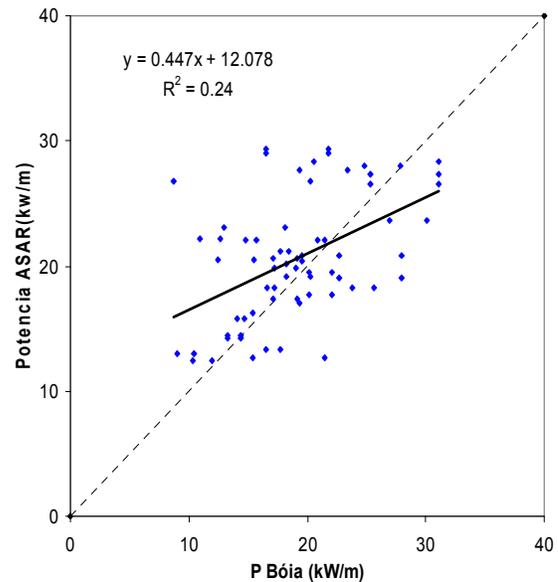


Fig. 5.12. – O mesmo que a Fig.5.9 para  $P$

As figuras seguintes apresentam a comparação entre  $H_s$ ,  $T_e$ ,  $T_z$  e  $P$  obtidos a partir das medições da bóia – ondógrafo 51028 e medições do ASAR a uma distância inferior a 36 km.

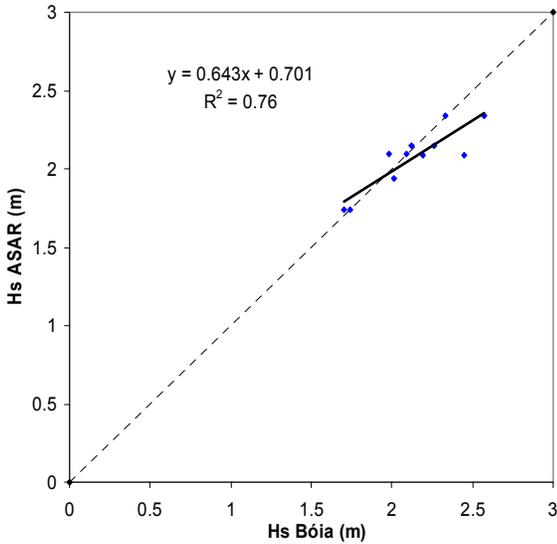


Fig.5.13 – Comparação de  $H_s$  da bóia 51028 vs  $H_s$  ASAR para 2005 e 2006 para uma separação espacial máxima de 36 km. Nobs=11

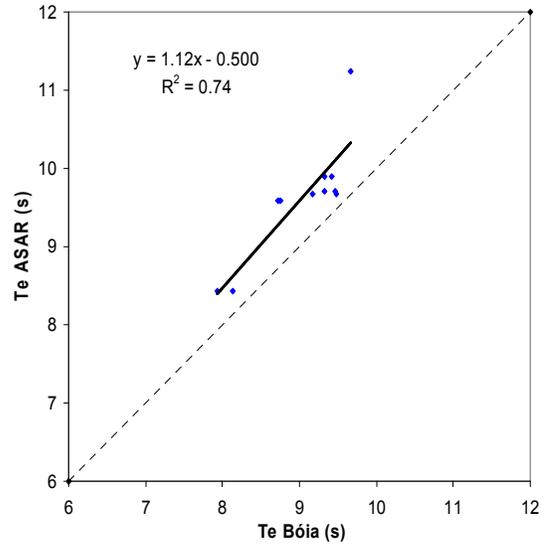


Fig.5.14 - O mesmo que a Fig.5.13 para  $T_e$

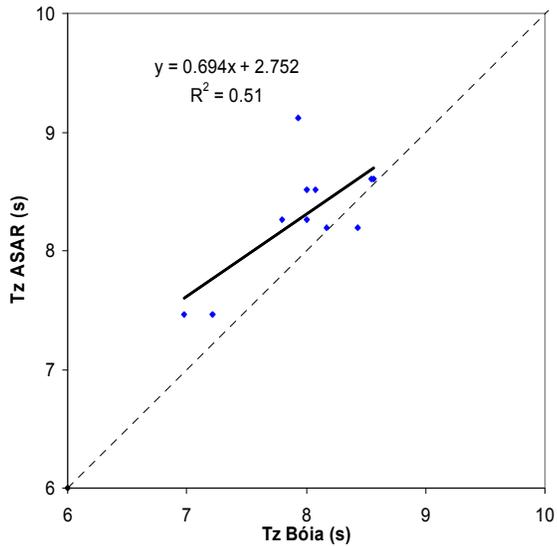
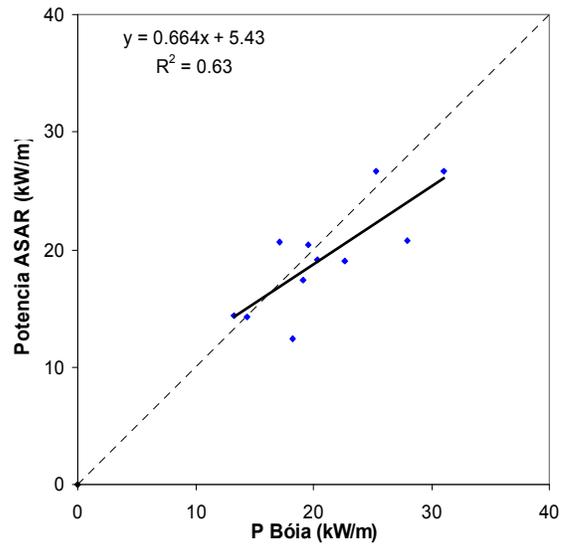


Fig 5.15 – O mesmo que Fig. 5.13 para  $T_z$



5.16 – O mesmo que a Fig. 5.13 para  $P$

Quadro 4 – Estatísticas de erro das medições feitas pelo sensor ASAR para uma distância máxima de 36 km da localização da bóia ondógrafo 51028.

	$H_s$ (m)	$T_e$ (s)	$T_z$ (s)	$T_p$ (s)	$P$ (kW/m)
<b>Viés</b>	-0.06	0.58	0.31	0.16	-1.57
<b>E<sub>rms</sub></b>	0.14	0.69	0.47	0.37	3.56
<b>Si</b>	0.07	0.08	0.06	0.03	0.17

Como é possível verificar, ao considerar apenas pares de medições com distâncias entre si mais curtas e bóias sensíveis às baixas frequência, o erro decresce e sendo muito baixo. Note-se que possivelmente não se obtêm resultados de tão boa qualidade para as zonas temperadas em que ocorrem tempestades mais fortes. Tem interesse comparar estes valores com os que se obtiveram na verificação do modelo WAM para a costa oeste EUA quando comparados com medidas efectuadas pela bóia (anexo2, Cândido, 2003).

## 5.2 Comparação da forma espectral

Nesta secção apresenta-se a comparação de alguns espectros de frequência  $S(f)$  do ASAR e de bóia. Foram seleccionados estados de mar com características diferentes representativos das condições mais frequentes.

Os pares de Figs. 5.17 e 5.18, e Figs. 5.19 e 5.20 apresentam as comparações de  $S(f)$  obtido a partir de uma medida da bóia com duas medições do ASAR a 32 km e a 70 km da localização da bóia, respectivamente. Um aspecto relevante é a incapacidade da bóia em medir nas baixas frequências. Enquanto que no primeiro par o  $S(f)$  do ASAR se ajusta melhor para a distância mais pequena (32 km) como seria de esperar, no segundo par acontece o contrário, o que é de estranhar. Um resultado interessante é a boa qualidade do espectro do ASAR para  $f > f_c$ .

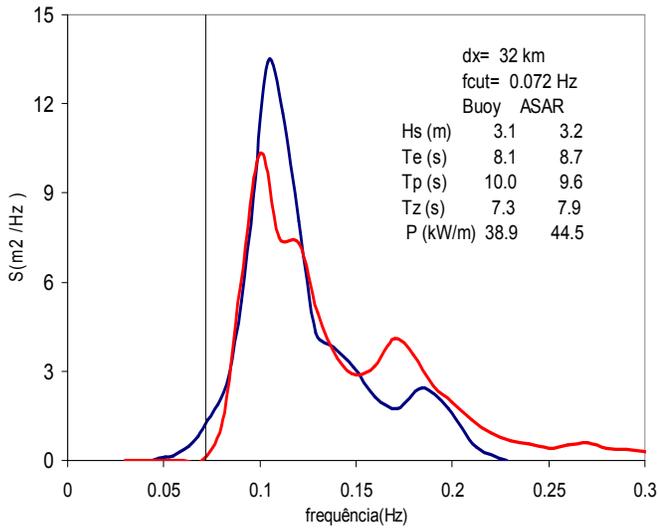


Fig.5.17. –  $S(f)$  ASAR vs bóia 41001 4/1/06 2.39 AM dx=32 km dt=21 min. A linha vertical a preto identifica a frequência de corte. A linha contínua azul refere-se ao espectro do ASAR, a linha contínua a vermelho representa o espectro da bóia.

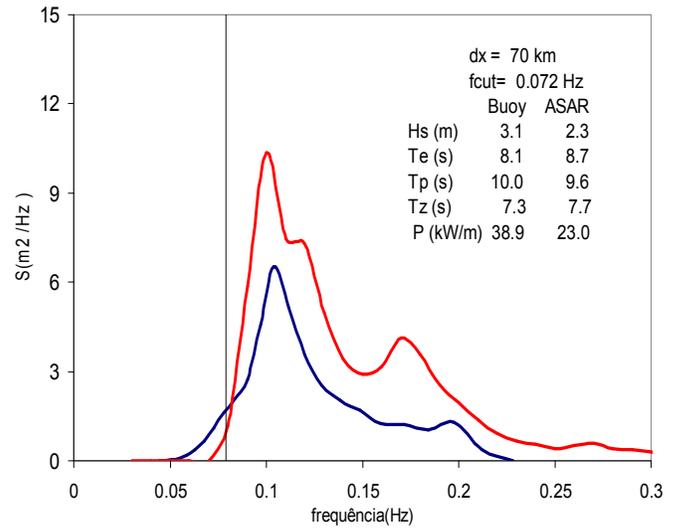


Fig.5.18 – O mesmo que na Fig 5.17 para dx=70 km

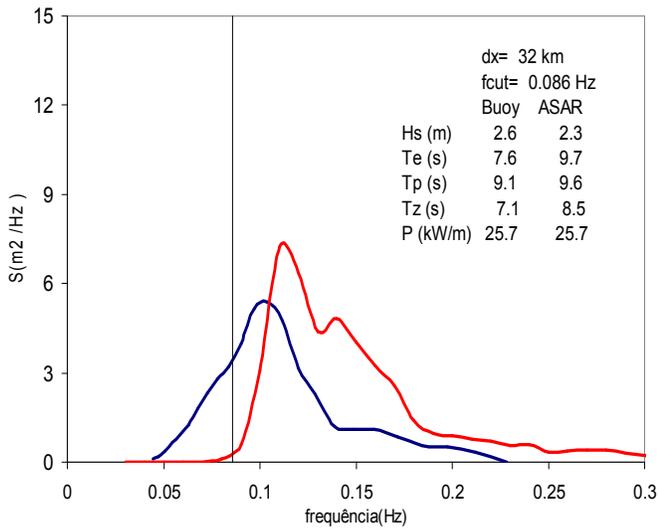


Fig. 5.19 –  $S(f)$  ASAR vs bóia 41001 19/4/2006 3 AM, dx=32 km, dt=21 min.

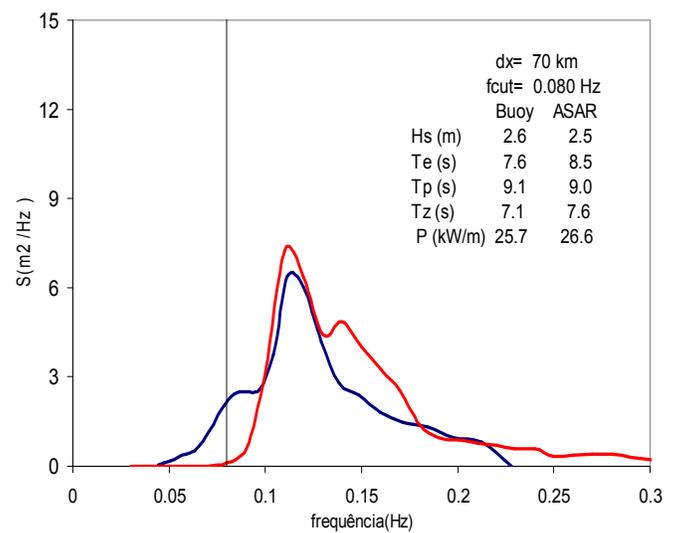


Fig. 5.20 – O mesmo que a Fig 5.19 para dx=70 km.

No terceiro par de comparações (Figs. 5.21 e 5.22, distância bóia – ASAR de 27 e 82 km, respectivamente), é de notar que o ASAR mediu bem para  $f < f_c$  mas tal não aconteceu para a restante banda de frequência (situação de vaga ou *wind-sea*). Tem interesse notar que o pico do espectro do ASAR obtido na medição do ASAR a maior distância da bóia se ajusta bem ao pico da bóia, sendo que neste caso a  $f_c$  do ASAR é praticamente coincidente com a frequência desse pico (cerca de 0.1Hz). Outro aspecto a relevar é a consequência do ASAR não medir correctamente acima da  $f_c$  e a bóia não medir nas muito baixas frequências conduz a que os valores de  $T_e$  obtidos pelos dois métodos são significativamente diferentes.

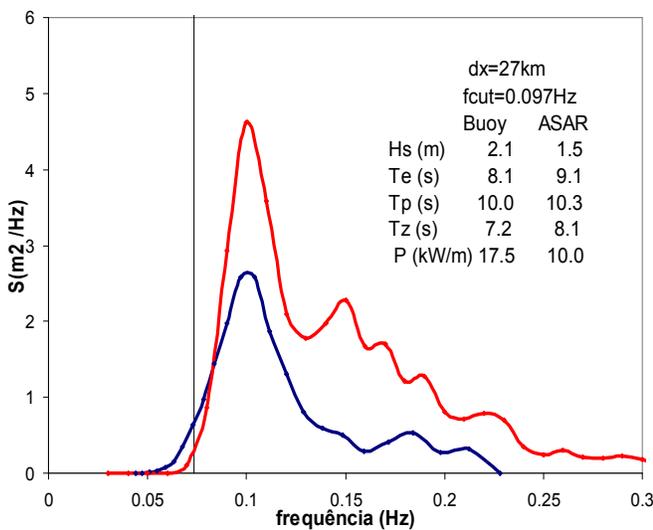


Fig.5.21 –  $S(f)$  ASAR vs Bóia 41002 5/3/06 2:53, dx=27 km, dt = 7min.

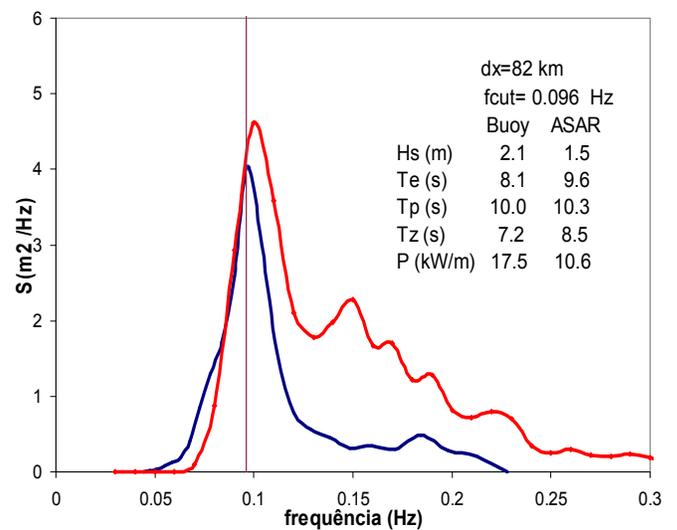


Fig.5.22 - O mesmo que Fig 5.21, dx=82 km, dt=8 min.

Nos 4 casos seguintes (Figs. 5.23, 5.24, 5.25, 5.26) nota-se a incapacidade de detecção de ondas marítimas de baixa frequência pela bóia, contrariamente ao que acontece com o ASAR, como se verifica em particular nas Fig. 5.24 e Fig. 5.26. A Fig. 5.23 mostra que o ASAR sobrecalculou  $S(f)$  em relação à bóia o que em geral não acontece porque geralmente o erro das medições ASAR consiste em subestimar a energia total devido ao efeito de corte na dimensão azimute. Contudo, embora mais improvável, a imagem ASAR pode estar corrompida por um objecto estranho (por exemplo um barco) e tal ter sido interpretado pelo algoritmo de estimação da agitação marítima como um aumento de energia.

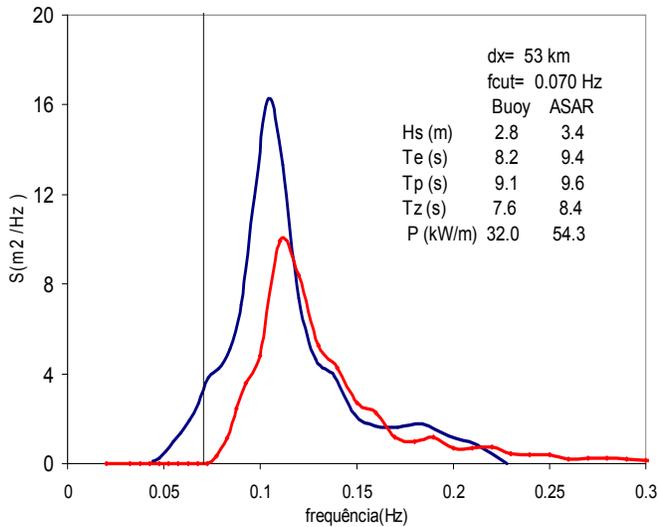


Fig.5.23 -  $S(f)$  ASAR vs bóia 44008 15/05/06 2:23, dx= 53 km, dt= 23min.

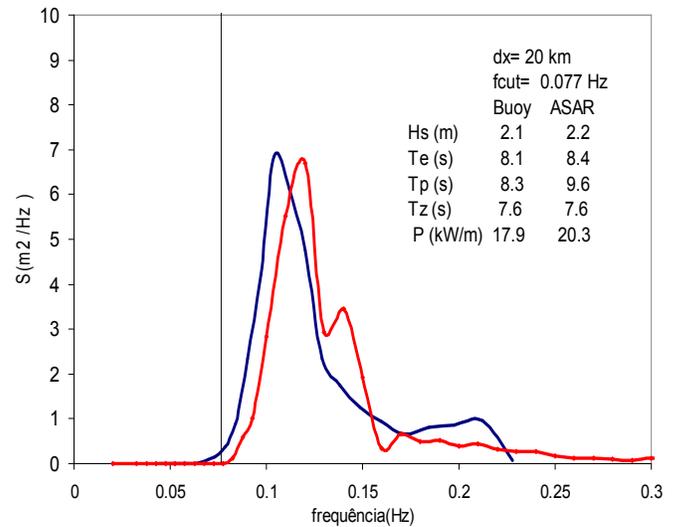


Fig.5.25  $S(f)$  ASAR vs bóia 44008 15/11/06 14:53, dx=20 km, dt= 7 min.

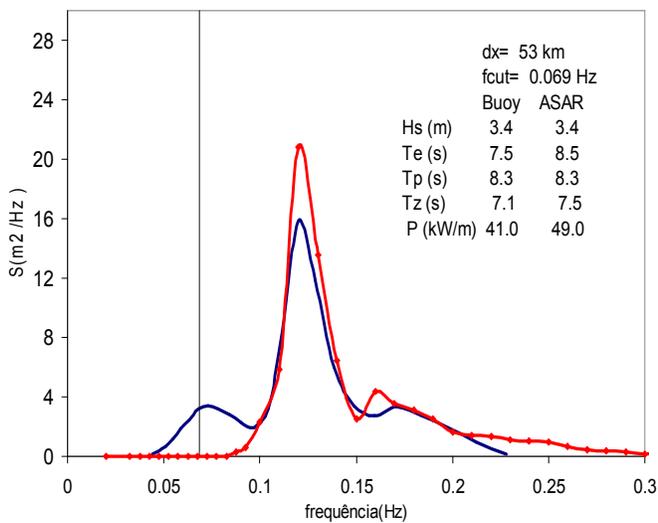


Fig.5.24  $S(f)$  ASAR vs bóia 44008 11/12/06 2:23, dt=23 min, dx=53 km.

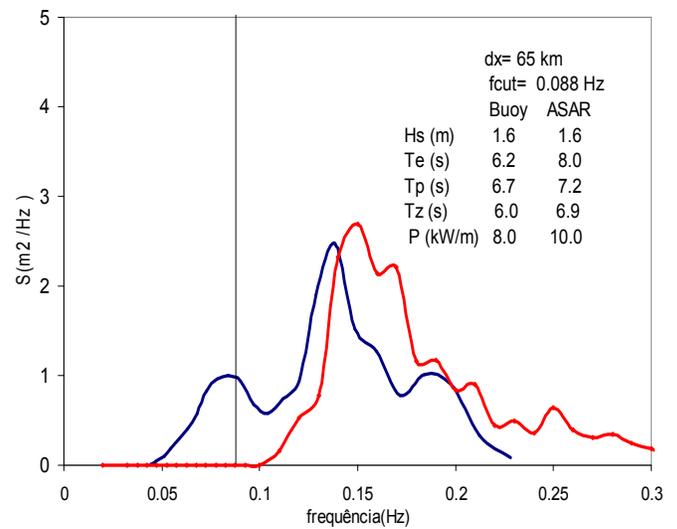


Fig.5.26  $S(f)$  ASAR vs bóia 44008 6/03/06 2:23 AM, dx= 65 km, dt= 23 min.

As Figuras 5.27 e 5.28 referem-se a dois estados de mar semelhantes. Verifica-se que na Figura 5.27 o ASAR não mede correctamente na banda da vaga (*wind-sea*) embora tal não aconteça na Fig. 5.28, provavelmente porque a propagação das ondas marítimas se realiza perpendicularmente à trajectória do satélite.

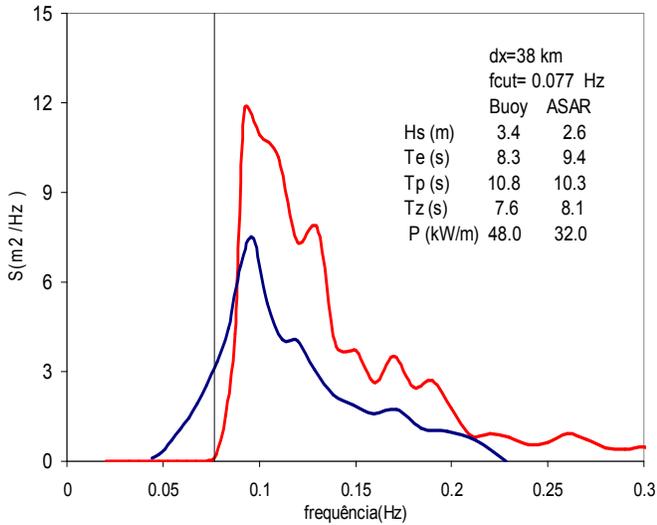


Fig.5.27  $S(f)$  ASAR vs bóia 41040 10/01/06 13:30, dx=38 km, dt =30 min.

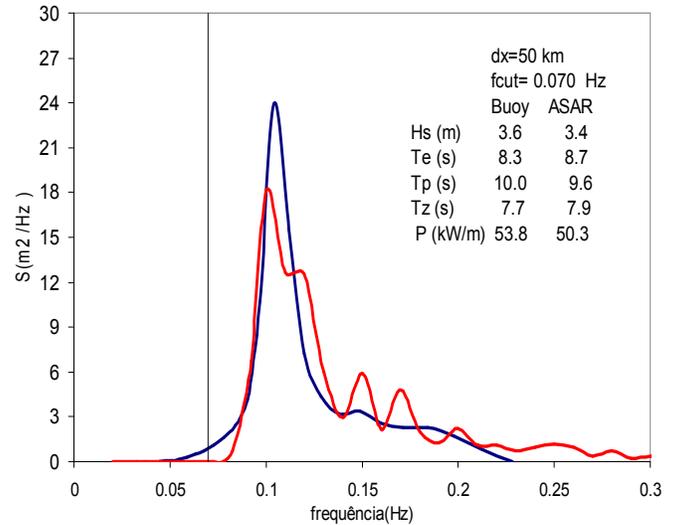


Fig.5.28  $S(f)$  ASAR vs bóia 41040 25/01/06 1:33, dx=50 km, dt =27 min.

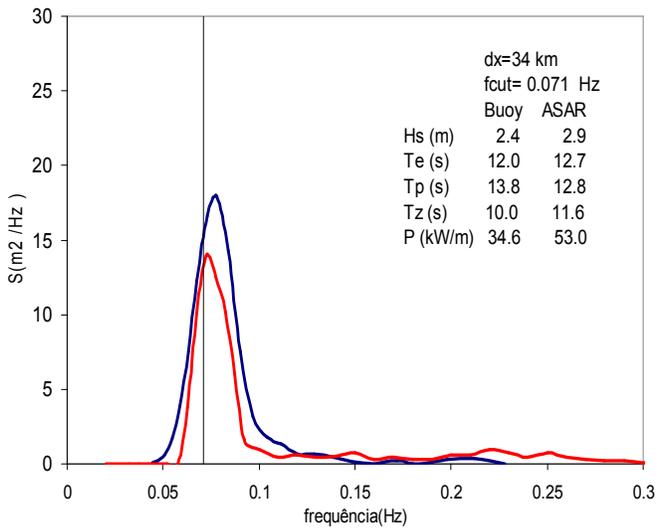


Fig.5.29 -  $S(f)$  ASAR vs bóia 46005 11/4/06, 19:04, dx=34 km, dt=4 min.

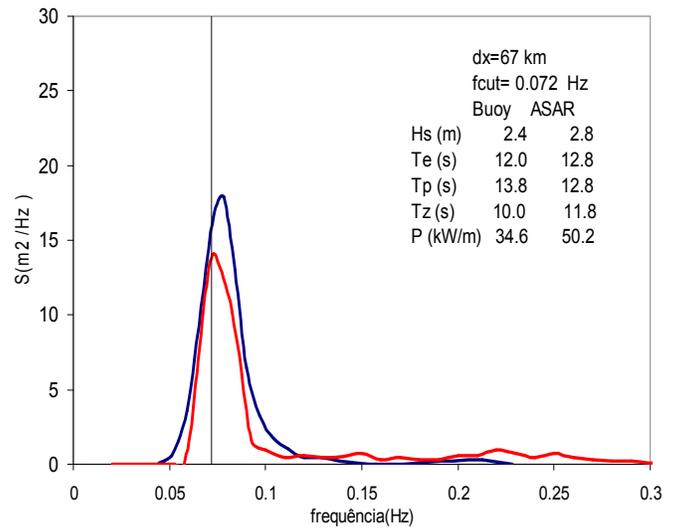


Fig.5.30 – O mesmo que na Fig. 5.29 para dx=67 km.

As Figuras 5.29 e 5.30 mostram que as medições de agitação marítima efectuadas pelo ASAR são bastante semelhantes às efectuadas pela bóia – ondógrafo. Contudo o ASAR sobrestima ligeiramente a energia total. Os valores de período são ligeiramente diferentes, contudo as diferenças de  $H_s$  são

pequenas. Nas Figuras 5.31 e 5.32 o ASAR detecta sensivelmente mais energia que a bóia – ondógrafo na zona do pico de ondulação (swell), sendo o período de pico  $T_p$  muito próximo nos dois casos.

No segundo caso é o ASAR que não consegue observar correctamente as ondas marítimas de frequências mais elevadas (*wind-sea*).

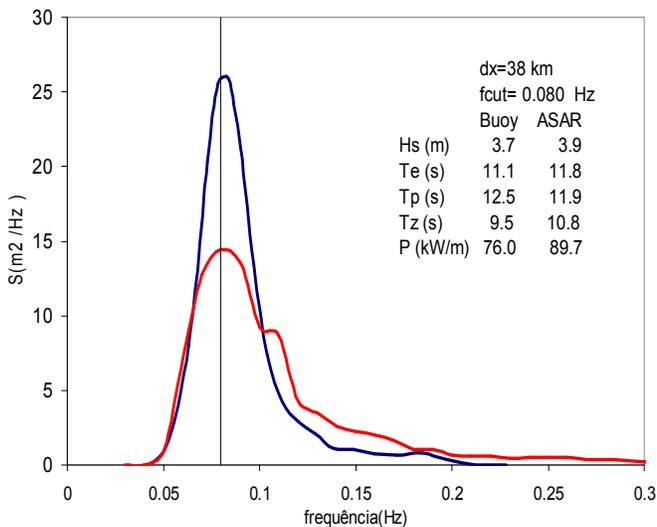


Fig.5.31 - S(f) ASAR vs bóia 46059, 6/1/06 46059 18:52, dx=38 km, dt=8 min.

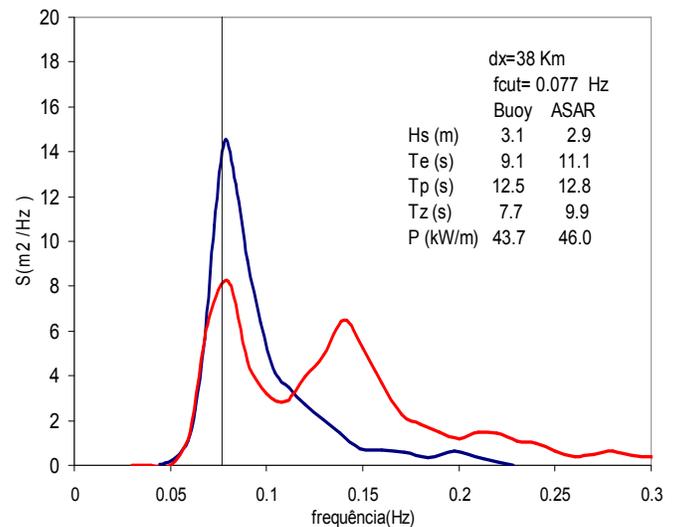


Fig.5.32 S(f) ASAR vs bóia 46059, 21/4/06 18:52, dx= 38 km, dt=8 min.

Em seguida apresentam-se comparações da forma espectral para a bóia 51028 que tem capacidade de medida nas baixas frequências (acelerómetro Hippy 40). As comparações do par de Figuras 5.33 e 5.34, para distâncias entre os locais de medição de 34 e 69 km, ilustra bom ajustamento do  $S(f)$  do ASAR ao bóia em praticamente toda a banda de frequências, embora o ajustamento acima de  $f_c$  não seja perfeito.

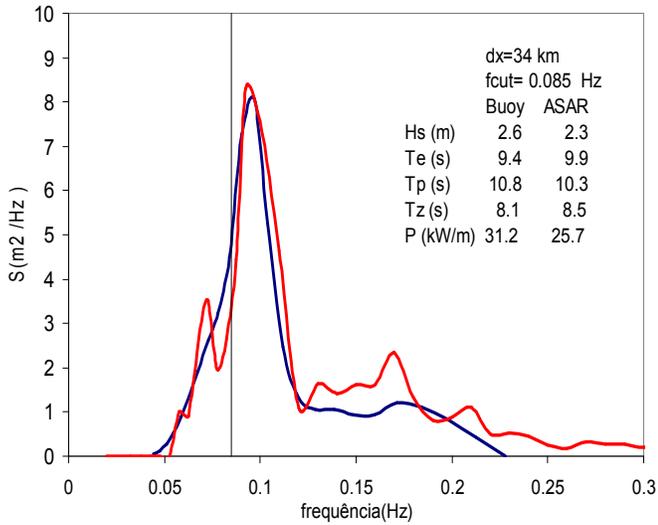


Fig.5.33 -  $S(f)$  ASAR vs bóia 51028 15/01/06 8:25, dx= 34 km, dt= 25min.

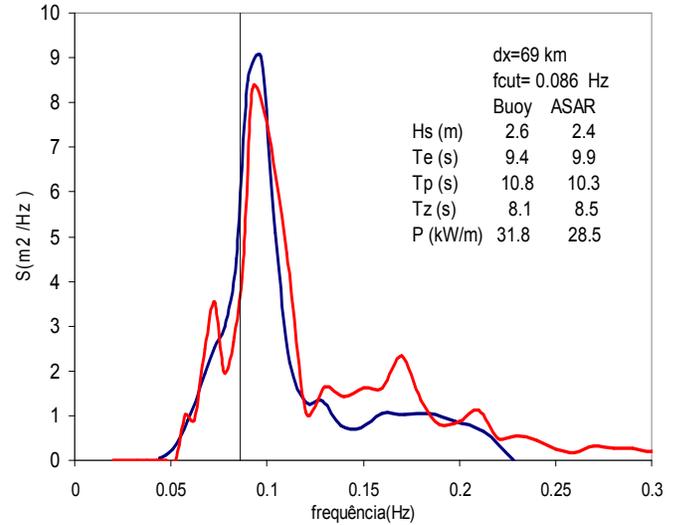


Fig.5.34 – O mesmo que na Fig. 5.33 para dx = 69 km.

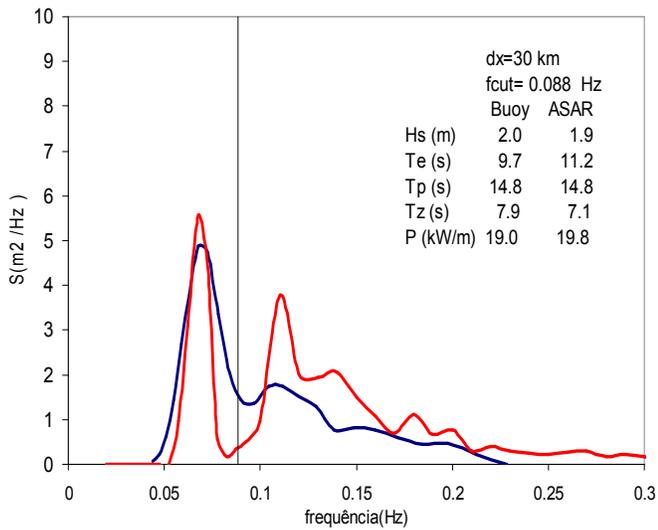


Fig.5.35 -  $S(f)$  ASAR vs bóia 51028 17/09/06 8:26 AM, dx =30 km, dt =34 min.

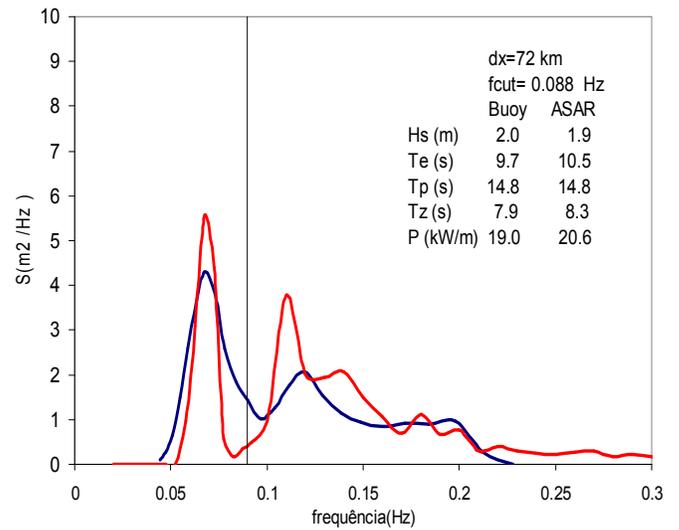


Fig.5.36 – O mesmo que na Fig. 5.35 para dx= 72 km.

### 5.3 Comparação da direcção

A direcção da propagação da densidade de energia para valores de energia muito baixos ( $S(f) < 0.1 \text{ m}^2/\text{Hz}$ ). Assim, neste trabalho só foram considerados os valores de  $\theta(f)$  para  $S(f) > 0.1 \text{ m}^2/\text{Hz}$ . Nas figuras seguintes estão apresentados alguns casos das comparações entre  $S(f)$  e  $\theta(f)$  do ASAR e da bóia 51001 com acelerómetro Hippy 40.

Nas Figs. 5.37 e 5.38 (mesma medição da bóia, distâncias bóia-ASAR de 34 e 69 km, respectivamente) verifica-se bom ajustamento entre  $\theta(f)$  obtido pelos dois sensores para  $f > f_c$  (onde o ASAR deve medir correctamente). É contudo importante notar que se trata de sistema de pequena energia ( $S(f) < 2 \text{ m}^2/\text{Hz}$ ), pelo que mais que provável será essa a causa da diferença entre medições. Observa-se facilmente na Figura 5.37 que o sistema de ondas marítimas na banda de frequências de 0.08 Hz propaga-se sensivelmente na direcção de  $40^\circ \text{ N}$ .

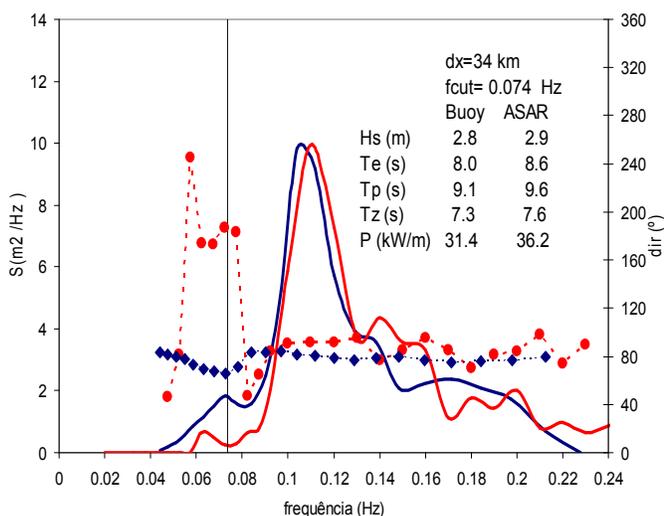


Fig 5.37 -  $S(f)$  ASAR – Bóia 51001 17/04/06 8:41, dt= 19 min, dx= 34 km. A linha tracejada a vermelho representa  $\theta(f)$  da bóia, a linha tracejada a azul representa  $\theta(f)$  do ASAR.

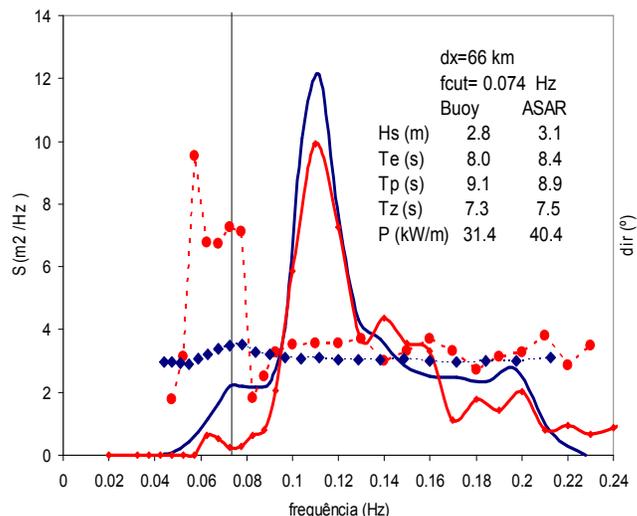


Fig 5.38 – O mesmo que a Fig.5.37 para dx = 66 km.

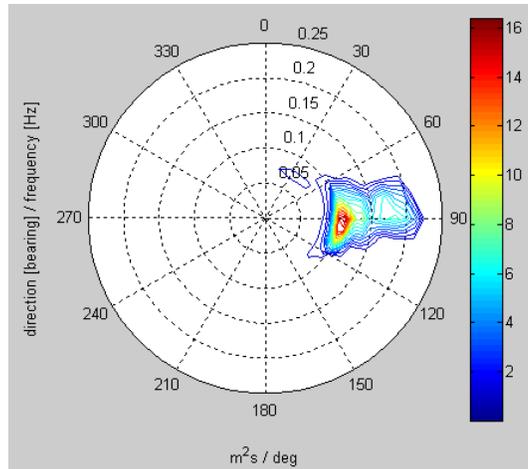


Fig.5.39 –  $S(f, \theta)$  do ASAR - da Fig. 5.37

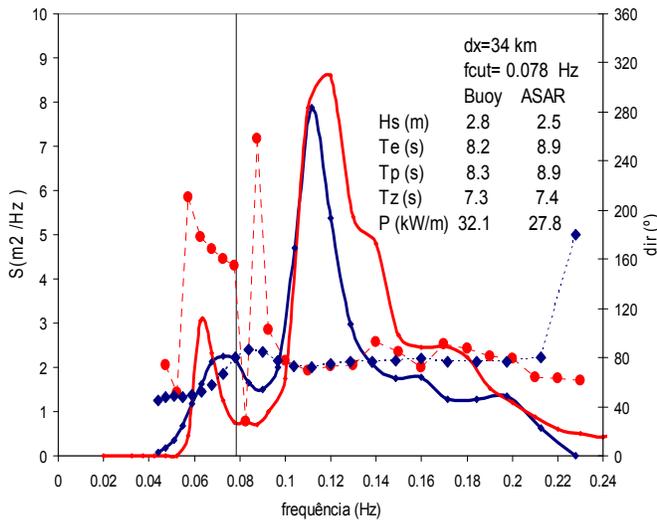


Fig 5.40 -  $S(f)$  ASAR vs bóia 51001, 6/05/22 8:41 AM, dx= 34 km, dt= 19 min.

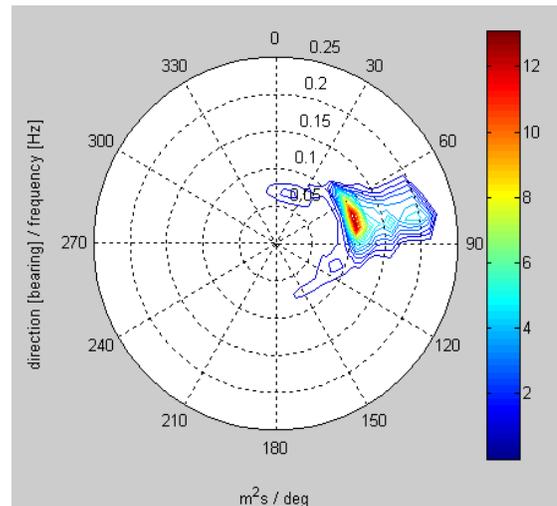


Fig. 5.41 –  $S(f, \theta)$  do ASAR da medição da Fig. 5.40

Na medição apresentada da Figura 5.40 verifica-se novamente uma diferença significativa nos valores de  $\theta(f)$  entre a bóia e o ASAR para  $f < f_c$ . Observando a Fig. 5.40 identificamos um sistema de ondas (ondulação) com  $f < f_c$ . Contudo se observarmos a Fig. 5.41 identificamos dois sistemas de baixa energia para  $f < f_c$ , um com direcção de 25°N e o outro com direcção de cerca de 125° N. No caso do ASAR, a direcção desses dois sistemas foi assumida como a média das duas. A bóia apresenta uma elevada variabilidade de  $\theta(f)$  nessa banda de baixa frequência. Contudo apesar de a

Fig. 5.40 mostrar que  $\theta(f)$  obtido pelo ASAR é praticamente constante ao longo de todas as frequências, a Fig. 5.41 mostra que o ASAR detectou sistemas de ondas com direcção diferente. Este caso serve para demonstrar a limitação de, na avaliação da qualidade da direcção obtida a partir do ASAR, se analisar  $\theta(f)$  em vez de se analisar  $S(f, \theta)$ . Tem interesse analisar também as Figs. 5.42 e 5.43 que mostram a concordância dos parâmetros de integrais de altura e período apesar das diferenças da formas espectrais obtidas pelo ASAR e pela bóia.

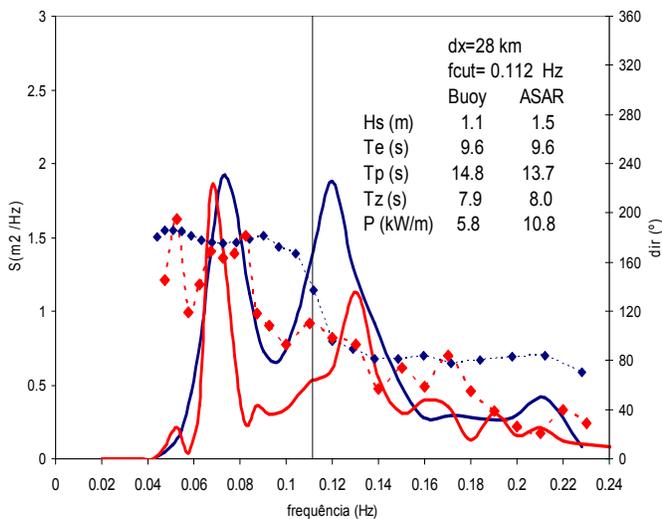


Fig.5.42 -  $S(f)$  ASAR – Bóia 51001 6/6/26 8:41, dx= 28 km, dt= 19 min.

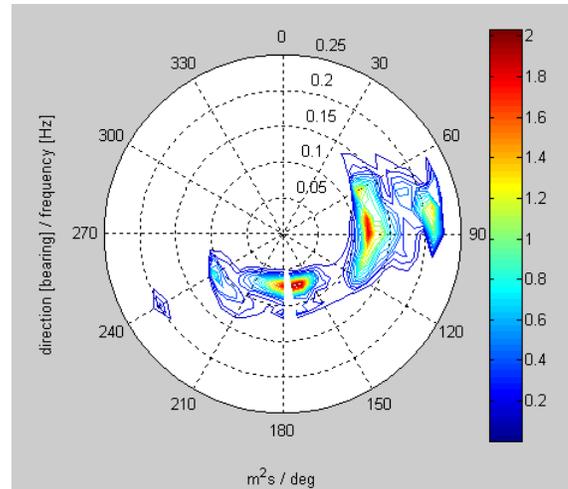


Fig.5.43 –  $S(f, \theta)$  do ASAR para a medição da Fig. 5.41.

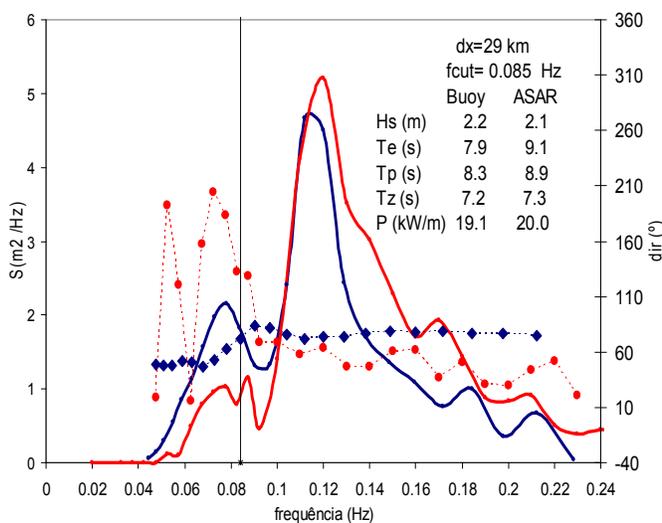


Fig 5.44 -  $S(f)$  ASAR - Bóia 51001 6/7/31 8:41, dx= 29 km, dt= 19 min.

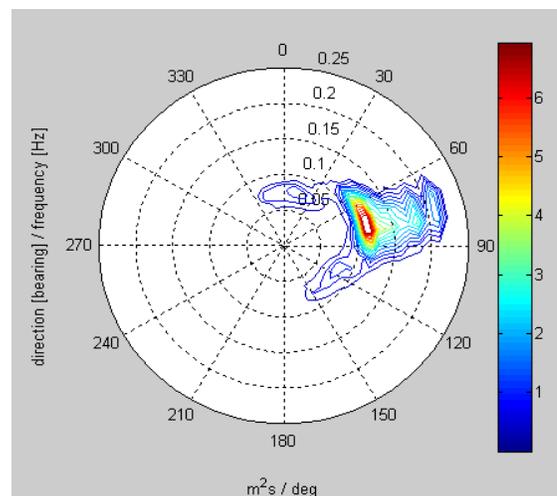


Fig.5.45 –  $S(f, \theta)$  do ASAR para a medição da Fig. 5.44.

As medições das Figs. 5.44 e 5.45 apresentam um caso semelhante ao referenciado na Fig. 5.40. A Fig. 5.46 apresenta dois sistemas de ondas, para os quais o ASAR identifica correctamente as direcções. Contudo, como se nota, existe uma variabilidade de  $\theta(f)$  o que é típico de condições de agitação pouco energéticas. Em todo o caso é possível observar que o ASAR confirma bem a existência de dois sistemas e a sua dispersão direcciona.

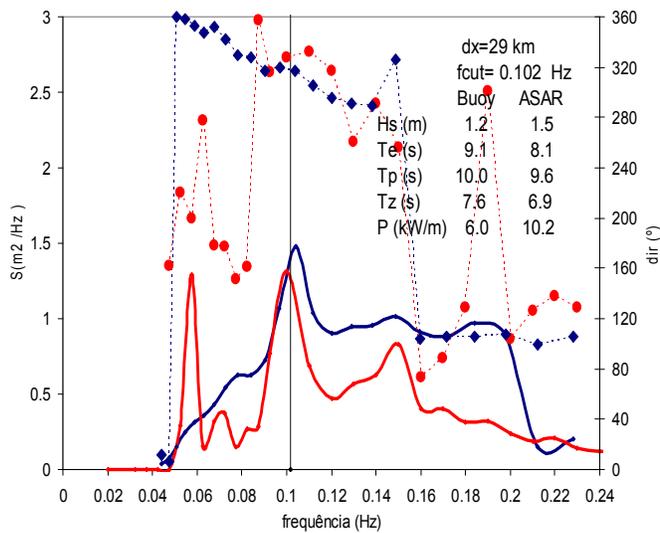


Fig.5.46 - S(f) ASAR – Bóia 51001 6/9/14 20:48 AM , dx= 29 km, dt= 19 min.

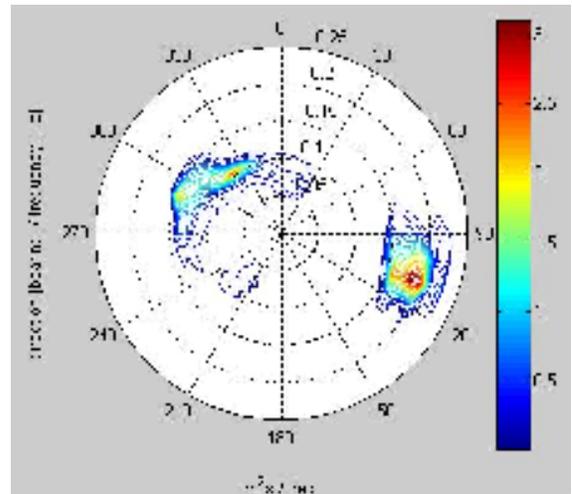


Fig.5.47 –  $S(f, \theta)$  do ASAR para a medição da Fig. 5.46.

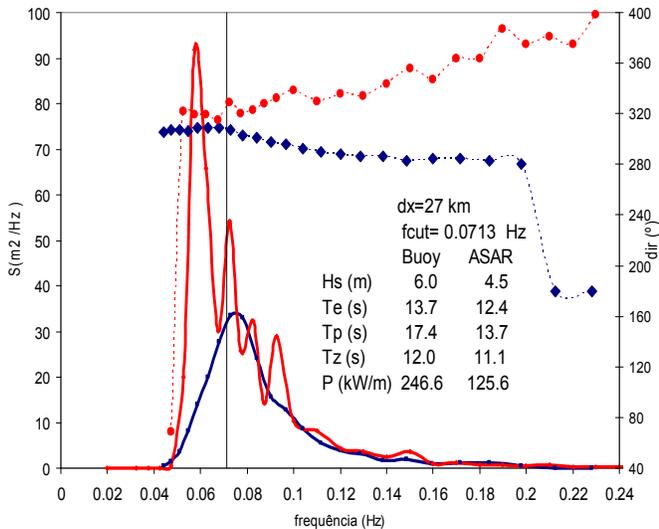


Fig.5.48 –  $S(f)$  ASAR- bóia 51001, 28/12/06 20:48,  $dx=27$  km,  $dt=21$  min.

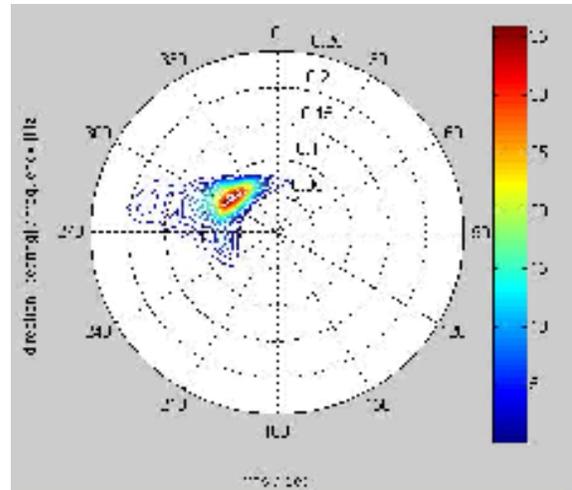


Fig. 5.49 -  $S(f, \theta)$  do ASAR para a medição da.

Na medição apresentada na Fig. 5.48 o espectro de frequência  $S(f)$  medido pela bóia-ondógrafo apresenta valores elevados de energia, mas para essa mesma banda de frequências ( $f < f_c$ ) o ASAR apresenta valores muito inferiores. Como nessa banda de frequências a medição do ASAR é considerada correcta (Collard, 2007), pode-se admitir que a medição pela bóia – ondógrafo seja incorrecta. De facto na zona do Equador onde se localiza esta bóia não são usuais as situações de ondulação tão energéticas. Note-se que  $\theta(f)$  obtido a partir das duas medições é bastante semelhante para  $f < f_c$ , mas divergem à medida que a frequência aumenta.

No Quadro 5 apresenta-se os erros da direcção segundo as duas expressões 1.37 e 1.39 (direcção média e direcção predominante, respectivamente). No caso da direcção predominante também foi calculada apenas para frequências inferiores a 0.14 Hz para averiguar se, ao excluir a banda de frequências mais elevadas em que o ASAR pode não medir correctamente, aumentaria a qualidade do ASAR. Essa hipótese verificou-se ser correcta como se pode observar no Quadro 5 que mostra que os parâmetros de erro para  $\theta_{NOAA} - 0.14$  são inferiores aos que ocorrem para  $\theta_{NOAA}$ .

Quadro 5 – Estatísticas de erro da direcção das medições feitas pelo ASAR comparando com a bóia 51001, em 2006, Nobs. =21. O símbolo  $\theta_{NOAA}-0.14$  representa  $\theta_{NOAA}$  calculado para frequências <0.14 Hz.

	$\theta_{NOAA}$	$\bar{\theta}$	$\theta_{NOAA}-0.14$
<b>Viés</b>	-9.81°	-19.69°	5.42°
<b>E<sub>rms</sub></b>	59.02°	68.56°	38.85°
<b>S<sub>i</sub></b>	0.45	0.73	0.31

Os gráficos apresentados nas Figuras 5.50 e 5.51 apresentam a dispersão dos valores de direcção obtidos a partir das expressões 1.37 e 1.39.

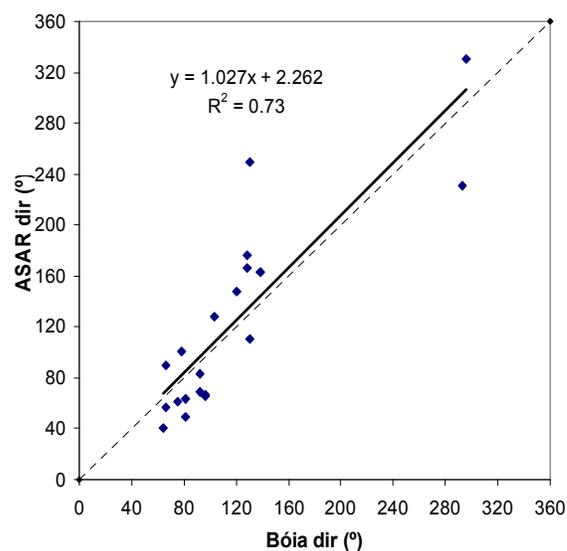
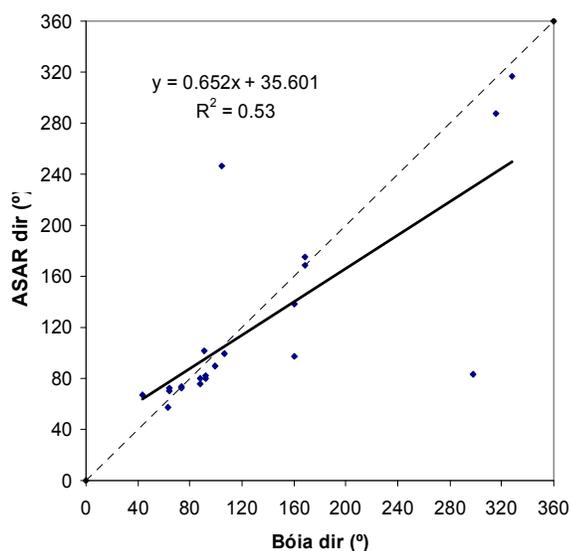


Fig. 5.50 -  $\theta_{NOAA}$  Bóia vs  $\theta_{NOAA}$  ASAR

Fig 5.51 -  $\bar{\theta}$  Bóia vs  $\bar{\theta}$  ASAR

## 6. CONCLUSÕES

O objectivo deste trabalho é a avaliação da qualidade das medições de agitação marítima realizadas pelo sensor ASAR comparando – as com medições realizadas por bóias – ondógrafo, consideradas como medições exactas.

A verificação foi feita a partir da comparação dos parâmetros de caracterização de agitação marítima,  $H_s$ ,  $T_e$ ,  $T_z$  e  $T_p$ , e das comparações visuais do espectro em frequência  $S(f)$  e da distribuição da direcção média por banda de frequência  $\theta(f)$ . A avaliação da qualidade baseia-se nos valores dos parâmetros de erro utilizados neste trabalho que são, o viés  $V$ , o erro quadrático médio  $E_{\text{rms}}$  o índice de dispersão  $S_i$  e finalmente o coeficiente de determinação  $R^2$ .

De uma forma geral as medições efectuadas pelo sensor ASAR apresentam uma qualidade aceitável para a avaliação do recurso energético das ondas marítimas I como se pode observar no Quadro 2, que mostra que os parâmetros de agitação comparados para uma distância máxima de 100 km entre locais de medição apresentam qualidade semelhante à que foi obtida para os resultados do modelo de agitação marítima WAM ao largo da costa oeste dos EUA (anexo 2).

Ao analisar os espectros em frequência  $S(f)$  do ASAR verificou-se que em muitos casos ocorre degradação acima da frequência de corte  $f_c$  (que varia de medição para medição, sendo fornecida pela ESA). Contudo em muitos casos o  $S(f)$  do ASAR acompanha bem o espectro obtido a partir da bóia – ondógrafo para  $f > f_c$ .

Nalguns casos verificou-se que mesmo para  $f < f_c$  o  $S(f)$  do ASAR apresenta uma forma espectral diferente da forma do espectro obtido a partir de medições efectuadas pela bóia. Como já foi referido, para esses casos é difícil determinar qual dos instrumentos mede incorrectamente; nalguns adiantou-se que poderá ter sido a bóia que não funcionou bem.

As medições realizadas pelo ASAR para  $f < f_c$  permitiram concluir que a maioria das bóias da rede americana NDBC apresentam limitações nas medições nas baixas frequências o que é devido ao acelerómetro utilizado. Das 13 bóias – ondógrafo seleccionadas para este trabalho apenas duas bóias (51001 e 51028, localizadas na zona do Equador e no Havai) são sensíveis para toda a gama de frequências de interesse. Assim foi efectuada uma comparação mais detalhada das medidas do ASAR

com as medições dessas bóias, tanto no que refere aos elementos comparados como à distância máxima (cerca de 35 km) entre os locais de medição dos dois sensores. Esta comparação mostrou que nestes casos a proximidade dos parâmetros e  $S(f)$  obtidos a partir das medições pelos dois sistemas aumenta substancialmente. Não se pode contudo esquecer que nas zonas onde estão localizadas estas bóias (latitudes de cerca de 0° e menos de 20°N) não ocorrem grandes tempestades, pelo que os resultados obtidos neste estudo não se podem generalizar para todo o globo.

## Referências

Aouf, L., J-M. Lefèvre, D. Hauser, B. Chapron e F. Collard- The impact of using the upgrade processing of ASAR level 2 wave products in the assimilation system, SEASAR 2006, Frascati, Italy.

Cândido J., 2003, Validação de Espectros Direccionais de Agitação Marítima Produzidos por Modelos Numéricos, Relatório de Estágio Profissionalizante Licenciatura em Ciências Geofísicas, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 103 pp

Collard, F., 2007. Personal communication.

European Space Agency, ASAR Product Handbook, 2007, 564 pp.

.ENVISAT, 2008, <http://envisat.esa.int/category/index.cfm?fcategoryid=61>.

ESA (European Space Agency), <http://www.esa.int/esaCP/index.html>, 2008

Goda, Y.,1985, *Random Seas and Design of Marine Structures*. University of Tokyo Press, Japan. 323 pp.

Hasselmann, K.e Hasselmann, S., 1991. On the non-linear mapping of an ocean wave spectrum into synthetic aperture radar image spectrum and its conversion. *J. Geophysics. Res.* 96:10713-10729

Holthuijsen, 2007 *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press. 387 pp.

Johnsen, H, G, Engen , F. Collard, V. Kerbaol, B. Chapron, 2006, ENVISAT ASAR Wave Mode Products -quality assessment and algorithm upgrade, SEASAR 2006, Frascati, Italy

Johnsen, H., 2005 ENVISAT ASAR Wave mode –Product Manual v.1.2 , ISBN82 -7747-1262-2, IT Report v1.2, No.1/2005, Oct. 2005.

Johnsen, H., 2006 ENVISAT ASAR Wave Mode Products - quality assessment and algorithm upgrade, SEASAR 2006.

Krogstad, H, E. 1992, A simple derivation of Hasselmann's non-linear ocean-SAR transform, *J. Geophysics. Res.* 97:2421-2425.

Lighthill ,J.,1981, *Waves in Fluids*. Cambridge University Press, Great Britain. 504 pp.

NDBC (National Data Buoy Center), <http://www.ndbc.noaa.gov/>, 2008

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), <http://www.noaa.gov/>, 2008

The WAMDI Group, 1988. WAM

# ANEXO 1

Quadro.A1 – Quadro complementar do Quadro 2. Verificação dos parâmetros integrais  $H_s$ ,  $T_e$ ,  $T_z$  e também do parâmetro  $T_p$  calculados a partir das medições de agitação marítima feitas pelo sensor ASAR, com medições das bóias da rede americana NDBC. Dx: distância máxima entre medições; (1) Bóias com o acelerómetro Hippy 40 (mais sensível às baixas frequências). Foram utilizados dados de bóia para 2005 e 2006 excepto para (2) com dados disponíveis apenas para o período de 2006.

Buoy	Obs	Dx km	$H_m$ (m)				$T_{10}$ (s)				$T_{02}$ (s)				$T_p$ (s)				$P$ (kW/m)			
			$R^2$	viés	Erms	Si	$R^2$	viés	Erms	Si	$R^2$	viés	Erms	Si	$R^2$	viés	Erms	Si	$R^2$	viés	Erms	Si
41001 <sup>2</sup>	26	90	0.37	-0.07	0.62	0.26	0.39	0.93	1.09	0.14	0.33	0.61	0.86	0.12	0.74	0.02	0.56	0.06	0.26	1.07	14.61	0.61
41002 <sup>2</sup>	16	100	0.21	-0.06	0.50	0.27	0.72	1.12	1.33	0.16	0.62	0.89	1.15	0.16	0.42	0.6	1.8	0.18	0.18	0.33	7.52	0.51
41040	73	100	0.71	0.05	0.31	0.14	0.74	0.73	0.88	0.11	0.61	0.38	0.57	0.08	0.80	-0.31	1.40	0.14	0.72	1.64	6.15	0.31
41041	79	90	0.61	0.05	0.28	0.14	0.92	0.74	0.88	0.11	0.89	0.41	0.54	0.07	-	-	-	-	0.59	1.89	6.99	0.35
44004	53	100	0.63	-0.28	0.93	0.29	0.69	1.08	1.30	0.15	0.58	0.82	1.11	0.14	0.69	0.53	1.24	0.13	0.37	-8.66	41.16	0.74
44008	39	100	0.72	0.10	0.65	0.25	0.65	1.57	1.73	0.22	0.43	1.20	1.49	0.21	0.75	0.87	1.31	0.14	0.72	7.57	19.82	0.60
46005 <sup>2</sup>	88	90	0.48	0.08	0.75	0.27	0.71	1.54	1.72	0.19	0.52	1.45	1.78	0.23	0.41	1.07	2.35	0.22	0.53	6.49	22.34	0.59
46006	66	100	0.64	0.23	0.68	0.34	0.62	0.54	1.00	0.10	0.43	0.87	1.14	0.14	0.42	-0.50	2.57	0.21	0.54	5.21	20.91	0.85
46059 <sup>2</sup>	76	80	0.52	-0.21	0.76	0.26	0.47	0.91	1.36	0.14	0.46	0.95	1.30	0.16	0.25	-0.41	2.09	0.18	0.52	-5.30	25.83	0.53
51001 <sup>1</sup>	52	100	0.62	0.09	0.40	0.19	0.67	0.70	0.93	0.11	0.68	0.49	0.80	0.10	0.51	0.24	1.61	0.16	0.57	2.42	7.49	0.39
51002	36	100	0.73	-0.04	0.36	0.15	0.75	1.19	1.30	0.16	0.80	0.70	0.80	0.11	0.23	1.36	2.17	0.24	0.85	2.08	7.30	0.27
51003	40	100	0.62	-0.02	0.33	0.16	0.58	0.78	1.07	0.12	0.68	0.42	0.69	0.09	0.07	-0.33	2.81	0.28	0.56	0.85	6.56	0.35
51004	51	100	0.63	0.06	0.36	0.16	0.88	0.81	0.95	0.11	0.33	0.22	1.20	0.15	0.55	0.73	2.08	0.22	0.55	2.87	10.01	0.42
51028 <sup>1</sup>	69	90	0.34	0.05	0.25	0.12	0.61	0.47	0.82	0.09	0.8	0.26	0.52	0.06	0.62	-0.01	2.74	0.23	0.24	1.51	5.47	0.29

## ANEXO 2

Quadro A.2 – Qualidade das estimativas da altura significativa, do período de energia do período de cruzamento de zeros do período de pico e da potência das ondas, calculadas pelo modelo WAM para a Ilha de San Nicolas em 2001 (Cândido J., 2003)

	Valor médio		$V$	$E_a$	$E_{rms}$	$S_i$
	WAM	bóia				
$H_s$ (m)	2.09	2.18	-0.09	0.27	0.37	0.17
$T_c$ (s)	10.41	9.65	0.76	1.07	1.36	0.14
$T_{m02}$ (s)	8.41	6.93	1.48	1.56	1.92	0.28
$T_p$ (s)	11.23	11.37	-01.4	1.96	2.97	0.26
$P$ (kw/m)	24.51	27.40	-2.89	7.65	14.91	0.54