

REGIME DE EXTREMOS DA AGITAÇÃO MARÍTIMA A PARTIR DE DADOS DE BÓIA E DE *HINDCAST*

A. Muralha¹; A. Trigo-Teixeira² e M.A.V.C. Araújo³

¹antonio.muralha@ist.utl.pt, ²trigo.teixeira@civil.ist.utl.pt, ³amelia.araujo@ist.utl.pt
CEHIDRO, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 1049-001 Lisboa

Resumo

No presente trabalho foi efectuado um estudo comparativo na obtenção de dados de agitação marítima, utilizando várias técnicas estatísticas e dados de diferentes fontes, para uma zona costeira a Norte de Portugal. Os dados utilizados foram obtidos a partir das seguintes fontes: dados fornecidos pela bóia ondógrafo de Leixões e dados fornecidos pelo *site European Center for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), ERA40. Foi efectuada uma análise utilizando as séries de dados totais, ou seja, independentemente da direcção, e utilizando séries por sectores direccionais. Com base nas séries de valores, foi calculada a altura significativa da onda e o período de pico para períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos com base em duas metodologias: máximo anual e *peak over threshold*.

Considerando as duas fontes de dados e analisando as séries totais de valores, verificou-se que as maiores diferenças ocorreram para a direcção da onda. Concluiu-se que, para a região em estudo, é possível utilizar séries temporais de extremos de agitação marítima obtidas por *hindcast* como alternativa aos dados da bóia ondógrafo.

1. Introdução

O projecto de obras marítimas exige cada vez mais o estabelecimento de regimes de extremos de alturas de ondas e períodos. Para efectuar esse estudo, é fundamental a utilização de dados de agitação marítima no local ou nas zonas envolventes recorrendo-se, sempre que possível, a dados provenientes de bóias ondógrafo. Contudo, esses dados nem sempre estão disponíveis quer pela inexistência das bóias quer pela falta da sua operacionalidade, resultando em séries temporais demasiado curtas. Para colmatar essa escassez de dados, é prática cada vez mais comum utilizar dados de *hindcast* obtidos para o globo inteiro, disponíveis na Net.

Torna-se então necessário efectuar um estudo comparativo entre os dados obtidos pelas diferentes fontes. Para isso, foi utilizada a bóia ondógrafo de Leixões e os dados de *hindcast* mais próximos da localização da bóia. Deste modo, realizou-se a comparação das séries totais de valores, a comparação das séries de valores com base em três sectores (NW, W, SW), e por fim, foi também realizada uma comparação do valor obtido para a altura significativa da onda (H_s) e período de pico (T_p) com períodos de retorno 10, 50 e 100 anos. De modo a determinar a altura significativa e o respectivo período de pico para os referidos períodos de retorno foram utilizadas duas metodologias: o máximo anual e o *peak over threshold* (POT). Estas metodologias são normalmente utilizadas por muitos investigadores da área (Goda, 2000; Holthuijsen, 2007; Corsini et al., 2004; Costa, 1994; ROM 0.3-91, 1992).

A definição dos sectores prendeu-se com as ondulações dominantes em Portugal, ficando estes centrados nas direcções que lhes dão o nome. Assim, o sector NW está centrado em Noroeste e cobre toda a zona deste Norte até à bissectriz do quadrante NW-W. Assim sendo, dentro deste sector encontram-se as ondas com direcção compreendida no intervalo $[360,0^\circ - 292,5^\circ]$. Por seu lado, o sector W apresenta uma amplitude de 45° e encontra-se centrado em Oeste, compreendendo direcções entre $]292,5^\circ - 247,5^\circ]$. Finalizando, o sector

SW é definido desde o final do sector anterior até à direcção Sul, [247,5° - 180,0°]. Estes sectores encontram-se representados na Figura 1.1.

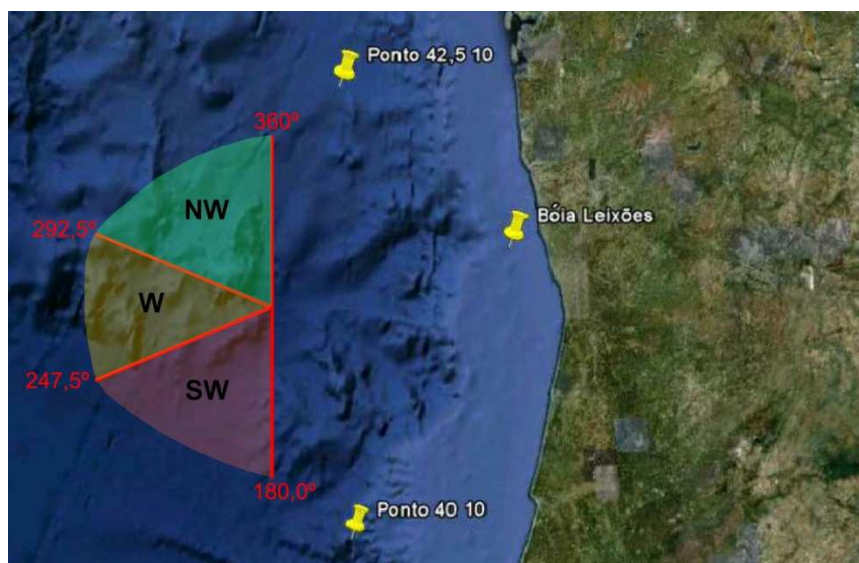


Figura 1.1 – Representação dos pontos de estudo e dos sectores definidos (Google Earth).

2. Fontes de dados

2.1. Bóia Ondógrafo

As bóias ondógrafo existentes em Portugal são do tipo *Dataweel* e propriedade do Instituto Hidrográfico (IH). Para o estudo em questão foi escolhida a bóia de Leixões, que se encontra nas coordenadas 41°19'N, 8°59'W. Sendo inicialmente não direccionais, actualmente as bóias em utilização já determinam a direcção das ondas. Assim sendo, os valores obtidos para o intervalo de tempo entre 1981 e 1985 apenas apresentam valores de altura significativa e os períodos de pico correspondentes. Porém, para os valores presentes no intervalo compreendido entre 1993 e 2007, para além dos dois parâmetros atrás referidos já é possível obter a direcção correspondente às ondas.

Os valores presentes nas séries da bóia apresentam um intervalo de medição de três horas em condições normais, ou seja, para um estado de mar que não seja considerado temporal¹, por sua vez, para casos de temporal o intervalo de medição é inferior a um minuto. Informação complementar pode ser obtida através do *site* do Instituto Hidrográfico.

A bóia apresenta dois tipos de sensores: o acelerómetro, que mede a aceleração vertical do movimento da superfície livre e com esse valor determina o valor da altura de onda e período, e um sensor que permite a determinação da direcção da onda que está a ser medida no primeiro sensor.

Através dos valores medidos pelos sensores da bóia é possível, para cada instante de medição definir a altura significativa, que corresponde à média do terço superior das ondas registadas pela bóia no período de observação; determinar o período de pico, que corresponde à frequência com o máximo valor de densidade espectral das ondas mais energéticas presentes no registo; determinar a direcção média.

¹ O Instituto Hidrográfico considera a ocorrência de um temporal quando o valor da altura significativa é superior a cinco metros para a costa Oeste e superior a três metros para a costa Sul e Madeira.

2.2. Dados de hindcast

Os dados obtidos pela segunda via, a partir do *European Center for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), ERA40, são fornecidos numa malha quadrada com $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ de latitude/longitude, cobrindo a totalidade do globo. Deste modo, como se pretende fazer uma comparação com os dados obtidos através da bóia de Leixões, torna-se necessário utilizar os dados dos pontos localizados o mais próximo possível da bóia. Foram então escolhidos dois pontos da malha quadrangular para obtenção de dados, pontos esses que têm as coordenadas $42,5^\circ\text{N } 10,0^\circ\text{W}$ (Ponto 42,5 10) e $40,0^\circ\text{N } 10,0^\circ\text{W}$ (Ponto 40 10). A sua localização pode ser observada na Figura 1.1.

A série de valores fornecida pelo ECMWF apresenta quatro medições diárias com um intervalo de tempo de seis horas, desde Setembro de 1957 até Agosto de 2002. Deste modo, esta série de valores é muito mais longa do que a série obtida para a bóia de Leixões e não apresenta o inconveniente da bóia no que se refere a falhas por avaria.

3. Comparação das séries totais de valores

Para a comparação das séries de valores do ERA40 em relação à série obtida pela bóia foi escolhida a representação gráfica Quantil-Quantil (Q-Q). Este tipo de representação permite comparar duas séries de valores com qualquer dimensão. Assim, para séries com igual número de valores a relação entre os valores ordenados das mesmas é trivial. Por outro lado, quando uma das séries a representar apresenta mais valores que a outra é necessário criar uma relação entre os valores obtidos em cada uma das séries. Deste modo, para relacionar os valores de uma série com os valores da outra é necessário diminuir o número de valores da amostra da série mais longa, sendo n o número que valores a considerar para que no final desta operação as duas séries apresentem o mesmo número de valores. Como se trata da realização de uma média numa série de valores ordenados, logo idênticos, não é alterada de forma muito significativa a série inicial. Assim sendo, nas figuras seguintes não se encontra representada a totalidade das séries fornecidas pelo ERA40 mas a série resultante deste processo de compatibilização.

Na Figura 3.1 é apresentada a relação Q-Q da altura significativa fornecida pela série da bóia *versus* a série ERA40.

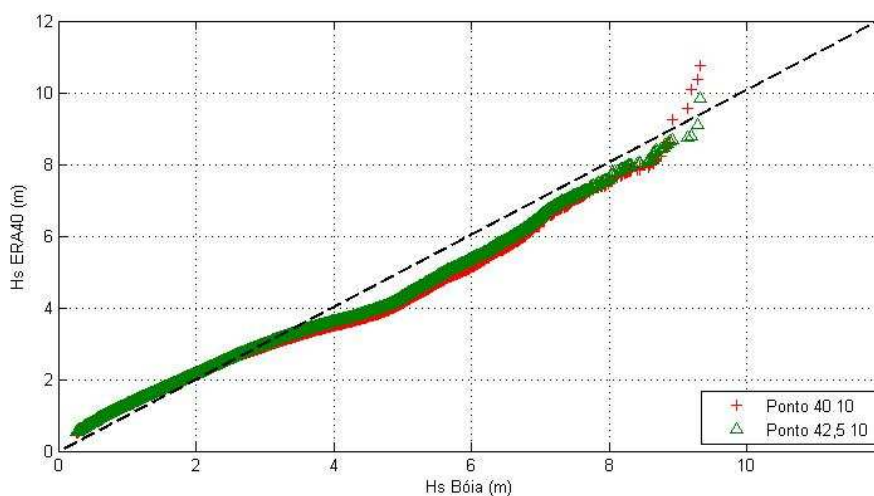


Figura 3.1 – Gráfico Q-Q da altura significativa da série da bóia vs série ERA40.

Analisando a Figura 3.1 é possível concluir que as séries de valores fornecidas pelo ERA40 apresentam valores superiores aos valores da bóia até uma altura de onda de

aproximadamente três metros. Em seguida, para ambos os pontos a bóia apresenta valores superiores até valores perto de uma altura significativa de nove metros, sendo que após este valor a série proveniente do ECMWF volta a apresentar valores superiores aos da bóia. Conclusões idênticas foram obtidas no estudo comparativo entre as séries de valores do ERA40 e as bóias existentes nos EUA (Caires and Sterl, 2001). De salientar que para valores superiores a oito metros o estudo realizado por Caires and Sterl (2001) não conclui que os valores do ERA40 sejam superiores aos valores da bóia como neste caso de estudo.

Esta figura mostra também a comparação entre os valores obtidos através do ERA40 para os dois pontos mais próximos da bóia. É possível observar que para alturas significativas inferiores a cerca de oito metros os dois pontos apresentam valores idênticos. Para alturas significativas superiores verifica-se que o Ponto 40 10 apresenta valores superiores aos existentes no segundo ponto em estudo.

No que diz respeito ao período de pico, a abordagem foi idêntica mostrando-se na Figura 3.2 o gráfico Q-Q obtido.

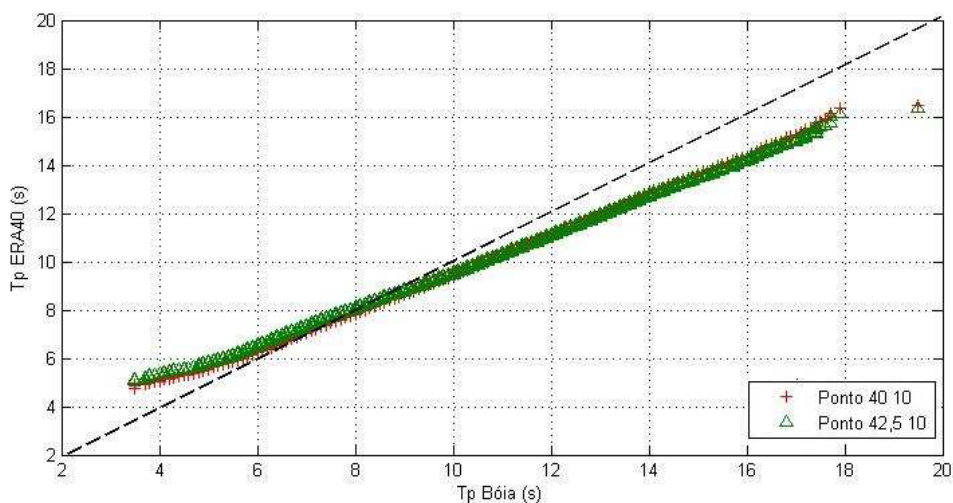


Figura 3.2 – Gráfico Q-Q do período de pico da série da bóia vs série ERA40.

Através da análise da Figura 3.2 verifica-se que relativamente ao período de pico as séries de *hindcast* apresentam valores superiores aos da bóia até períodos de cerca de oito segundos, a partir daí, e para qualquer dos dois pontos em estudo, a bóia apresenta valores superiores. Isto pode relacionar-se com o facto de, como se viu anteriormente, a série do ERA40 apresentar valores de altura significativa superiores para alturas inferiores a três metros uma vez que em geral os períodos mais baixos estão associados a alturas de onda mais pequenas. Tal como na altura significativa, o período de pico não apresenta grandes diferenças entre os dois pontos fornecidos pela malha do ECMWF.

Finalizando a análise da série total de valores, foi feita uma avaliação idêntica às séries obtidas para o parâmetro da direcção. Esta avaliação é apresentada na Figura 3.3.

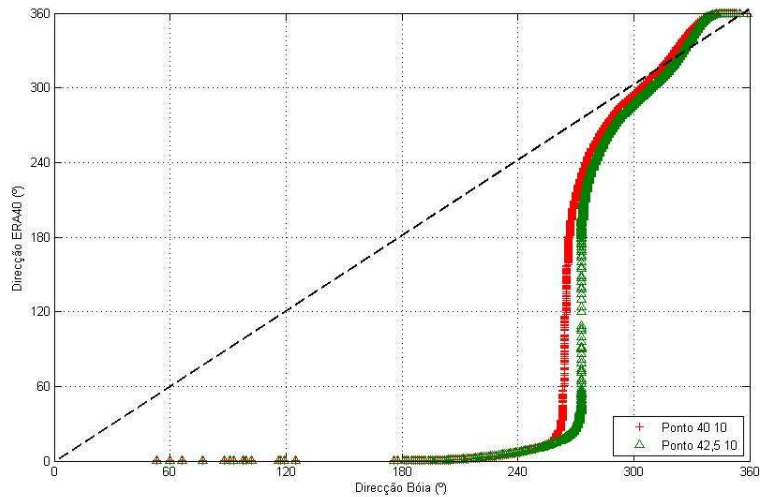


Figura 3.3 – Gráfico Q-Q da direcção da série da bóia vs série ERA40.

Observando a Figura 3.3 e atendendo aos parâmetros previamente analisados, é possível verificar que o parâmetro que mais difere da bóia é a direcção. Deste modo, a direcção fornecida pelo ERA40 apenas se encontra próxima da direcção obtida pela bóia para valores acima de aproximadamente 290° . Esta figura mostra também as diferenças entre as direcções obtidas para os dois pontos em estudo fornecidos pelo ERA40. Assim, é possível verificar que para valores inferiores a 250° as direcções obtidas nos dois pontos são idênticas, o mesmo acontece para valores superiores a 270° .

4. Comparação sectorial

Foi efectuada uma comparação sectorial para cada um dos três sectores de rumos anteriormente definidos. As Figuras 4.1 a 4.3 apresentam os gráficos Q-Q para os sectores NW, W e SW, respectivamente.

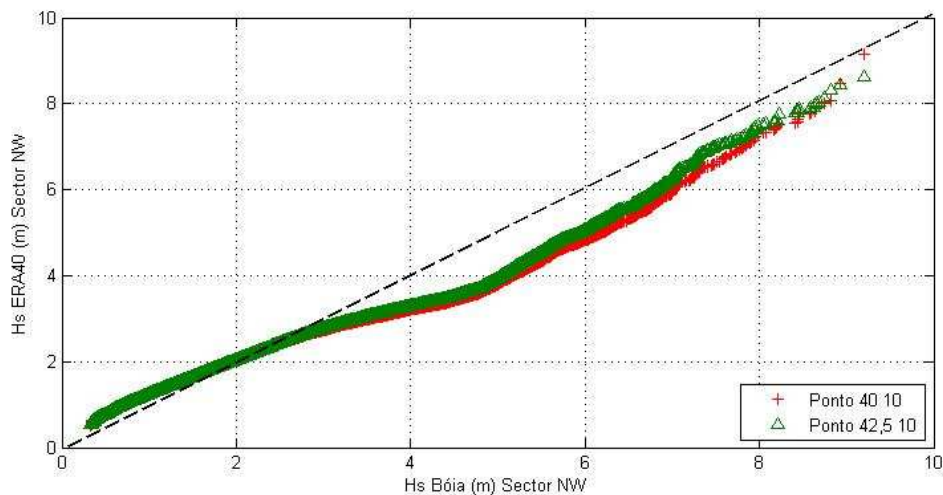


Figura 4.1 – Gráfico Q-Q da altura significativa da série da bóia vs série ERA40 para o sector NW.

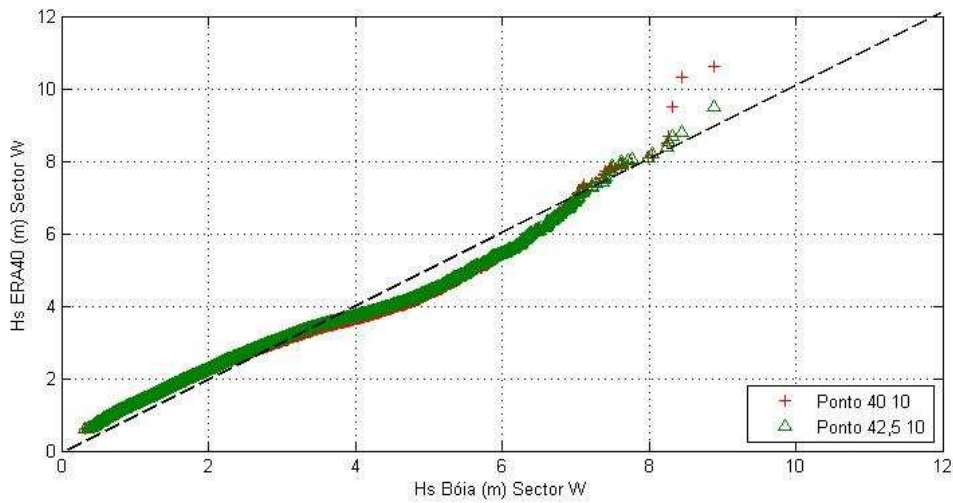


Figura 4.2 – Gráfico Q-Q da altura significativa da série da bóia vs série ERA40 para o sector W.

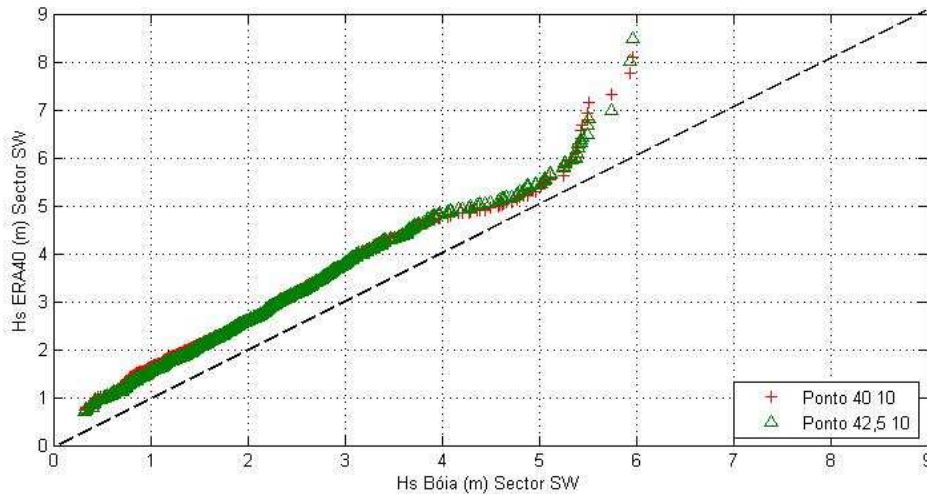


Figura 4.3 – Gráfico Q-Q da altura significativa da série da bóia vs série ERA40 para o sector SW.

Observando as Figuras 4.1 e 4.2 é possível obter as mesmas conclusões que as da Figura 3.1 para a série total de valores, com a diferença de que na Figura 4.1 para alturas significativas superiores a nove metros o valor obtido na série do ERA40 não é superior aos valores obtidos através da bóia.

As maiores diferenças entre a série total e sectorial são verificadas na Figura 4.3 para o sector SW, onde todos os valores obtidos por *hindcast* são superiores aos valores da série da bóia. Este facto pode estar relacionado com dificuldades dos modelos de *hindcast* em gerar agitação correspondente a rumos vizinhos do SW, dada a curta permanência destes estados de agitação.

5. Determinação da altura significativa da onda e do período de pico para diferentes períodos de retorno

Os valores de altura significativa e período de pico foram determinados para períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos, considerando várias séries de valores. Este procedimento foi realizado utilizando o método do máximo anual e o método do *peak over threshold*. Estas metodologias foram também aplicadas na análise sectorial.

5.1. Máximo anual

Partindo das séries de valores obtidas inicialmente, foram criadas novas séries de forma a que neste caso contenham apenas os valores dos máximos anuais referentes aos intervalos de tempo presentes nas séries iniciais. Foram então obtidas três séries: a série da bóia contendo vinte valores e as séries obtidas através do ERA40 que apresentam ambas quarenta e seis valores. Relativamente às séries obtidas para cada sector, as séries provenientes da bóia apresentam menos valores, uma vez que a bóia inicialmente não determinava a direcção, assim sendo as séries referentes aos dados sectoriais da bóia apresentam apenas quinze valores.

Para o cálculo da altura significativa e para os diferentes períodos de retorno torna-se necessário escolher uma função distribuição de probabilidade que descreva a variável aleatória em análise. Deste modo, foi utilizada uma função distribuição de probabilidade do tipo *Generalised Extreme-Value* (GEV). Por seu lado, este tipo de função apresenta três casos particulares. Para o estudo em questão a função utilizada foi tipo I ou *Gumbel* (Equação 5.1), uma vez que, segundo Holthuijsen (2007), Goda (2000) e Reeve et al. (2004) é a função que melhor descreve a abordagem do máximo anual para valores de altura significativa.

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{H_{s,MA} - A}{B} \right) \right] \text{ para } B > 0, -\infty < H_{s,AM} < \infty \quad (5.1)$$

Após a escolha da função distribuição de probabilidade torna-se então necessário estimar os parâmetros que nela intervêm. Para o efeito, foram utilizados os valores da amostra e o método da máxima verosimilhança, o qual se encontra disponível no programa *Matlab*.

Na Tabela 5.1 encontram-se os valores dos parâmetros estimados para as três séries totais de valores.

Tabela 5.1 – Parâmetros estimados para a função GEV para a série total de valores

	Bóia	ERA40	
		Ponto 40 10	Ponto 42,5 10
A	6,882	6,812	6,996
B	1,327	0,998	0,952

Após a estimação de parâmetros foi então possível determinar o valor para a altura significativa com o período de retorno de 10, 50 e 100 anos. Na Figura 5.1 encontra-se a representação dos valores da probabilidade de excedência para a série de valores e para a função estimada. O valor da probabilidade de excedência da amostra foi calculado com base na Equação 5.2.

$$F(x)_{amostra} = \frac{n}{N + 1} \quad (5.2)$$

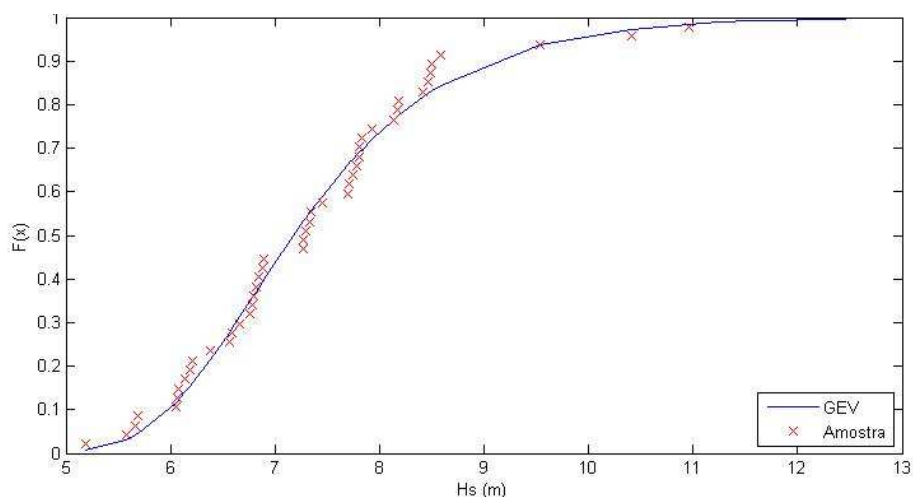


Figura 5.1 – Probabilidade de excedência da amostra de Hs e função GEV estimada para a série do Ponto 40 10.

Na Tabela 5.2 são apresentados os valores referentes à altura significativa para os três períodos de retorno em estudo, para as três séries de valores.

Tabela 5.2 – Valor de Hs para um período de retorno de 10, 50 e 100 anos para as três séries totais de valores

T (anos)	Bóia	ERA40	
		Ponto 40 10	Ponto 42,5 10
10	9,87	9,06	9,14
50	12,06	10,71	10,71
100	12,99	11,40	11,38

Realizando o mesmo procedimento para cada um dos três sectores definidos obtiveram-se os valores presentes na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Valor de Hs para um período de retorno de 10, 50 e 100 anos para as três séries de valores para os três sectores

T (anos)	Hs (m) Sector NW			Hs (m) Sector W			Hs (m) Sector SW		
	Bóia	ERA40		Bóia	ERA40		Bóia	ERA40	
		Ponto 40 10	Ponto 42,5 10		Ponto 40 10	Ponto 42,5 10		Ponto 40 10	Ponto 42,5 10
10	9,36	8,32	8,63	8,91	9,03	8,85	7,02	7,61	7,44
50	11,34	9,95	10,35	11,40	11,09	10,59	9,43	9,51	9,14
100	12,18	10,64	11,08	12,45	11,96	11,33	10,45	10,31	9,86

Analisando os valores obtidos para os três sectores, verifica-se que o sector W é o que apresenta um valor de altura significativa maior em qualquer das séries, com excepção da série da bóia com um período de retorno de 10 anos. Apesar de, para este sector, a série considerada para o cálculo da altura significativa ser inferior à série considerada para o mesmo cálculo no sector NW, apresenta um valor de Hs superior. Isto significa que, apesar de a ocorrência de ondulação com esta direcção ser menos frequente, quando ocorre apresenta alturas significativas mais elevadas. No que respeita ao sector SW, apesar de apresentar um número de ocorrências muito inferior aos restantes, o valor da altura significativa obtida para este sector não é muito diferente.

Com isto se conclui que, pelo facto de uma ondulação ser menos frequente em dada direcção e ser de curta duração, não quer dizer que irá causar menores danos, pois depende da altura significativa atingida.

A determinação do período de pico correspondente aos diferentes períodos de retorno foi efectuada utilizando duas metodologias distintas. A primeira baseia-se na estimação de uma função distribuição de probabilidade do tipo GEV à série de períodos, a qual foi obtida com base no valor do período correspondente à altura significativa máxima anual. Este facto deve-se à dependência dos períodos em relação à altura significativa (Caires et al., 2007). A segunda metodologia baseia-se na utilização de equações empíricas para estados de mar em completo desenvolvimento (US Army Corps of Engineers, 2008).

Na Tabela 5.4 encontram-se os valores calculados para o período de pico com base na primeira metodologia.

Tabela 5.4 – Valor de T_p para um período de retorno de 10, 50 e 100 anos para as três séries totais de valores, de acordo com a função GEV

T (anos)	Bóia	ERA40	
		Ponto 40 10	Ponto 42,5 10
10	17,53	15,21	15,71
50	20,43	17,42	17,89
100	21,66	18,36	18,81

Na Figura 5.2 encontra-se representada a probabilidade de excedência da amostra de períodos bem como a função do tipo GEV.

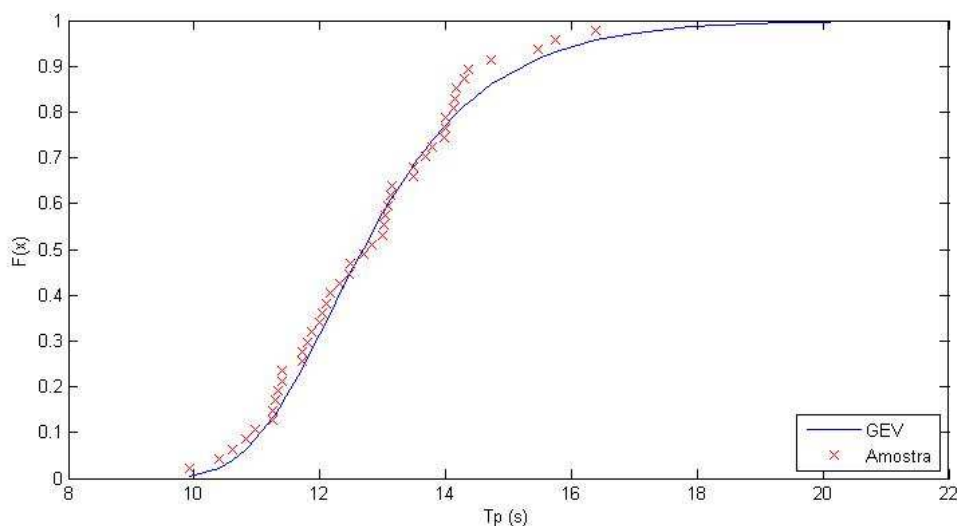


Figura 5.2 – Probabilidade de excedência da amostra de T_p e função GEV estimada para a série do Ponto 40 10.

Na Tabela 5.5 apresentam-se os resultados obtidos através deste método para cada um dos sectores definidos.

Tabela 5.5 – Valor de T_p para um período de retorno de 10, 50 e 100 anos para as três séries de valores para os três sectores, de acordo com a função GEV

T (anos)	Tp (s) Sector NW			Tp (s) Sector W			Tp (s) Sector SW		
	Bóia	ERA40		Bóia	ERA40		Bóia	ERA40	
		Ponto 40 10	Ponto 42,5 10		Ponto 40 10	Ponto 42,5 10		Ponto 40 10	Ponto 42,5 10
10	18,25	15,51	15,87	17,31	15,25	15,05	11,50	12,32	12,07
50	21,33	17,95	18,23	20,69	17,73	17,11	13,37	14,23	13,59
100	22,63	18,99	19,23	22,12	18,78	17,97	14,16	15,04	14,23

Relativamente à segunda metodologia para determinar o período de pico, foram utilizadas as seguintes equações (US Army Corps of Engineers, 2008):

$$\frac{gH_s}{u_*^2} = 2,115 \times 10^2 \quad (5.3)$$

$$\frac{gT_p}{u_*} = 2,398 \times 10^2 \quad (5.4)$$

Igualando as duas equações obtém-se:

$$\frac{H_s}{gT_p^2} = \frac{2,115 \times 10^2}{(2,398 \times 10^2)^2} = 3,678 \times 10^{-3} \quad (5.5)$$

Na Tabela 5.6 encontram-se os resultados para as séries totais de valores.

Tabela 5.6 – Valor de T_p para um período de retorno de 10, 50 e 100 anos para as três séries totais, de acordo com as equações empíricas

		ERA40	
T (anos)	Bóia	Ponto 40 10	Ponto 42,5 10
10	16,55	15,85	15,92
50	18,29	17,24	17,24
100	18,98	17,79	17,77

Finalizando, foi aplicado o mesmo procedimento para cada um dos sectores, tendo-se obtido os resultados presentes na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Valor de T_p para um período de retorno de 10, 50 e 100 anos para as três séries para os diferentes sectores, de acordo com as equações empíricas

T (anos)	Tp (s) Sector NW			Tp (s) Sector W			Tp (s) Sector SW		
	Bóia	ERA40		Bóia	ERA40		Bóia	ERA40	
		Ponto 40 10	Ponto 42,5 10		Ponto 40 10	Ponto 42,5 10		Ponto 40 10	Ponto 42,5 10
10	16,11	15,19	15,48	15,72	15,83	15,67	13,96	14,53	14,37
50	17,74	16,61	16,95	17,78	17,54	17,14	16,17	16,24	15,92
100	18,38	17,18	17,53	18,59	18,22	17,73	17,02	16,91	16,54

Comparando as Tabelas 5.4 com 5.6 e 5.5 com 5.7 verifica-se que os valores do período de pico calculados através das duas metodologias apresentam ordens de grandeza idênticas, sendo as maiores diferenças verificadas para as séries da bóia. Com excepção do sector SW, onde foram obtidos maiores valores de períodos de pico usando as equações empíricas, de um modo geral os períodos obtidos segundo a GEV são superiores, nomeadamente para as séries da bóia e para períodos de retorno de 50 e 100 anos das séries do ERA40.

Além disso, a série do ERA40 apresenta, de um modo geral, valores ligeiramente mais baixos do que os obtidos para série da bóia. Segundo a primeira metodologia isto deve-se ao facto de, para os períodos mais elevados, os valores presentes na série do ERA40 serem inferiores aos valores presentes na série da bóia. Na segunda metodologia utilizada este facto deve-se ao período depender apenas da altura significativa e, por consequência, como a altura significativa obtida para a série da bóia é mais elevada implica que o período de pico seja também mais elevado.

5.2. Peak over threshold

O segundo método utilizado para a determinação da altura significativa para os diferentes períodos de retorno em estudo foi o POT. Assim, foi necessário criar novas séries de valores a partir das séries iniciais, com base num *threshold* escolhido e na definição de um intervalo de três dias entre cada tempestade ou “evento”, de modo a que estes sejam estatisticamente independentes (Neelamani, 2009; Reeve et al., 2004). Para este estudo foram escolhidos vários *threshold*, variando entre um valor de altura significativa de quatro metros até oito metros para todas as séries de valores, com exceção do sector SW em que o *threshold* variou entre três metros e sete metros de altura significativa.

A função distribuição de probabilidade que melhor se ajusta a uma análise da altura significativa com base numa abordagem POT é a função distribuição de probabilidade do tipo *Generalised Pareto* (GP) (Holthuijsen, 2007):

$$F(x) = 1 - \left(1 + C \frac{H_{s,POT} - A}{B}\right)^{-1/c} \quad (5.6)$$

Após a estimação dos parâmetros da função de distribuição, foi possível constatar que o valor do parâmetro C é sempre próximo de 0. Assim, a função distribuição de probabilidade GP é reduzida a uma distribuição exponencial que tem a seguinte forma (Holthuijsen, 2007):

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\frac{H_{s,POT} - A}{B}\right) \quad (5.7)$$

A estimação dos parâmetros presentes na Equação 5.7 foi feita com base no método da máxima verosimilhança segundo a implementação do programa *Matlab*.

Na Figura 5.3 encontra-se representada a função GP e os valores da amostra obtidos para o Ponto 40 10 para um *threshold* de quatro metros.

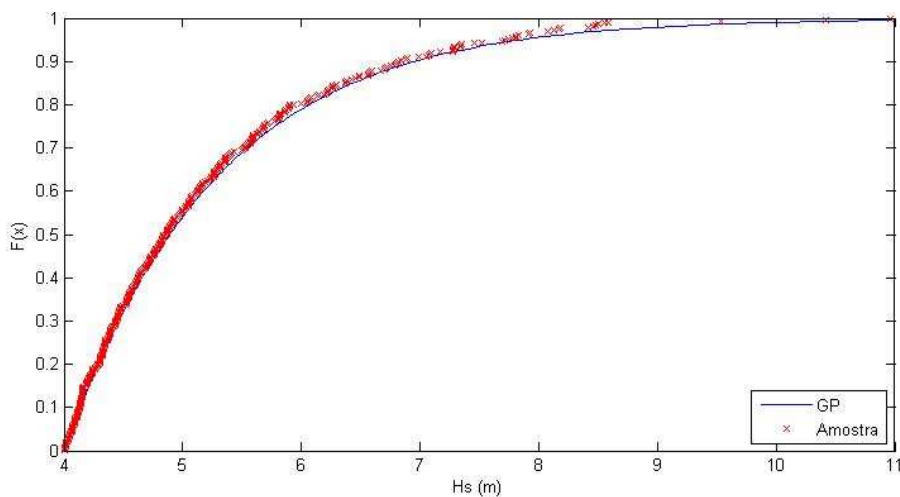


Figura 5.3 – Gráfico da probabilidade de excedência da amostra de Hs e função GP estimada para a série do Ponto 40 10 com um valor de *threshold* de quatro metros.

Após a estimação dos parâmetros da função obtiveram-se os valores da altura significativa para os períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos, para cada *threshold* utilizado. Assim, por forma a escolher o valor da altura significativa a considerar para cada série de valores foi utilizado o seguinte método: desenhar o gráfico que relaciona o valor da altura significativa com o *threshold* (Figura 5.4), e escolher o valor máximo presente nesse gráfico desde que se verifique na fase inicial um aumento da altura significativa com o aumento do *threshold*, seguida de um máximo e, por fim, uma zona descendente (Neelamani, 2009).

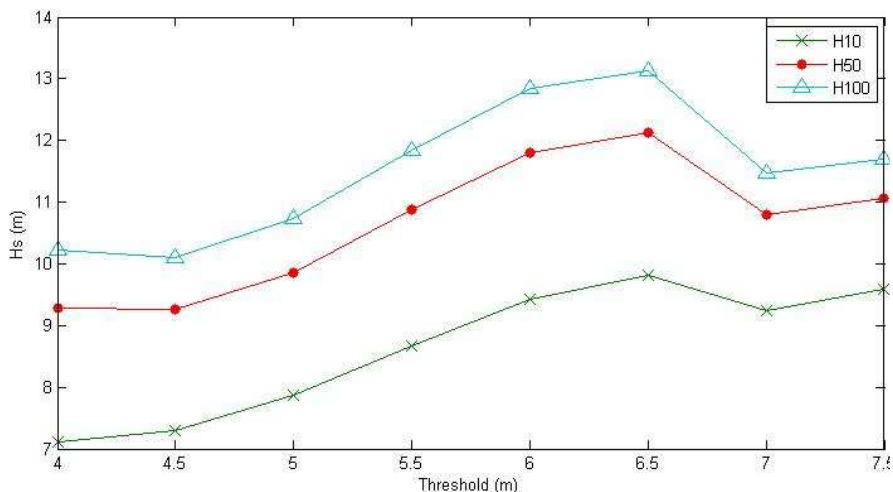


Figura 5.4 – Valores da altura significativa para os diferentes períodos de retorno em função do *threshold* para o sector NW.

Na Tabela 5.8 encontram-se os valores da altura significativa com um período de retorno de 100 anos para cada uma das séries segundo o procedimento referido.

Tabela 5.8 – Valor de Hs para um período de retorno de 100 anos para a série total e séries sectoriais

		Hs (m) POT				
		Ponto	Série Total	Sector NW	Sector W	Sector SW
ERA40	40 10		11,85	11,53	12,31	*
	42.5 10		13,30	13,13	14,09	*
Bóia			*	12,56	12,31	9,76

* Nada se pode concluir acerca do valor da altura significativa.

A Figura 5.5 mostra um exemplo onde não foi possível determinar o valor da altura significativa por esta metodologia devido à ausência de um máximo explícito na série de valores calculados.

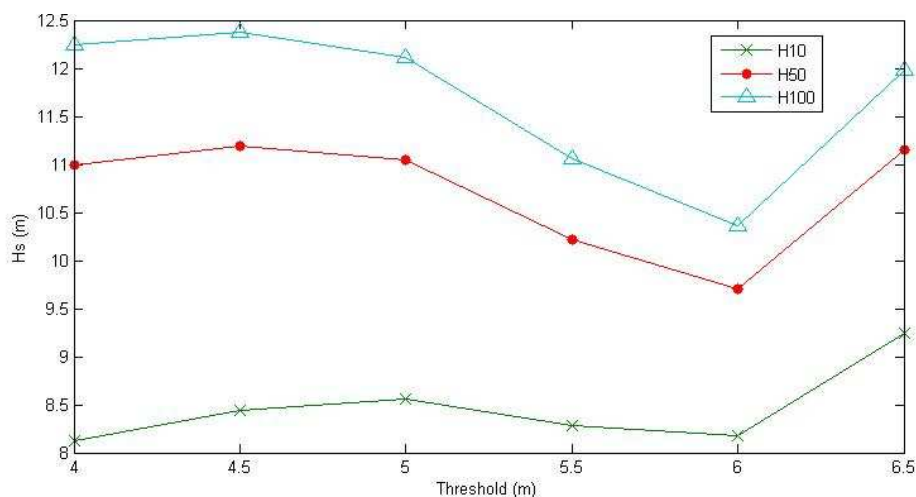


Figura 5.5 – Valores da altura significativa para os diferentes períodos de retorno em função do *threshold* para a série total de valores da bóia.

Segundo a metodologia do POT, para os dois sectores onde é possível realizar uma comparação entre a série da bóia e os pontos do ERA40 é possível verificar que a série da bóia apresenta geralmente valores de altura significativa inferiores. Isto deve-se fundamentalmente ao facto de a série considerada na bóia apresentar muito menos eventos do

que a série obtida através do ERA40. Comparando os valores obtidos para os diferentes pontos em estudo é possível observar que o Ponto 42,5 10 apresenta valores um pouco mais elevados do que o Ponto 40 10.

Para a determinação do período de pico apenas foi possível utilizar a metodologia que se baseia nas equações empíricas (Equações 5.3 a 5.5). A metodologia que se baseia na estimação da função distribuição de probabilidade GP não foi utilizada devido à impossibilidade de determinar o parâmetro A da Equação 5.7. Uma vez que este parâmetro corresponde ao valor do *threshold*, não é possível obter o seu valor dado que a série de valores de períodos considerados é função da série de valores da altura significativa, e por consequência do seu *threshold*.

A Tabela 5.9 apresenta os valores de período de pico obtidos para um período de retorno de 100 anos.

Tabela 5.9 – Valor de T_p para um período de retorno de 100 anos para a série total e séries sectoriais

	Ponto	Tp (s) POT			
		Série Total	Sector NW	Sector W	Sector SW
ERA40	40 10	18,13	17,88	18,48	*
	42.5 10	19,21	19,08	19,77	*
Bóia		*	18,67	18,48	16,46

Da mesma forma, não foi possível determinar o valor de T_p para algumas séries uma vez que não foi possível determinar o valor de H_s .

6. Conclusões

Por comparação das séries totais de valores foi possível verificar que, para valores de altura significativa pequenos (até três metros), a bóia apresenta valores inferiores aos do ERA40. Para alturas intermédias o ERA40 apresenta valores menores, voltando a ser superiores para alturas significativas acima dos nove metros. Para a análise sectorial, estas conclusões também se aplicam aos sectores NW e W, sendo que no sector SW os valores da bóia são sempre inferiores aos valores provenientes da série fornecida pelo ECMWF. Relativamente aos períodos de pico, constatou-se que os valores da bóia são superiores aos do ERA40 para períodos elevados, sendo inferiores nas outras situações. No que respeita à direcção, este é o parâmetro cujos valores da bóia mais diferem dos fornecidos pelo ERA40. O estudo mostrou também que, para todas as séries estudadas, os valores obtidos para os dois pontos no oceano, onde é feito o *hindcast* do ERA40, são sempre idênticos, sendo indiferente usar um ou outro ponto.

O valor obtido para o H_s com um período de retorno de 100 anos, segundo a abordagem do máximo anual, está de acordo com o publicado por outros autores (Sterl and Caires 2004; Costa, 1994). Comparando a metodologia do máximo anual com a do *peak over threshold* concluiu-se que, de um modo geral, o POT apresenta, para os diferentes períodos de retorno em estudo, valores de altura significativa superiores aos valores obtidos com base na abordagem do máximo anual. Uma vez que a série de valores considerada para a determinação da altura significativa no POT é muito mais longa do que a série utilizada no método do máximo anual, esta conclusão é coerente e justifica-se. Como se sabe o tamanho da amostra influencia claramente a estimação dos parâmetros. Por seu lado, a comparação dos períodos obtidos para as duas metodologias em estudo mostra que para a metodologia do POT os períodos são geralmente superiores uma vez que estes apenas dependem da altura significativa. De qualquer forma, conclui-se que se obtêm resultados da mesma ordem de grandeza usando as duas metodologias.

Os resultados mostram que existe uma boa relação entre os dados obtidos pela bóia ondógrafo de Leixões e os dados obtidos por *hindcast*. Como conclusão final, pode afirmar-se que, na região em estudo, as séries temporais de extremos da agitação baseadas em valores de *hindcast* poderão ser utilizadas sempre que não existam dados de bóias.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao European Centre for Medium-Range Weather Forecasts por tornar os dados acessíveis.

Bibliografia

- Caires, S., and Sterl, A. (2001). Comparative assessment of ERA-40 ocean wave data. *ECMWF Workshop on Re-Analysis, ECMWF, ERA-40 Project Rep. Series 3*, (pp. 353-368). Reading, United Kingdom.
- Caires, S., Westhuysen, A. v., Huisman, B., and Groeneweg, J. (2007). *Estudo do clima de agitação marítima ao longo da costa sudoeste da Madeira*. Delf Hydraulics.
- Corsini, S., Inghilesi, R., Franco, L., and Piscopia, R. (2004). *Atlante delle onde nei mari italiani Italian Wave Atlas. Agenzia per la Protezione dell' Ambiente e per i Servizi Tecnici. Università degli studi di Roma Tre*. Roma.
- Costa, M. (1994). *Final report of sub-project «A wind driven wave climatology of the Portuguese coast »*. Lisboa: Report PO-Waves, Instituto Hidrográfico, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. (s.d.). *ERA 40, Daily Fields*. Obtido em 11 de Março de 2011, de http://data-portal.ecmwf.int/data/d/era40_daily/
- Goda, Y. (2000). *Random Seas and Design of Maritime Structures*. Singapore: World Scientific Publishing.
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic an Coastal Waters*. UK: Cambridge University Press.
- Instituto Hidrográfico. (s.d.). *Bóias Ondógrafo*. Obtido em 06 de Maio de 2011, de <http://www.hidrografico.pt/boias-ondografo.php>
- Neelamani, S. (2009). Influence of Thereshold Value on Peak over Threshold Method on the Predicted Extreme Significant Wave Heights in Kuwaiti Territorial Waters. *Journal of Coastal Research, Special Issue 56*, (p. 564 a 568).
- Reeve, D., Chadwick, A., and Fleming, C. (2004). *Coastal Engineering Processes, Theory and Design Praticce*. New York: Spon Press.
- ROM 0.3-91 (1992). *Oleaje. Anejo I. Clima Marítimo en el Litoral Español*. MOPT.
- Sterl, A., and Caires, S. (2004). Climatology, Variability and Extrema of Ocean Waves -The Web-based KNMI/ERA-40 Wave Atlas. *International Journal of Climatology*.
- US Army Corps of Engineers (2008). Coastal Engineering Manual (CEM). In L. Harris, R. Reid, Z. Demirebilek, & H. Butler, *Parte II, Capítulo II*. Edição On line.