

CARACTERIZAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA AO LARGO DE MAPUTO.

C. B. Guiloviça¹, T. C. A. Oliveira², J. Palalane¹, M. Grifoll²,
J. Gomez², Espino, M.²

¹Departamento de Engenharia Civil (DEC), Universidade Eduardo Mondlane (UEM), Av. Moçambique, Km 1.5, Maputo, e-mail: yada_guilov@hotmail.com, jpalalane@gmail.com

²Laboratori d'Enginyeria Marítima (LIM), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), c/Jordi Girona 1-3, Campus Nord ed. D1, 08034 Barcelona, e-mail: tiago.oliveira@upc.edu

RESUMO

O objectivo deste trabalho é fazer a caracterização da agitação marítima ao largo de Maputo. Na ausência de dados de bóias e dados visuais que permitissem executar uma caracterização da agitação a longo prazo optou-se pela utilização de dados numéricos de retro-análise. Utilizaram-se resultados das predições oceânicas de escala global da NOAA/NWS/NCEP (National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, National Center for Environmental Prediction, as três dos Estados Unidos da América) que tem como base o modelo numérico WAVEWATCH III (Tolman, 2002) que utiliza dados do NCEP para definir as condições de fronteira para o modelo.

Efectuou-se uma análise a longo prazo tanto do clima médio como extremo e estudaram-se quais as funções de distribuição de probabilidade para análise extrema (Lognormal, Exponencial, Weibull, Gumbel e Frechet) melhor se adaptam ao clima marítimo da região.

Os resultados serão apresentados com o objectivo de compreender que condições de agitação marítimas devem ser utilizadas no dimensionamento de estruturas (para diferentes períodos de retorno) bem como para estudos relacionados com transporte de sedimentos.

1 INTRODUÇÃO

O bom conhecimento das condições de agitação e hidrodinâmica marítima que atuam sobre uma estrutura de proteção costeira ou portuária são fundamentais para o seu correto dimensionamento tanto do ponto de vista de estabilidade como de funcionalidade. Parâmetros estatísticos e espectrais de altura, período e direção de onda, são necessários para as diferentes fases de uma obra marítima; estudo prévio, projeto, construção e exploração.

A zona costeira de Maputo assume um papel importante na economia da região e de Moçambique devido à sua demografia, atividade portuária, valor ambiental e interesse lúdico-turístico embora nos últimos anos tenha-se verificado nesta zona a degradação de algumas das estruturas marítimas com os consequentes impactos económicos, ambientais e sociais.

Este trabalho tem como principal objectivo caracterizar o clima de agitação marítima ao largo da baía de Maputo, com base em dados de agitação e hidrodinâmicos disponíveis (altura, período e direção das ondas).

Para alcançar este objectivo, identificaram-se os seguintes objectivos específicos: Identificar os dados de agitação marítima disponíveis para a baía de Maputo;

- Analisar a distribuição da frequência de ocorrência dos parâmetros altura, período e direção das ondas;
- Analisar as estações do ano a considerar para a zona em estudo (mais energética e menos energética);
- Caracterizar o clima médio (importante para a funcionalidade de estruturas marítimas) e o clima extremo (fundamental para a estabilidade de estruturas marítimas).

Para atingir os objetivos propostos utilizou-se a seguinte metodologia:

- Análise de bibliografias sobre a caracterização da agitação marítima, de estudos e projetos efectuados e implementados em Maputo. Neste último caso, recorrendo à entidades como o Conselho Municipal da Cidade de Maputo e Porto de Maputo.

- Levantamento de fontes de dados de agitação marítima para a baía de Maputo, recorrendo a: entidades locais ligadas à área marítima, como é o caso do INAHINA e da MPDC, a fóruns ligados à engenharia costeira e portuária e ao sítio do NOAA;
- Análise dos dados de ondulação disponíveis para a baía de Maputo, procedentes do modelo numérico NWW3, correspondentes ao período de 1998 à 2010. Esta análise compreende o estudo: do clima médio com o auxílio do programa Matlab que permite, de forma rápida e concisa, a análise estatística e probabilística dos dados existentes; e do clima extremo, com auxílio do programa AnaTorBo para a seleção dos temporais, ou seja, da amostra que será usada na caracterização extrema e, finalmente, do programa Estones que permite a extrapolação dos dados existentes para diferentes períodos de retorno;
- Análise crítica e conclusiva dos resultados obtidos na pesquisa, através da comparação dos mesmos e dos respectivos métodos empregues na sua obtenção com aquilo que é a prática corrente, referindo-se aqui às bibliografias usadas e a informação obtida de projetos implementados em Maputo.

A estrutura do trabalho aqui apresentado é a seguinte; no capítulo 2 faz-se uma descrição das fontes de dados existentes de agitação marítima ao largo de Maputo, no capítulo 3 faz-se uma breve descrição do modelo NMM3, os capítulos 4 e 5 dedicam-se à caracterização do clima médio e extremo e no capítulo 6 apresentam-se as conclusões.

Informação mais detalhada acerca do trabalho aqui apresentado bem como as bases teóricas do mesmo podem ser obtidas em Guilviça 2011.

2 FONTES DE DADOS DE AGITAÇÃO MARÍTIMA AO LARGO DE MAPUTO

Para o estudo das condições de agitação marítima ao largo da Baía de Maputo recorreu-se às diversas entidades locais que pudessem dispor de dados de agitação, como é o caso do INAHINA (Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação) e INAMAR (Instituto Nacional da Marinha). Após a pesquisa nas instituições citadas, constatou-se que o Estado Moçambicano não possui bóias ondógrafo perto da Baía de Maputo. No entanto, foi possível constatar que o INAHINA auxilia na leitura e gestão de duas bóias ondógrafo, pertencentes ao projeto ARGOS, que se encontram posicionadas em Inhambane e Cabo Delgado, mais concretamente, em Pemba.

Efetou-se uma pesquisa de dados em fóruns ligados à Engenharia Marítima e tomou-se conhecimento que:

- O Centro Europeu de Previsão de Tempo a Médio Prazo (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) possui um produto denominado ERA-40 que faz uma reanálise global das condições atmosféricas e oceanográficas, incluindo condições de agitação (altura de onda significativa, período, direção, entre outros), com dados entre 1957 e 2001;

- Existem registos de dados visuais de ondas e ventos num farol próximo a ilha de Moçambique;

- No Porto de Durban (África do Sul) existem bóias cujos dados, que são geridos pelo Conselho de Pesquisa Científica e Industrial (Council for Scientific and Industrial Research-CSIR), podem ser usados para o sul de Moçambique;

- Existe o NOAA Wave Watch III program (NWW3) que gera um conjunto de dados globais de ondas, que resultam duma retro-análise e que cobrem África num período de 1997 a 2010, de 3 em 3 horas e com uma resolução de 1.25° de longitude x 1.0° de latitude.

Após a pesquisa efectuada, optou-se pelo uso neste estudo dos dados procedentes do modelo numérico NWW3, por serem gratuitos, o que não acontece com os dados do projeto ARGOS e, pelo acesso direto através da internet, diferentemente dos dados das bóias de Durban e do ERA-40, que acarretam um processo moroso para a sua aquisição.

3 MODELO NWW3

As previsões de ondas oceânicas do National Oceanographic and Atmospheric Administration/ National Centers for Environmental Prediction (NOAA/NCEP) baseiam-se na versão 2.22 do modelo Wave Watch III, tendo como parâmetros de entrada os produtos do NCEP.

O modelo NWW3 corre quatro vezes ao dia. Cada execução começa com 6 horas de reanálise para assegurar a continuidade da ondulação. Na tabela 1, encontra-se informação adicional sobre o modelo.

As quatro fases correspondem, respectivamente, à: fase global, fase de propagação da onda mais longa, fase de refacção e, fase do termo fonte mínimo.

Tabela 1 Informação adicional sobre o modelo NWW3

| Modelo | Tipo | Cobertura e Resolução (long., lat.) | Profundidade Mínima (m) | Fases (s) |
|---------------|-------------|--|------------------------------------|-----------------------------|
| NWW3 | global | 77°S - 77°N 1.25°x 1.0° | 25 | 3600 1300 3600 300 |

Os parâmetros de entrada considerados por este modelo são:

- Ventos do Projeto de Assimilação de Dados Globais (Global Data Assimilation Scheme- GDAS) e o ciclo de aviação do modelo de Previsão de Médio Alcance. Este sistema de previsão ou análise é, agora, denominado por Sistema de Previsão Global (Global Forecast System- GFS). Os ventos são convertidos para 10m de altura, assumindo estabilidade neutra. Os campos de vento estão disponíveis em intervalos de 3h (usando análises e previsões de 3h na parte de reanálise de execução do modelo de ondulação);
- Concentrações de gelo obtidas da análise da concentração de microondas passivas do gelo do mar e são atualizadas diariamente;
- Temperaturas da superfície do mar, conforme necessário na correcção da estabilidade para o crescimento de onda, retiradas do GDAS.

Os parâmetros de saída do modelo são:

- Mapas de alturas de onda significativas, períodos de pico e velocidades do vento;
- Termos de origem e espectrais apresentados para locais de saída seleccionados em forma de gráficos polares;
- Ficheiros GRIB que dispõem de parâmetros médios de onda;
- Dados espectrais comprimidos em ficheiros ASCII, que contêm dados ambientais e o espectro completo bi-dimensional;
- Boletins espectrais.

O NWW3 é considerado o estado-de-arte em simulações operacionais de ondas geradas pelo vento em águas profundas. Entre os processos físicos, estão as iterações não-lineares quádruplas, necessárias para descrever apropriadamente a evolução do espectro em águas com profundidade acima de 100 m. Uma descrição completa sobre o modelo pode ser obtida em Tolman (2002).

O modelo dá resultados para todo o mundo. O domínio é representado por uma malha com espaçamento de 1.25° x 1.00° (aproximadamente 138.75km x 111km) de longitude e latitude, respectivamente. Sendo assim, descarregou-se o ficheiro de dados globais, no computador, e usou-se o programa National Digital Forecast Database GRIB (NDFD GRIB) que permitiu tirar os resultados do ponto mais próximo ao ponto indicado (de interesse).

Sendo assim, na Figura 1, apresenta-se a localização do ponto indicado e do ponto da malha (o mais próximo ao indicado). As coordenadas do ponto indicado são: 28.75° de longitude e -26° de latitude e, o ponto mais próximo encontra-se na malha 233 do GRIB Identification.

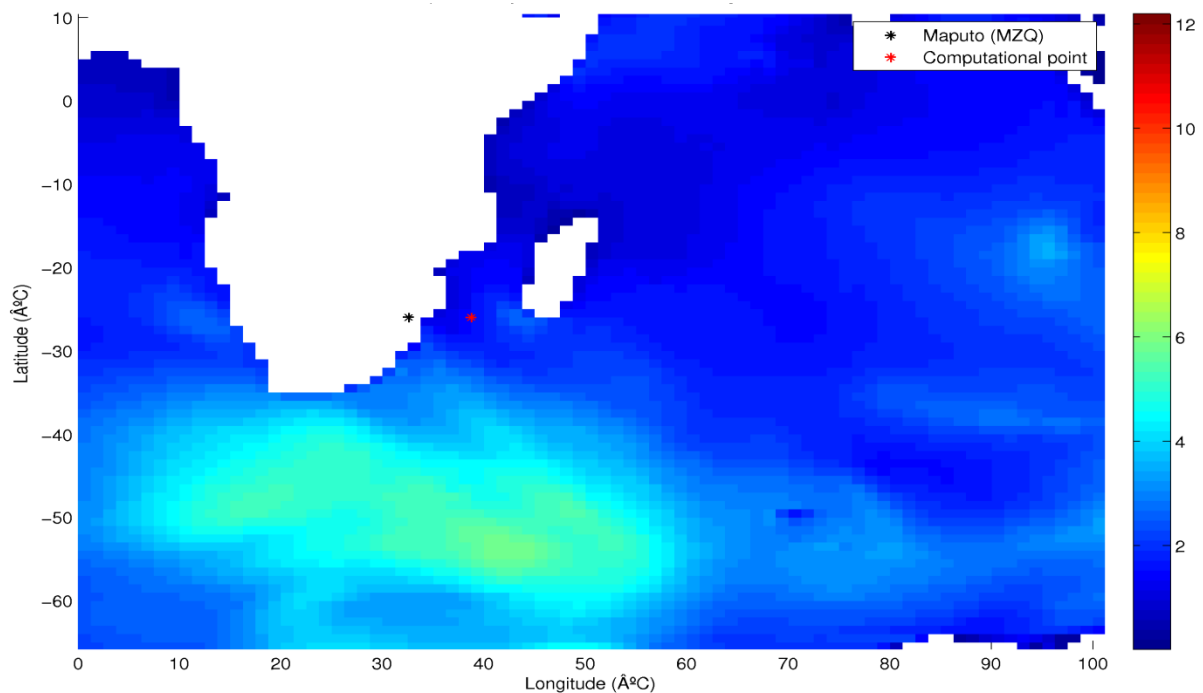


Figura 1 Localização do ponto do modelo usado no estudo.

4 CLIMA MÉDIO

A análise do clima médio correspondeu ao estudo estatístico e probabilístico, com base nos dados existentes. Esta análise foi feita com o auxílio de programas simples, elaborados em Matlab (usando os ficheiros no formato txt para a saída dos resultados) e os resultados foram processados com o uso da folha do Microsoft Excel.

Primeiro, procurou-se verificar se existia uma certa tendência, nos dados, para existência dum verão marítimo (meses menos energéticos) e de um inverno marítimo (meses mais energéticos) e se estes coincidiam com as correspondentes estações do ano. Da análise geral dos dados da amostra, verificou-se que:

- As alturas significativas média e máxima são 2.47m e 7.07m, respectivamente;
- Os períodos de pico médio e máximo são, respectivamente, 10.3s e 19.5s;
- A direção média é de 171.02°, notando-se a predominância de ondas vindas de sul (entre 100° e 225°N).

Da análise resultaram as médias mensais e as médias dos máximos mensais de H_s para o período de 1998-2010, como se pode observar na Figura 2 e na Tabela 2.

É possível observar que há uma certa tendência entre os meses de Abril e Outubro para se verificarem maiores alturas de onda significativas. Pelo que, pode-se assumir que nesta região, existe uma estação mais energética, que coincide com o inverno (Abril-Setembro), a qual se pode designar por inverno marítimo e, uma menos energética (Outubro-Março) que corresponde ao verão.

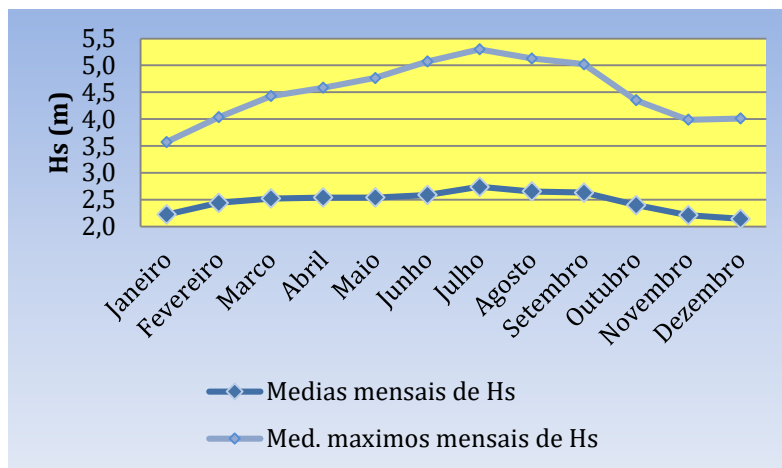
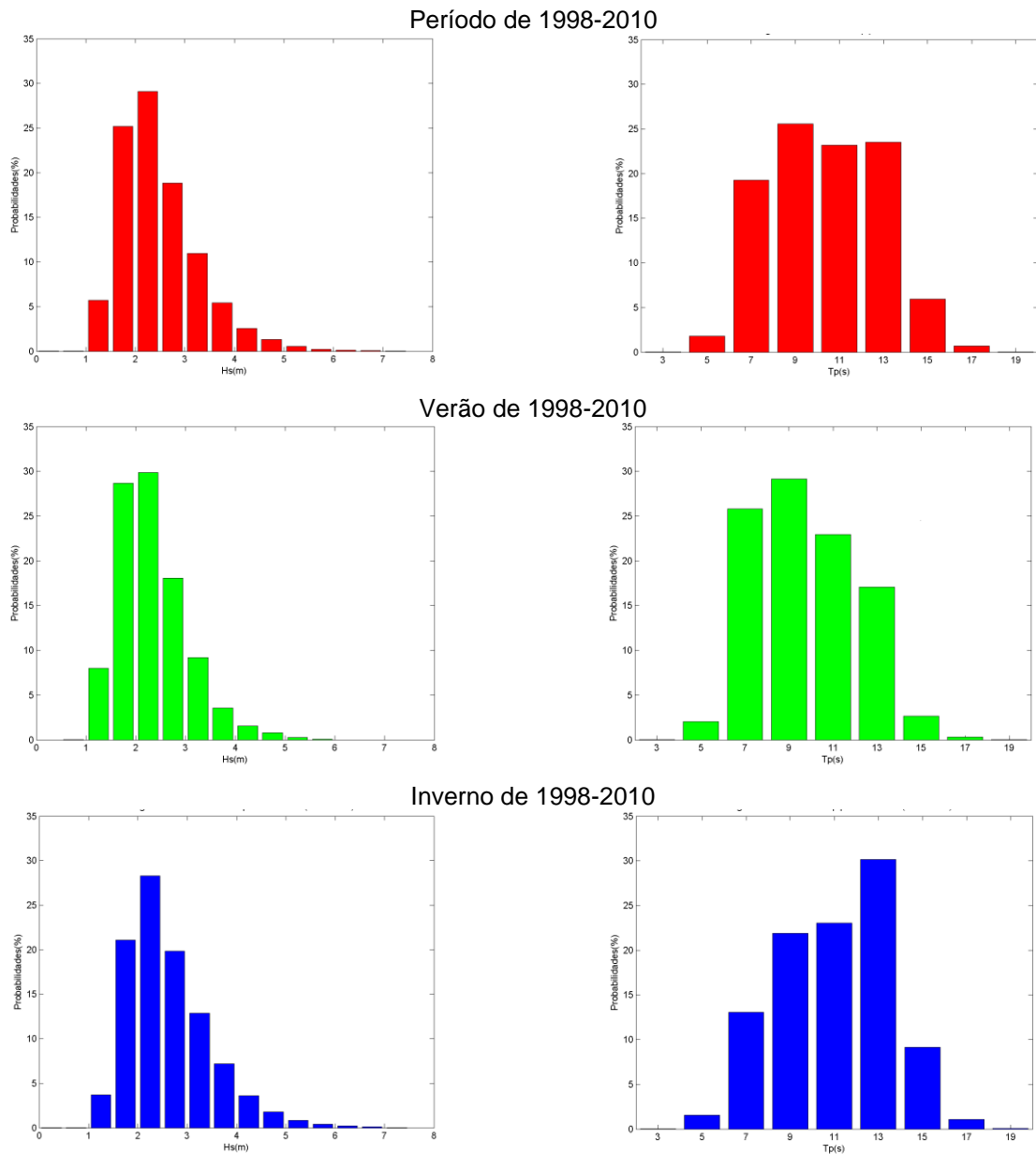


Figura 2 Gráficos das médias mensais de H_s e médias dos máximos mensais de H_s (1998-2010).

Tabela 2 Médias mensais de H_s e médias dos máximos mensais de H_s (1998-2010)

| Mês | Méd. H_s (m) | Méd. Máxs H_s (m) |
|--------------|----------------|---------------------|
| Janeiro | 2.22 | 3.58 |
| Fevereiro | 2.44 | 4.03 |
| Março | 2.52 | 4.42 |
| Abril | 2.54 | 4.58 |
| Maio | 2.54 | 4.77 |
| Junho | 2.59 | 5.07 |
| Julho | 2.74 | 5.30 |
| Agosto | 2.65 | 5.13 |
| Setembro | 2.63 | 5.02 |
| Outubro | 2.40 | 4.35 |
| Novembro | 2.21 | 3.99 |
| Dezembro | 2.14 | 4.01 |
| Média | 2.469 | 4.52 |

Na figura 3 apresentam-se os histogramas de distribuição de H_s e T_p para todos os dados e para os dados correspondentes ao verão e inverno marítimo. Como se pode ver na figura 3, analisando todo o período da amostra, no que diz respeito à altura significativa verifica-se maior probabilidade de ocorrência de ondas com $H_s =]2 - 2.5]m$, correspondendo à 30% e que há 75% de ondas com $H_s =]1.5 - 3]m$; quanto aos períodos de pico, 26% das ondas têm $T_p =]8 - 10]s$ e 73% possuem probabilidade de ocorrência com $T_p =]8 - 14]s$.



a) b)
 Figura 3 Histogramas de distribuição de H_s (a) e T_p (b).

Nos histogramas apresentados, de acordo com as estações do ano, constata-se que no Inverno há maior probabilidade de encontrar maiores alturas de onda significativas, $H_s > 2.5m$ do que no Verão. Nota-se, também, que no Verão as ondas apresentam menores períodos de pico, havendo maior probabilidade de ocorrerem ondas com $T_p =]8 - 10]s$, o que não acontece no Inverno, em que há maior tendência para a ocorrência de ondas com $T_p > 10s$.

Na figura 4 apresentam-se as rosas de ondulação para os períodos de 1998-2010, verão e inverno do mesmo período.

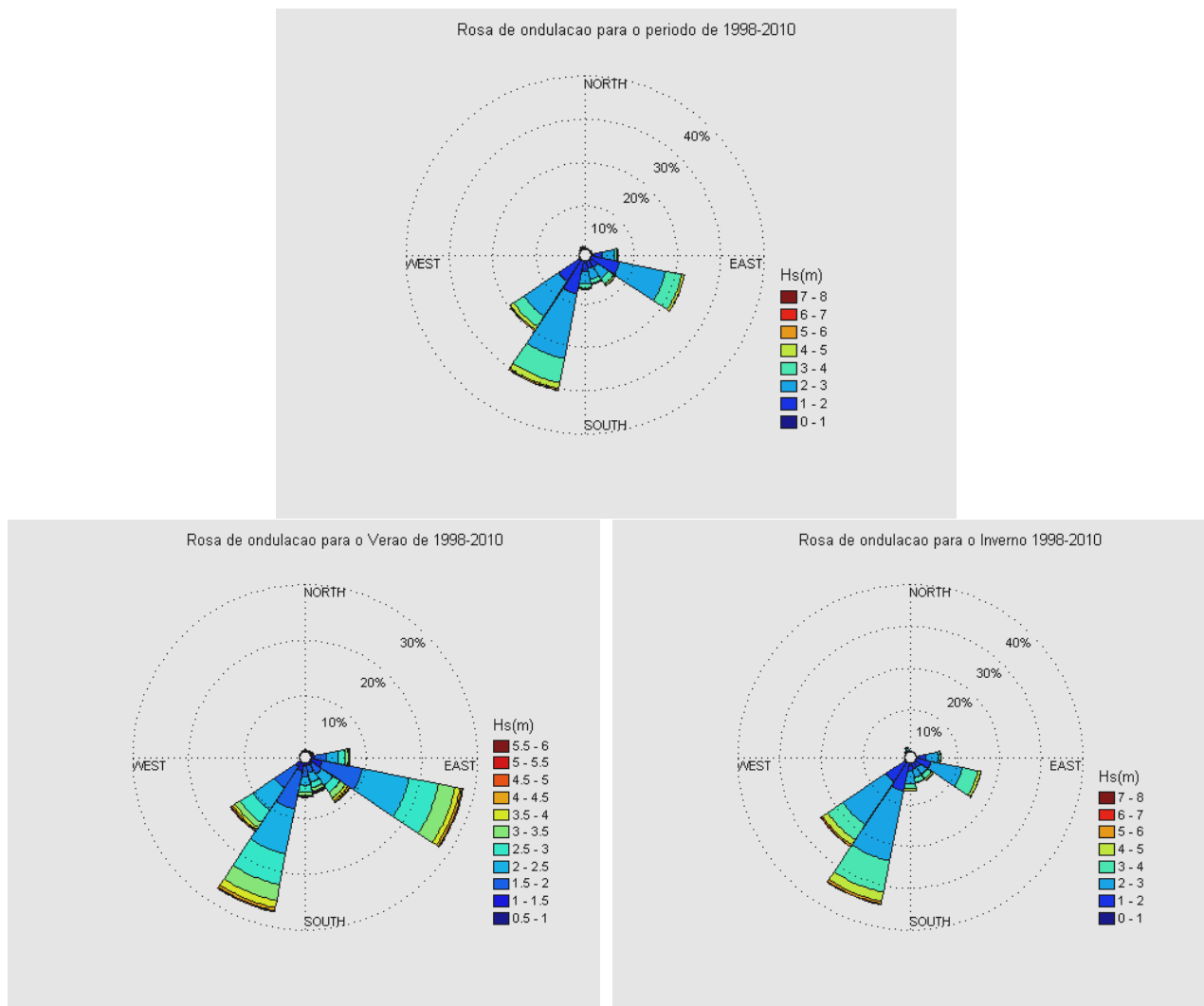


Figura 4 Rosas de ondulação para os períodos de: 1998-2010, verão e inverno do mesmo período, respectivamente

No período de 1998-2010, verifica-se maior probabilidade (cerca de 30%) de ocorrência de ondas provenientes do Sul-Sudoeste, com aproximadamente 200°N e, com predominância de alturas significativas entre 2 a 3m. Verifica-se, também, a incidência de ondas vindas do Este-Sudeste, com cerca de 110°N e, probabilidade de ocorrência de 22% possuindo, na sua maioria, alturas significativas compreendidas entre 2 a 3m.

O verão é caracterizado por uma maior incidência de ondas provenientes do Sudeste (aproximadamente 110°N) em relação ao Inverno. As ondas vindas do Este-Sudeste correspondem a, aproximadamente, 28%. Verificam-se, também, ondas do Sul-Sudoeste (cerca de 200°N) com 27% de ocorrência. Em ambas direcções, a maioria das ondas verificadas, possui $H_s =]1.5-2.5]$ m.

No inverno as ondas registadas são predominantemente do Sul-Sudoeste e Sudoeste, correspondendo a, aproximadamente, 60%. Nota-se maior incidência (cerca de 30%) de ondas com alturas significativas entre 2 a 3 m.

Na tabela 3 apresenta-se a tabela de contingência ($T_p - H_s$) para os períodos de 1998-2010 e, verão e inverno do mesmo período.

Tabela 3 Tabela de contingência $T_p - H_s$ para o períodos de 1998-2010.

| Anos 1998-2010 | | $T_p(s)$ | | | | | | | | |
|----------------|-----------|----------|---------|--------|----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| | | [2- 4] | [4 - 6] | [6- 8] | [8 - 10] | [10- 12] | [12 - 14] | [14 - 16] | [16- 18] | [18 - 20] |
| $H_s(m)$ | [0 - 0.5] | 0.000 | 0.005 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| | [0.5 - 1] | 0.003 | 0.018 | 0.000 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| | [1 - 1.5] | 0.008 | 0.208 | 1.559 | 1.777 | 1.564 | 0.574 | 0.026 | 0.000 | 0.000 |
| | [1.5 - 2] | 0.003 | 0.761 | 5.950 | 0.026 | 7.200 | 4.634 | 0.742 | 0.084 | 0.011 |
| | [2 - 2.5] | 0.000 | 0.653 | 6.266 | 6.458 | 6.479 | 7.632 | 1.490 | 0.137 | 0.024 |
| | [2.5 - 3] | 0.000 | 0.116 | 3.420 | 4.939 | 3.617 | 5.018 | 1.524 | 0.190 | 0.003 |
| | [3 - 3.5] | 0.000 | 0.008 | 1.569 | 3.599 | 2.082 | 2.683 | 0.869 | 0.132 | 0.005 |
| | [3.5 - 4] | 0.000 | 0.000 | 0.387 | 1.745 | 1.156 | 1.509 | 0.563 | 0.055 | 0.000 |
| | [4 - 4.5] | 0.000 | 0.000 | 0.097 | 0.861 | 0.542 | 0.703 | 0.313 | 0.037 | 0.000 |
| | [4.5 - 5] | 0.000 | 0.000 | 0.024 | 0.316 | 0.332 | 0.369 | 0.224 | 0.026 | 0.000 |
| | [5 - 5.5] | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.097 | 0.126 | 0.203 | 0.068 | 0.032 | 0.000 |
| | [5.5 - 6] | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.045 | 0.108 | 0.055 | 0.008 | 0.003 |
| | [6 - 6.5] | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.016 | 0.055 | 0.024 | 0.013 | 0.000 |
| | [6.5 - 7] | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.011 | 0.029 | 0.021 | 0.000 | 0.000 |
| [7 - 7.5] | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.005 | 0.000 | 0.000 | |

Como se pode observar na tabela 3, de forma geral, períodos de pico maiores correspondem a maiores alturas de onda significativas e períodos de pico menores verificam-se, predominantemente, em ondas com alturas significativas menores. Além disso, pode-se constatar que há maior probabilidade de ocorrência, cerca de 7.6%, de ondas com $H_s=$ [2 - 2.5]m e $T_p=$ [12 - 14] s e, também, de ondas com $H_s=$ [1.5 - 2]m e $T_p=$ [10 - 12]s, que correspondem a uma probabilidade de 7.2%.

No verão há maior ocorrência de ondas com $H_s=$ [1.5 - 2.5]m e $T_p=$ [6 - 8]s, o que corresponde à uma probabilidade de 19%.

O inverno é marcado pela maior ocorrência de ondas com $H_s=$ [2 - 2.5]m e $T_p=$ [12 - 14]s (maiores períodos de pico), sendo que as ondas com estas características ocorrem com uma probabilidade de 9.5%.

A análise por estação comprova o exposto no parágrafo referente à análise global dos dados, o que permite afirmar que a estação menos energética (verão) corresponde à menores valores de alturas de onda significativas e de períodos de pico e, a mais energética (inverno) está associada à maiores valores de alturas de onda significativas e de períodos de pico.

5 CLIMA EXTREMO

A análise do clima extremo consistiu, basicamente, em três etapas:

1) Identificar os temporais, tendo-se obtido, entre outros, os seguintes parâmetros:

- número de temporais existentes na amostra (1998-2010);
- duração média dos temporais;
- altura de onda significativa média de cada temporal;
- período de pico médio de cada temporal;
- altura de onda significativa máxima de cada temporal;
- direção média de cada temporal.

2) Identificar os máximos independentes, que depende da duração mínima entre cada temporal;

3) Procurar a função de distribuição de probabilidades que melhor se ajustava à série de alturas de onda significativas máximas dos temporais independentes.

Nas primeiras duas etapas, que correspondem à seleção da amostra (dos extremos) ou análise dos dados disponíveis, recorreu-se ao programa AnaTorBo. A última etapa, que consiste na análise extrema (ou extrapolação), fez-se com auxílio do programa Estones.

Com os temporais encontrados através do programa AnaTorBo fez-se uma breve análise do número de temporais verificados em cada ano da amostra, do número de temporais verificados em cada mês da amostra e das durações: mínima, média e máxima dos temporais.

O programa AnaTorBo é um programa para a análise de temporais, desenvolvido no LIM/UPC, por Jesús Gómez, entre os anos de 1999 e 2004. Para selecionar um temporal, o programa emprega os seguintes critérios (Herrerias 2002):

Altura mínima significativa: é o valor a partir do qual se considera que existe um temporal e que neste estudo se fixou como 4m, que corresponde à aproximadamente duas vezes a altura média.

Intervalo de tempo máximo sem dados (horas): este valor se usa para que a análise do temporal se possa fazer embora falte algum dado. O intervalo indica a duração máxima dum período sem dados, para se considerar que o temporal não tenha acabado, isto é, se o número de horas durante as quais não há dados na série é estritamente maior que este limite, considera-se que o temporal termina antes da falha de dados. Caso contrário, considera-se que é o mesmo temporal. Nesta trabalho, considerou-se um intervalo máximo sem dados de 6 horas, apesar da série não apresentar falhas, visto que é resultado de simulação numérica.

Intervalo de tempo máximo abaixo da altura de onda limite (horas): num temporal, nem todas as ondas são iguais, nem todas superam a altura limite estabelecida. Existe um intervalo de tempo em que o valor da altura de onda da série está abaixo da altura limite que define o temporal, isso não significa que o temporal tenha acabado desde que, logo, a altura de onda volte a superar o limite. O uso deste parâmetro pode tornar possível que a altura de onda média do temporal seja inferior à altura de onda limite. No presente trabalho, considerou-se um intervalo máximo de 6 horas. Quer dizer, se durante 6 horas ou menos a altura de onda da série é inferior à altura de limite, o temporal não se considerava finalizado.

Duração mínima do temporal (horas): só se têm em conta os temporais com uma duração maior ou igual à um valor limite, que se considerou de 6 horas. Todo o temporal cuja a duração fosse inferior à este valor não se considerou na análise.

Intervalo entre temporais (dias): este item é útil na extração dos máximos independentes, para a análise do clima extremo. Nesta tese, considerou-se o intervalo de 7 dias (duração máxima, encontrada na série de temporais majorada). Para a seleção dos máximos independentes fez-se uma análise de sensibilidade considerando, também, os intervalos entre temporais de 4 e 10 dias e, como foi referido, para prosseguir com a análise extrema, optou-se pelo valor de 7 dias, pois para além da razão referida, é um valor intermédio e encontrou-se um número intermédio de extremos.

Com o auxílio do programa AnaTorBo, usando os dados de 1998-2010 e, considerando uma $H_{s\text{limite}}=4\text{m}$, encontraram-se 183 temporais, cuja a duração média é de 1,228 dias (aproximadamente 29 horas).

Através de uma análise da série de temporais encontrada, verificou-se que:

- A duração mínima é de 0.269 dias e corresponde ao temporal ocorrido em Setembro de 1998, entre os dias 19 e 20;
- A duração máxima é de 5.159 dias e corresponde ao temporal ocorrido entre 26/06 e 1/07 de 2009;
- Resumidamente, os temporais podem ser descritos pelos valores de $H_{s\text{méd}}$, $H_{s\text{máx}}$, $T_{\text{pméd}}$ e $T_{\text{pmáx}}$, de acordo com as direções principais (Este-Sudeste, Sul-Sudoeste e Sudoeste) e para todas as direcções, conforme se apresenta na Tabela 4.

Tabela 4 Principais características dos temporais de 1998-2010, para $H_{slimite}=4m$

| Direção | $H_{sméd}$ (m) | $H_{smáx}$ (m) | $T_{pméd}$ (s) | $T_{pmáx}$ (s) |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Este-Sudeste | 4.33 | 5.22 | 9.08 | 10.90 |
| Sul-Sudoeste | 4.56 | 7.07 | 12.91 | 17.30 |
| Sudoeste | 4.48 | 6.55 | 12.67 | 18.00 |
| Todas | 4.48 | 7.07 | 14.55 | 18.00 |

Na figura 5 é apresentada em forma de diagramas de barras, os temporais verificados em cada ano e na figura 6 e os temporais verificados em cada mês.

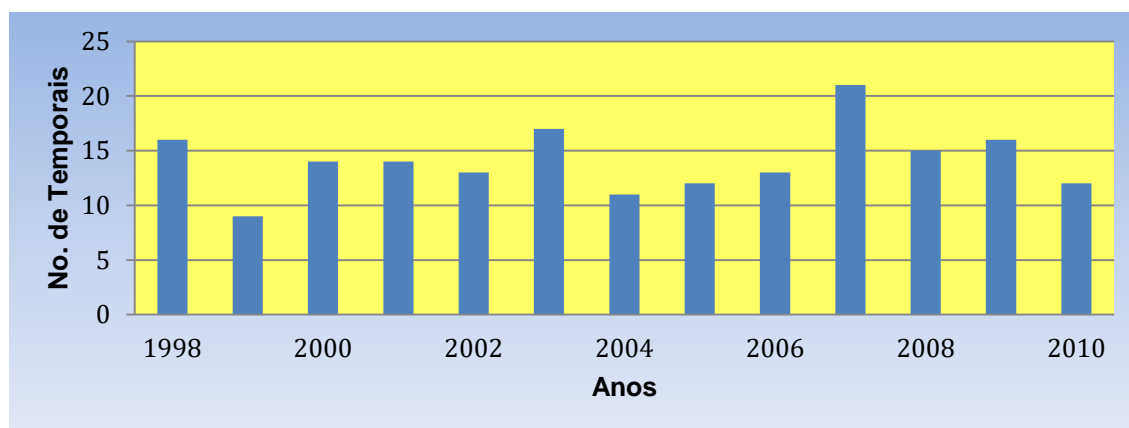


Figura 5 Temporais verificados em cada ano da amostra.

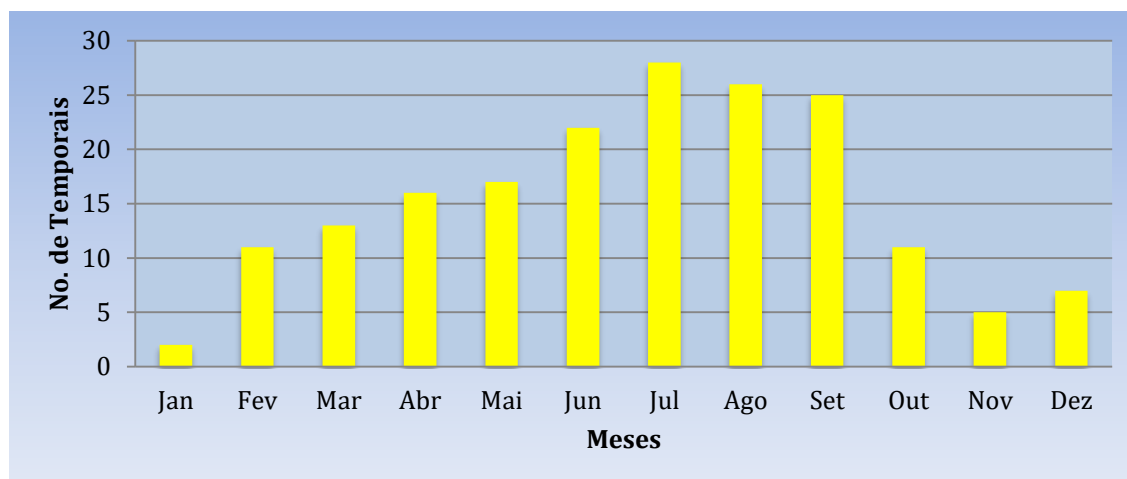


Figura 6 Temporais verificados em cada mês da amostra.

É possível constatar que há um certo equilíbrio, no que diz respeito ao número de temporais verificados por ano (aproximadamente 14), verificando-se anos de pico, como é o caso de 2007 e com cerca de 21 temporais.

Analisando a figura 6, verifica-se que os meses correspondentes aos meses de inverno (Abril a Setembro) apresentam maior ocorrência de temporais, correspondendo a cerca de 73%, ou seja, 134 temporais ocorreram nos meses de inverno.

Tendo em conta os critérios e as considerações citadas anteriormente, obtiveram-se 150 temporais independentes.

O programa Estones é um programa para a extrapolação do clima extremo desenvolvido no LIM/UPC (Vergés 1995). O programa Estones tem várias possibilidades, no que diz respeito à: funções de distribuição, métodos de ajuste, plotting position e intervalo de confiança. Em primeiro lugar, introduz-se o tipo de função de distribuição a usar, que pode ser a de Weibull, Gumbel ou Frechet entre outras. Há que ajustar os parâmetros das funções e para isso o programa dá a opção de ajustar o valor de algum dos parâmetros ou de não fixar nenhum e deixar que o programa optimize os 2 ou 3 parâmetros existentes, segundo a função. A opção usada neste trabalho foi a última. Quanto ao método de ajuste, escolhe-se entre o método dos momentos, máxima verosimilhança e mínimos quadrados.

Com as funções de distribuição, pode-se atribuir um período de retorno à uma dada altura de onda e vice-versa. Assim, há que introduzir, no programa, os períodos de retorno para os quais se deseja estimar a altura de onda associada e, as alturas de onda para as quais se deseja o período de retorno. No primeiro caso, os períodos (em anos) para os quais fez-se a extrapolação foram : 5, 7, 10, 15, 25, 50, 100, 200 e 500 (apesar de se exceder os 3 vezes o período da amostra, que é o limite para que os valores se podem considerar válidos). Tanto para as alturas de onda, como para o período de retorno especifica-se a confiança desejada para o intervalo de confiança. A confiança utilizada foi de 90%, que é a usual nesta área. Também se escolhe o método para obter o intervalo de confiança, dando a possibilidade de não procurar neste intervalo.

Quanto aos dados da amostra, o programa necessita da seguinte informação:

- O número de dados da série de temporais (para $H_{s\text{limite}} = 4\text{m}$ e $H_{s\text{limite}} = 4.5\text{m}$);
- A duração do registo (em anos), descontando o período sem dados;
- As alturas de onda limite definidas;
- Os máximos independentes extraídos dos temporais para cada altura limite.

O critério de bondade de ajuste que o programa usa é o de Kolmogorov-Smirnov, com o qual se comparam os diferentes ajustes e permite escolher entre eles. Tem que se introduzir, no programa, o nível de significância desejado. Por último, tem que se completar uma informação complementar, no caso de efetuarem-se os ajustes pelo método dos mínimos quadrados, escolhe-se qual a expressão a usar. Primeiro se escolhe o tipo de correlação desejada. Nesta tese, fez-se para todas as expressões. Executado o programa Estones, criam-se três ficheiros de resultados.

No primeiro ficheiro armazenam-se alguns resultados numéricos, como: alturas de onda tratadas, a média e o desvio padrão dos dados. Também se encontra, neste ficheiro, uma série de dados sobre o teste de bondade do ajuste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) como: a máxima diferença entre a função de distribuição real e o histograma empírico; a significância limite, tal que se o teste se faz com uma significância menor se aceita e se é maior se rejeita, ou seja, a máxima significância para a qual se aceita o ajuste; e por último, a verosimilhança do teste. No caso em que se rejeita o ajuste, escrevem-se os dados que causam esta rejeição. Quando se ajusta mediante os mínimos quadrados, escreve-se, também, o coeficiente de correlação.

Outros dados que se armazenam, neste ficheiro, são os parâmetros das distribuições que o programa ajustou, otimizando os 2 ou 3 parâmetros, segundo o caso.

O ficheiro também possui as estimativas das alturas de onda para os períodos de retorno dados, as estimativas dos períodos para as alturas de onda dadas e por último, apresenta alguns resultados numéricos dos intervalos de confiança.

O segundo ficheiro de resultados contém a informação do gráfico com os valores das alturas de onda e dos períodos de retorno da função empírica, das funções de distribuição, das observações e dos intervalos designados pelo teste K-S, tanto o superior como o inferior, neste caso com uma significância de 10%, assim como os intervalos de confiança para as alturas de onda, neste caso com a significância de 90%.

No terceiro e último ficheiro, encontram-se os intervalos de confiança para os períodos de retorno.

Nas tabelas 5 e 6 apresentam-se os parâmetros que serviram para a seleção das FDP's que melhor se ajustam às séries (para $H_{s\text{limite}} = 4\text{m}$ e $H_{s\text{limite}} = 4.5\text{m}$ e, intervalo mínimo entre temporais de 7 dias).

Tabela 5 Principais parâmetros obtidos nos ajustes às F.D.P's para $H_{slimite}= 4m$

| F.D.P.'s | Métodos de Ajuste | Verossimilhança | Nível de Significância | Máxima Diferença | |
|----------|------------------------|--------------------|------------------------|------------------|-------|
| Gumbel | Momentos Amostrais | 9.715 | 0.232 | 0.070 | |
| | Máxima Verossimilhança | 9.922 | 0.240 | 0.069 | |
| | Mínimos Quadrados | Weibull | 7.502 | 0.160 | 0.078 |
| | | Gringorten | 9.546 | 0.226 | 0.070 |
| Frechet | Momentos Amostrais | - | - | - | |
| | Mínimos Quadrados | Weibull | 11.243 | 0.293 | 0.064 |
| | | Goda & Onozawa | - | - | - |
| Weibull | Momentos Amostrais | - | - | - | |
| | Máxima Verossimilhança | 14.636 | 0.531 | 0.046 | |
| | Mínimos Quadrados | Weibull | 14.659 | 0.675 | 0.036 |
| | | Petraukas & Aagard | 14.821 | 0.576 | 0.043 |
| | | Goda | 14.834 | 0.583 | 0.042 |

Tabela 6 Principais parâmetros obtidos nos ajustes às F.D.P's para $H_{slimite}= 4.5m$

| F.D.P.'s | Métodos de Ajuste | Verossimilhança | Nível de Significância | Máxima Diferença | |
|----------|------------------------|--------------------|------------------------|------------------|-------|
| Gumbel | Momentos Amostrais | 8.115 | 0.252 | 0.086 | |
| | Máxima Verossimilhança | 7.908 | 0.242 | 0.087 | |
| | Mínimos Quadrados | Weibull | 14.518 | 0.696 | 0.035 |
| | | Gringorten | 14.785 | 0.564 | 0.044 |
| Frechet | Momentos Amostrais | - | - | - | |
| | Mínimos Quadrados | Weibull | 14.725 | 0.549 | 0.045 |
| | | Goda & Onozawa | - | - | - |
| Weibull | Momentos Amostrais | - | - | - | |
| | Máxima Verossimilhança | 10.609 | 0.409 | 0.069 | |
| | Mínimos Quadrados | Weibull | 13.391 | 0.784 | 0.028 |
| | | Petraukas & Aagard | 14.334 | 0.716 | 0.033 |
| | | Goda | 14.321 | 0.717 | 0.033 |

Para a escolha do melhor ajuste, tiveram-se em conta os critérios de maior índice de verossimilhança, menor nível de significância e, menor valor de máxima diferença. Sendo assim, para $H_{slimite}=4m$ escolheu-se como melhor ajuste a função de Weibull, pelo método de mínimos quadrados, usando a expressão de Goda e, a função de Gumbel, pelo método de mínimos quadrados, usando a expressão de

Gringorten para $H_{slimite}=4.5m$ confirmando, deste modo, a teoria de Liu & Burchart (1999) que consideram as funções de Gumbel e de Weibull, como as que apresentam melhores ajustes.

Na tabela 7 apresenta-se, para cada $H_{slimite}$, os valores dos coeficientes para os ajustes escolhidos. Na tabela 8 e na figura 7 pode-se obter a correspondência entre os diversos períodos de retorno e as alturas de onda significativas.

Tabela 7 Coeficientes para as FDP's com melhores ajustes (para valores de H_s obtidos em cm)

| $H_{slimite}$ (m) | A | B | C |
|-------------------|---------|---------|-------|
| 4.0 | 391.986 | 103.616 | 1.361 |
| 4.5 | 448.080 | 0.0164 | - |

Tabela 8 Alturas significativas em função do período de retorno

| T_r (anos) | $H_{slimite}=4.0m$ | | | $H_{slimite}=4.5m$ | | |
|--------------|--------------------|-----------|--------------|--------------------|-----------|--------------|
| | $H_{sinf}(m)$ | H_s (m) | $H_{sup}(m)$ | $H_{sinf}(m)$ | H_s (m) | $H_{sup}(m)$ |
| 5 | 6.43 | 6.82 | 7.24 | 6.28 | 6.85 | 7.14 |
| 7 | 6.57 | 6.99 | 7.47 | 6.47 | 7.05 | 7.41 |
| 10 | 6.70 | 7.18 | 7.73 | 6.66 | 7.26 | 7.69 |
| 15 | 6.85 | 7.38 | 8.02 | 6.88 | 7.49 | 8.01 |
| 25 | 7.04 | 7.63 | 8.37 | 7.16 | 7.79 | 8.42 |
| 37 | 7.16 | 7.81 | 8.63 | 7.39 | 8.02 | 8.74 |
| 50 | 7.26 | 7.95 | 8.84 | 7.56 | 8.19 | 8.98 |
| 70 | 7.36 | 8.11 | 9.06 | 7.75 | 8.39 | 9.25 |
| 100 | 7.48 | 8.27 | 9.31 | 7.95 | 8.59 | 9.54 |
| 150 | 7.61 | 8.46 | 9.58 | 8.17 | 8.83 | 9.86 |
| 200 | 7.69 | 8.58 | 9.77 | 8.34 | 9.00 | 10.09 |
| 500 | 7.97 | 8.98 | 10.43 | 8.84 | 9.53 | 10.82 |

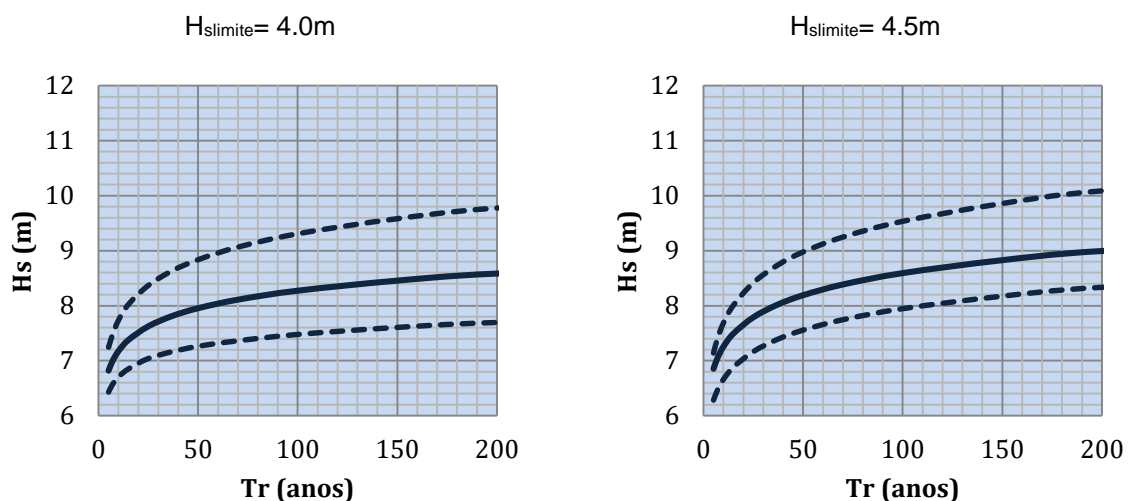


Figura 7 Representação gráfica de H_s (T_r).

Nos gráficos da figura 7, as linhas a tracejado representam as alturas significativas superior e inferior (H_{ssup} e H_{sinf} , respectivamente), que correspondem aos limites do intervalo de confiança de 90%. Então, considerando a altura limite de 4m, para um período de retorno de 10 anos, podem-se esperar ondas com alturas significativas entre 6.70m e 7.73m, com um nível de confiança de 90%.

A diferença nos resultados encontrados com cada altura limite não é facilmente perceptível, mas pode-se constatar que as alturas significativas estimadas para a altura limite de 4.5m são ligeiramente maiores que as encontradas para a altura limite de 4m.

CONCLUSÕES

As condições de agitação marítima ao largo da baía de Maputo são, até então, pouco conhecidas, o que se comprova pela carência de informação disponível quer em termos de dados de agitação, quer em termos de projetos de dimensionamento das estruturas costeiras existentes. Esta carência, de dados instrumentais e visuais, fez com que os dados dos modelos numéricos fossem o recurso mais acessível para o estudo em causa.

A análise dos dados do modelo NWW3 a médio prazo tornou evidente a existência de duas estações para o clima de agitação da região, nomeadamente: verão (a menos energética, corresponde aos meses entre Outubro e Março) e inverno (a mais energética, vai de Abril à Setembro). O verão é caracterizado pela ocorrência de menores alturas de onda significativas e menores períodos de pico, em relação ao inverno. Outra característica importante do verão é a maior incidência de ondas provenientes do Sudeste, o que não se verifica no inverno. Todavia, há que ter em consideração a predominância de ondas com alturas entre 1.5m e 3m e períodos de pico entre 8s e 14s. No que diz respeito às direções de pico, as ondas provêm, essencialmente, do Sudoeste e Sudeste.

O estudo dos temporais verificados na região, comprovam que o inverno é o período mais energético, sendo que a maior parte dos temporais verificaram-se nesse período. Fazendo-se uma análise aprofundada dos temporais, para a caracterização do clima extremo, com base nas formulações apresentadas no capítulo 2 deste trabalho, entre outras, constatou-se que a F.D.P. de Weibull é a que apresenta melhores ajustes para a série de dados da região em estudo, confirmando a teoria de Liu & Burchart (1999), apresentado no capítulo de revisão do estado de arte. No presente trabalho, considerou-se como melhor ajuste o de Weibull, usando o método de mínimos quadrados e a fórmula de Goda. Porém, há que tomar-se em consideração que o ajuste depende, entre outros factores, da série analisada e esta depende dos pressupostos, como é o caso da altura significativa limite e da duração mínima entre temporais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao “Collegi d’Enginyers de Camins, Canals i Ports – Catalunya” e ao “Centre de Cooperació per el Desenvolupament” (CCD) da “Universitat Politècnica de Catalunya” (UPC) o financiamento dado ao “Projeto de desenvolvimento do ensino e da investigação em Engenharia Portuária e Costeira na Universidade Eduardo Mondlane.” que permitiu a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Guiloviça, C. B. 2011 Caracterização da Agitação Marítima ao Largo da Baía de Maputo, Tese de licenciatura, Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane, Maputo.

Herreras, L. 2002 Estudio de los Parámetros que Caracterizan una Tormenta, Tese de Licenciatura, LIM – UPC, Barcelona;

Liu, Z., Burcharth, H.F. 1996 – Design Wave Height Related to Structure Lifetime, Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering, Orlando;

Tolman, H. L., 2002. "User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22." *NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 222*, 133 pp.

Vérges, D. 1995 – Análisis Extremal del Oleaje para el Diseño de Obras Marítimas, Tese de Especialidade, ETSECCPB - UPC, Barcelona