

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



**Correntes Superficiais na Zona Costeira ao largo de Sines:
variabilidade e forçamento**

Maria Pires Cadima

Mestrado em Ciências Geofísicas
Especialização em Oceanografia

Dissertação orientada por:
Dr. Joaquim Dias (MARE/DEGGE-FCUL)

2018

Agradecimentos

Ao Professor Joaquim Dias, pela grande ajuda e permanente disponibilidade prestadas.

À minha colega Marta Antunes por ter feito o trabalho que antecedeu esta tese.

A todos os outros professores e colegas que me tenham ajudado durante a realização do mestrado.

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos no âmbito do projeto de investigação “*RISE & SHINE-Recrutamento de invertebrados no intertidal rochoso: diferentes componentes, escalas e processos*” (PTDC/BIA-BEC/103734/2008); coordenado por Teresa Cruz (MARE/Universidade de Évora).

Resumo

O objetivo deste estudo era separar e quantificar as contribuições do vento e da maré para a corrente oceânica à superfície num local perto da costa, utilizando dados de corrente de um correntómetro eletromagnético S4 e dados de vento de um anemógrafo. Os dados foram recolhidos ao largo de Sines, sobre a plataforma continental interna, na costa ocidental de Portugal Continental, no Verão de 2012. Durante a maior parte do período de registo verificaram-se as condições oceanográficas típicas de Verão para este local: o vento soprou sobretudo de norte (“nortada”) e a corrente foi essencialmente de norte para sul. Utilizaram-se vários métodos no processamento dos dados. Começou por se realizar a análise harmónica dos dados de corrente, de modo a tentar estimar a fração da corrente que era forçada pela maré. Esta análise calculou uma corrente de maré com um período predominante diurno; a sua componente mais forte foi K1, com uma amplitude de 3.67 cm/s. Compararam-se os resultados desta análise com os resultados de um modelo numérico dinâmico da maré oceânica (TPXO). Os resultados deste modelo apresentaram várias diferenças em relação aos resultados da análise harmónica. A principal diferença foi que, no modelo TPXO, o período predominante foi semidiurno e a componente M2 foi a mais intensa (amplitude de 0.73 cm/s). Realizou-se também a análise por onduletas (*wavelets*) dos dados de corrente e do vento. Com base nos resultados obtidos, aplicou-se de novo a análise harmónica aos dados de corrente, agora para um intervalo de tempo mais curto em que o efeito expectável do vento sobre a corrente à superfície fosse mais fraco. Concluiu-se que a corrente, em particular a sua componente norte-sul, foi mais influenciada pelo vento do que pela maré. No entanto, chegou-se também à conclusão que os dados de corrente de maré obtidos com a análise harmónica estavam provavelmente contaminados pelo vento, ou seja, não foi possível separar a frequência do ciclo diurno do vento e a frequência da componente diurna principal da maré (K1). Isso poderá ter levado a que os resultados obtidos com a aplicação da análise harmónica tivessem sempre uma componente diurna maior do que aquela que seria esperada com base nos resultados do modelo TPXO. Finalmente, apresentaram-se algumas sugestões para a resolução deste problema em estudos futuros.

Palavras-chave: Oceanografia costeira; Correntes de maré; Correntes induzidas pelo vento

Abstract

The goal of this study was to separate and quantify the contributions of the wind and the tide for the oceanic surface current, at a location near the coast, using current data from an electromagnetic S4 current meter and wind data from an anemograph. The data were collected off the coast of Sines, over the inner continental shelf, in western mainland Portugal, during the summer of 2012. During most of the recorded period, the usual summertime oceanographic conditions in this location were observed: the wind blew mainly from North and the current flowed mainly from North to South. Several analysis methods were used to process the data. First, a harmonic analysis of the current data was carried out, to estimate the fraction of the current that was forced by the tides. This analysis computed a tidal current with a mainly diurnal period and its strongest component was K1, with an amplitude of 3.67 cm/s. These results were compared with the results of a dynamic numerical model of the oceanic tides (TPXO) with somewhat different results. The main difference was that, in the TPXO model, the dominant period was semidiurnal and M2 was the strongest component (amplitude of 0.73 cm/s). A wavelet analysis of the current and wind data was also carried out. Based on the previous results, the harmonic analysis of the current data was done again, now for a shorter period of time in which the expected effect of the wind on the surface current would be weaker. It was concluded that the current, in particular its North to South component, was more influenced by the wind than by the tide. However, it was also concluded that the current data obtained with the harmonic analysis was probably contaminated by the wind, in the sense that it was not possible to separate the frequency of the wind's diurnal cycle and the frequency of the

main diurnal component of the tide (K1). This may have caused the harmonic analysis results to have a bigger diurnal component than expected from the TPXO model results. Finally, some suggestions to solve this problem were presented.

Keywords: Coastal oceanography; Tidal currents; Wind-driven currents

Índice

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iii
Abstract	iii
Lista de figuras	vi
Lista de tabelas	viii
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos	viii
1. Introdução.....	1
1.1 Objetivos	1
1.2 Apresentação da tese	1
2. Dados e métodos	3
2.1 Enquadramento oceanográfico.....	3
2.2 Observações	3
2.2.1 Vento	3
2.2.2 Corrente	6
2.3 Métodos.....	8
2.3.1. Análise Harmónica.....	8
2.3.1.1 Introdução.....	8
2.3.1.2 Aspetos teóricos	10
2.3.1.3 Aplicação t-tide	11
2.3.2. Análise por onduletas	13
2.3.2.1 Introdução.....	13
2.3.2.2 Aspetos teóricos	13
3. Resultados e discussão	16
3.1. Análise harmónica.....	16
3.2. Modelo numérico TPXO.....	24
3.3. Análise por <i>wavelets</i>	27
3.3.1. Vento	27
3.3.2 Corrente	29
3.4. Discussão dos resultados	31
4. Conclusões gerais	35
5. Bibliografia e referências	37
6. Links utilizados	39
7. Anexos.....	40

Lista de figuras

- **Figura 1.1:** Mapa da região em estudo, no contexto de Portugal Continental (adaptada de Lamas et al, 2017). Os dados de corrente que serão posteriormente estudados foram recolhidos ao largo da Praia da Oliveirinha, no local assinalado na figura da direita com a estrela vermelha. Os dados do vento provêm da estação meteorológica do Cabo de Sines, assinalada com o triângulo vermelho na mesma figura. 2
- **Figura 2.1:** Gráfico direcional (stick plot) da magnitude e direção do vento na estação meteorológica do Cabo de Sines, para o período entre 2 de agosto (08/02) e 1 de setembro (09/01) de 2012. 4
- **Figura 2.2:** Gráfico vetorial (stick plot) do vento no Cabo Sines, apenas para os primeiros 3 dias/72 h do registo (2 a 4 de agosto de 2012). Pode-se observar nesta imagem que a componente zonal do vento tem um ciclo diurno. 5
- **Figura 2.3:** Espectros de potência de Fourier do vento. (a) Componente norte-sul; (b) Componente este-oeste. 5
- **Figura 2.4:** Correntómetro da família S4. 6
- **Figura 2.5:** Gráfico direcional (stick plot) da corrente oceânica, medida na praia da Oliveirinha entre 26 de julho e 1 de setembro de 2012. Os dados foram filtrados com um filtro de média corrida de 41 h e subamostrados a 1h. 7
- **Figura 2.6:** Componentes zonal (a) e meridional (b) da corrente na Praia da Oliveirinha apresentada na Fig. 2.5. Note-se a diferença entre as escalas de ambos os gráficos. Na Fig. 2.6 a) os valores negativos representam uma corrente para oeste; na Fig. 2.6 b), representam uma corrente para sul. 7
- **Figura 2.7:** Espectros de potência de Fourier da corrente: (a) Componente norte-sul; (b) Componente este-oeste. 8
- **Figura 2.8:** Representação de uma elipse de corrente de maré (tidal ellipse) e dos seus parâmetros. R é o eixo maior da elipse, r é o seu eixo menor e θ é a sua orientação em relação à direção Este. Na equação, τ é a fase e ω a frequência da componente a que se refere a elipse. Fonte: site da Naval Postgraduate School (<http://www.oc.nps.edu/nom/day1/partc.html>). 12
- **Figura 2.9:** Autocorrelação da série temporal do vento meridional (cujo intervalo de amostragem é 10 minutos), até ao valor lag-20, correspondente a 20 intervalos de amostragem. As linhas horizontais a azul são os intervalos de confiança do valor 0 da função “autocorr”. 15
- **Figura 3.1:** A vermelho mostram-se as componentes este-oeste (em cima) e norte-sul (em baixo) da série temporal da corrente de maré simulada por análise harmónica, utilizando o programa t_tide. A azul mostram-se as séries temporais originais correspondentes. 18
- **Figura 3.2:** A verde mostra-se a série residual, ou seja, a série temporal que resulta do cálculo da diferença entre os dados de corrente originais (a azul) e a corrente de maré simulada pela análise harmónica (a vermelho na Fig. 3.1), separada em componentes este-oeste (em cima) e norte-sul (em baixo). 19
- **Figura 3.3:** Elipses da corrente de maré para as componentes com $SNR > 1$: (a) as componentes de longo período MM (mensal) e MSF (quinzenal); (b) as 4 componentes diurnas; (c) as 5 componentes semidiurnas. Notar que a gama de valores nos eixos de (b) é o dobro daquela em (a) e (c). 20
- **Figura 3.4:** Elipses de erro da corrente de maré, para as componentes com $SNR > 1$: (a) de longo período; (b) diurnas; (c) semidiurnas. No gráfico representam-se as elipses cujos eixos maior e menor (**emaj** e **emin**) são, respetivamente, os intervalos de confiança a 95% dos eixos maior e menor (**fmaj** e **fmin**) das elipses de corrente. 21

- **Figura 3.5:** Elipses da corrente de maré para (a) as componentes com periodicidade ≈ 3 vezes por dia; (b) as componentes com periodicidade ≈ 4 vezes por dia; (c) as componentes com periodicidades ≈ 6 ou mais vezes por dia..... 22
- **Figura 3.6:** Elipses de erro da corrente de maré, para: (a) as componentes de periodicidade ≈ 3 vezes por dia; (b) as componentes de periodicidade ≈ 4 vezes por dia; (c) as componentes com periodicidade 6 ou mais vezes por dia. No gráfico representam-se as elipses cujos eixos maior e menor (**emaj** e **emin**) são, respetivamente, os intervalos de confiança a 95% dos eixos maior e menor (**fmaj** e **fmin**) das elipses de corrente..... 24
- **Figura 3.7:** Output do modelo TPXO para a Praia da Oliveirinha. Elipses de corrente das componentes: a) diurnas (K1, Q1) e b) semidiurnas (M2, S2, N2). Note-se a diferença entre as escalas dos dois gráficos. 25
- **Figura 3.8:** Resultados da análise por wavelets da série temporal do vento (componente meridional, centrada e dividida pelo seu desvio padrão). A linha preta em forma de ogiva no gráfico b) é o cone de influência, abaixo do qual os resultados não devem ser considerados. Os restantes contornos a preto em b) e as linhas a tracejado vermelhas em c) e d) são os níveis de significância a 95% dos espectros de potência (o seu cálculo está explicado na secção Metodologia). 28
- **Figura 3.9:** Resultados da análise por wavelets da série temporal do vento (componente zonal, centrada e dividida pelo seu desvio padrão). Os gráficos (a), (b), (c) e (d) são análogos aos da figura 3.8. 29
- **Figura 3.10:** Resultados da análise por wavelets da série temporal da corrente (componente meridional, centrada e dividida pelo seu desvio padrão). Os gráficos (a), (b), (c) e (d) são análogos aos das Figuras 3.8 e 3.9. O gráfico (d) obteve-se integrando o gráfico (b) para períodos entre 0.25 e 4 dias..... 30
- **Figura 3.11:** Resultados da análise por wavelets da série temporal da corrente (componente zonal, centrada e dividida pelo seu desvio padrão). Os gráficos (a), (b), (c) e (d) são análogos aos das Fig. 3.8 e 3.9. O gráfico (d) obteve-se integrando o gráfico (b) para períodos entre 0.25 e 4 dias..... 31
- **Figura 3.12:** Corrente de maré simulada (a vermelho) para o período entre 12 e 19 de agosto de 2012, utilizando os dados de corrente da Praia da Oliveirinha para o mesmo período (a azul). 32
- **Figura 3.13:** Elipses de corrente diurna (K1) e semidiurna (M2), resultantes da análise harmónica para a semana de 12 a 19 de agosto de 2012. 33

Lista de tabelas

- **Tabela 2.1:** Algumas componentes da maré de equilíbrio, juntamente com a sua contribuição para a altura total da maré de acordo com esta teoria (dados de Kowalik e Luick 2013). 9
- **Tabela 3.1:** Lista das 18 componentes da corrente de maré utilizadas pela análise harmónica, com razão entre sinal e ruído (SNR) igual ou superior a 1. Os quatro parâmetros **major**, **minor**, **inc** e **pha** são os parâmetros da elipse de corrente de maré associada a cada componente/frequência, sendo **emaj**, **emin**, **einc** e **epha** os respetivos intervalos de confiança a 95%. 17
- **Tabela 3.2:** Médias e variâncias para a série temporal da corrente original, para as componentes zonal (x) e meridional (y) da corrente reconstruída por análise harmónica, e para as mesmas componentes da corrente residual (diferença entre a série original e a série reconstruída). 18
- **Tabela 3.3:** Razões de amplitudes entre diferentes componentes da corrente de maré, arredondadas à unidade. 23
- **Tabela 3.4:** Output do modelo TPXO para o local do correntómetro S4. De entre as componentes disponíveis neste modelo, foram escolhidas aquelas que a análise harmónica resolveu com $SNR > 1$ 25
- **Tabela 3.5:** Componentes da análise harmónica realizada com os dados de corrente da Praia da Oliveirinha relativos à semana entre 12 e 19 de agosto de 2012..... 32

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

- **AH:** Análise Harmónica
- **NW:** Noroeste
- **SNR:** Signal to Noise Ratio (Razão sinal-ruído)
- **SW:** Shallow Water (águas pouco profundas)

1. Introdução

1.1 Objetivos

O objetivo deste estudo é a separação, tanto quanto possível, da corrente de maré e da corrente induzida pelo vento, tendo como base dois conjuntos de dados (corrente e vento) recolhidos no Verão de 2012, na zona de Sines, na Costa Vicentina de Portugal Continental.

Uma das motivações para a realização deste trabalho foi o aprofundamento de um estudo anteriormente realizado nesta zona (Antunes, 2013) com os mesmos conjuntos de dados. Nesse estudo, com base na análise de Fourier das séries temporais, concluiu-se que, para aquele período de observação, a corrente à superfície na região de Sines é induzida principalmente pelo vento, mas que a maré também é um importante elemento forçador da corrente. Os resultados desse estudo não permitiram, no entanto, quantificar o efeito que cada um destes forçamentos tem na corrente. A utilização do método de análise espectral de Fourier apresenta limitações na identificação dos diferentes tipos de variabilidade, quando estes têm escalas temporais sobrepostas entre si e amplitudes variáveis no tempo. É então necessário recorrer a outro tipo de métodos, como a análise harmónica, a análise por onduletas (*wavelet analysis*), ou ainda à utilização de modelos dinâmicos que representem algum dos processos físicos relevantes para a variabilidade dos dados.

Outras motivações para este estudo incluem um melhor entendimento dos ecossistemas existentes nesta região. É importante ter um melhor conhecimento de como as espécies que habitam as zonas costeiras são afetadas pela circulação oceânica e, mais concretamente, pelo transporte de nutrientes, calor, sal e sedimentos, no qual a corrente e a sua variabilidade têm um papel chave. Ainda se sabe relativamente pouco sobre como as correntes podem ser influenciadas pela topografia costeira, sobretudo se esta for complexa, como é o caso na região em estudo com a presença de um cabo, o Cabo de Sines, identificado na Figura 1.1 (Lamas *et al*, 2017). Sabendo mais sobre como cada um destes forçamentos (e o seu conjunto) influenciam as correntes, é possível desenvolver modelos numéricos mais precisos, ou melhorar modelos existentes (Jay & Flinchem, 1999).

1.2 Apresentação da tese

De modo a cumprir estes objetivos, os dados de corrente à superfície e de vento utilizados neste trabalho vão ser analisados com vários métodos, incluindo análise harmónica e análise por onduletas (*wavelets*). Na aplicação destes métodos serão adaptados programas de cálculo numérico já desenvolvidos por outros autores, como por exemplo os apresentados por Torrence e Compo (1998) e Pawlowicz *et al*. (2002), disponíveis nos *sites* dos autores (ver secção *Links utilizados*).

Os dados utilizados foram recolhidos na região da Costa Vicentina de Portugal Continental sobre a plataforma continental interna, perto de Sines, no verão de 2012. Os dados de corrente são provenientes da praia da Oliveirinha (coordenadas: 37.89°N, 8.80°W), assinalada na Figura 1.1. Os dados de vento foram registados no anemógrafo da estação meteorológica da Autoridade Portuária de Sines (o Cabo Sines está assinalado na Figura 1.1, com coordenadas: 37.96°N, 8.89°W).

Na região estudada, a plataforma continental tem cerca de 30 km de extensão, com o bordo da plataforma localizado a aproximadamente 150 m de profundidade (Lamas *et al*, 2017). A costa está aproximadamente alinhada com a direção norte-sul, exceto no Cabo Sines e nas suas proximidades (ver Figura 1.1). Os dados de corrente foram recolhidos à superfície sobre a plataforma continental interna, ou seja, na região ao largo da zona de rebentação das ondas de superfície, mas dentro da região onde o efeito destas ondas ainda é sentido junto ao fundo (Antunes, 2013).

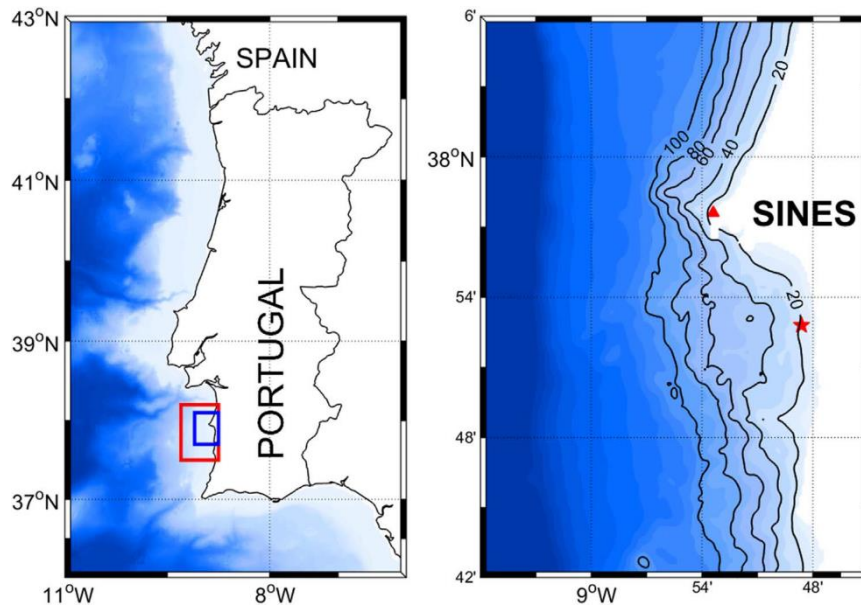


Figura 1.1: Mapa da região em estudo (caixa azul), no contexto de Portugal Continental (adaptada de Lamas *et al.*, 2017). A figura da direita corresponde a um aumento da região assinalada com a caixa azul na figura da esquerda. Os dados de corrente que serão posteriormente estudados foram recolhidos ao largo da Praia da Oliveirinha, no local assinalado na figura da direita com a estrela vermelha. Os dados do vento provêm da estação meteorológica do Cabo de Sines, assinalada com o triângulo vermelho na mesma figura.

A série temporal de dados da corrente foi recolhida no âmbito do projeto de investigação “*RISE & SHINE- Recrutamento de invertebrados no intertidal rochoso: diferentes componentes, escalas e processos*” (PTDC/BIA-BEC/103734/2008), que procurava compreender fenómenos como, por exemplo, o transporte larval pela corrente oceânica, que é vital para a reprodução dos percebes e outros invertebrados. É possível que a presença do cabo Sines, juntamente com o ciclo diurno do vento, contribuam para uma retenção das larvas destas espécies junto à costa, ajudando assim à sua reprodução. Este fenómeno é mais notável no verão, que é também quando o vento é mais intenso (Lamas *et al.*, 2017). Seria então importante conhecer de forma mais profunda a influência do vento na corrente oceânica para ajudar à compreensão do ecossistema destas espécies e do seu ciclo de vida.

Neste trabalho tentar-se-á então, quantificar a influência do vento na corrente oceânica à superfície, em relação à influência exercida pelo forçamento da maré. No capítulo 2 apresentar-se-ão os dados (secção 2.2) e os métodos utilizados em maior detalhe (secção 2.3). No capítulo 3 mostram-se os resultados obtidos com diferentes métodos: análise harmónica (secção 3.1), modelo numérico da maré oceânica TPXO (secção 3.2) e análise por *wavelets* (secção 3.3); juntamente com uma discussão destes resultados e algumas conclusões preliminares (secção 3.4). Finalmente, o capítulo 4 contém as conclusões gerais deste trabalho e algumas recomendações para a resolução de problemas encontrados, que deverão ser abordados em estudos futuros sobre este tema.

2. Dados e métodos

2.1 Enquadramento oceanográfico

No Verão, a circulação típica na região em estudo (Figura 1.1), bem como na costa oeste de Portugal Continental em geral, é caracterizada pela presença de afloramento costeiro (*upwelling*) sazonal, ao longo de toda a costa. A Corrente de Portugal é mais intensa nos meses de verão devido à presença de ventos de Norte, que se observam com regularidade na mesma altura do ano na costa sudoeste da Península Ibérica (Relvas *et al*, 2007). A este padrão do vento é habitual chamar “nortada”. O vento é o principal fator forçador das correntes oceânicas superficiais, sendo necessário, nas regiões costeiras e devido ao sistema de brisas, ter em conta o impacto do seu ciclo diurno (relaxação e intensificação) na circulação oceânica. O *upwelling* sazonal é uma consequência do vento de Norte observado durante esta estação do ano, que gera uma circulação costeira divergente na camada superficial (transporte de Ekman), provocando assim o afloramento de águas mais profundas (Relvas *et al*, 2007). A maré poderá também ser um importante forçamento na circulação neste local (Trindade *et al*, 2016), dando origem a correntes de maré que se sobrepõem à corrente induzida pelo vento. A topografia da linha de costa e a batimetria do fundo podem ainda afetar certas características da circulação à escala local (Lamas *et al*, 2017).

Na praia da Oliveirinha, onde se recolheram os dados de corrente em estudo, o principal fator topográfico com influência na circulação é, para além da proximidade à costa, o cabo Sines que se localiza aproximadamente 11 km a NW da praia (Figura 1.1).

2.2 Observações

2.2.1 Vento

Os dados da velocidade do vento foram registados de 10 em 10 minutos pelo anemógrafo da estação meteorológica da Autoridade Portuária de Sines, entre 2 de agosto e 30 de setembro de 2012. Em cada intervalo de 10 minutos foram registadas a intensidade e direção médias, realizando-se um total de 4464 medições. Foram apenas utilizados os dados até ao dia 1 de setembro – o último dia da série temporal da corrente.

Foi necessário realizar uma interpolação nos dados do vento, devido ao facto de alguns registos terem valores anómalos (registados com o valor -99 m/s) ou em falta. Para tal foi necessário separar o vento em componentes zonal e meridional. Primeiro calculou-se um vetor complexo: $V = |V|e^{i\theta}$, sendo $|V|$ a intensidade e θ a direção do vento convertida para radianos. Obtiveram-se depois as componentes zonal (u) e meridional (v), tendo em conta as diferenças entre as convenções meteorológica e trigonométrica dos ângulos. Finalmente, realizou-se a interpolação linear de ambas as componentes do vento. Foram realizadas experiências (não mostradas) com outros métodos de interpolação, por exemplo as interpolações cúbica e com *splines*, cujos resultados não mostraram melhorias quantitativas em relação à interpolação linear.

De modo a determinar se havia alguma tendência de fundo nos dados que devesse ser removida, realizou-se um *detrending*, tanto para os dados de vento como para os dados de corrente. Em ambos os casos, não existiam tendências, logo os resultados do *detrending* não foram utilizados.

A parte da série temporal do vento utilizada neste trabalho é representada num gráfico direcional (*stick plot*) na Figura 2.1. Os dados foram filtrados com um filtro de média corrida de 41 pontos (6.8 h) e subamostrados a 1h. Este processo serviu para evitar que a representação gráfica dos dados fosse confusa e para poupar memória nos cálculos dos *stick plots*.

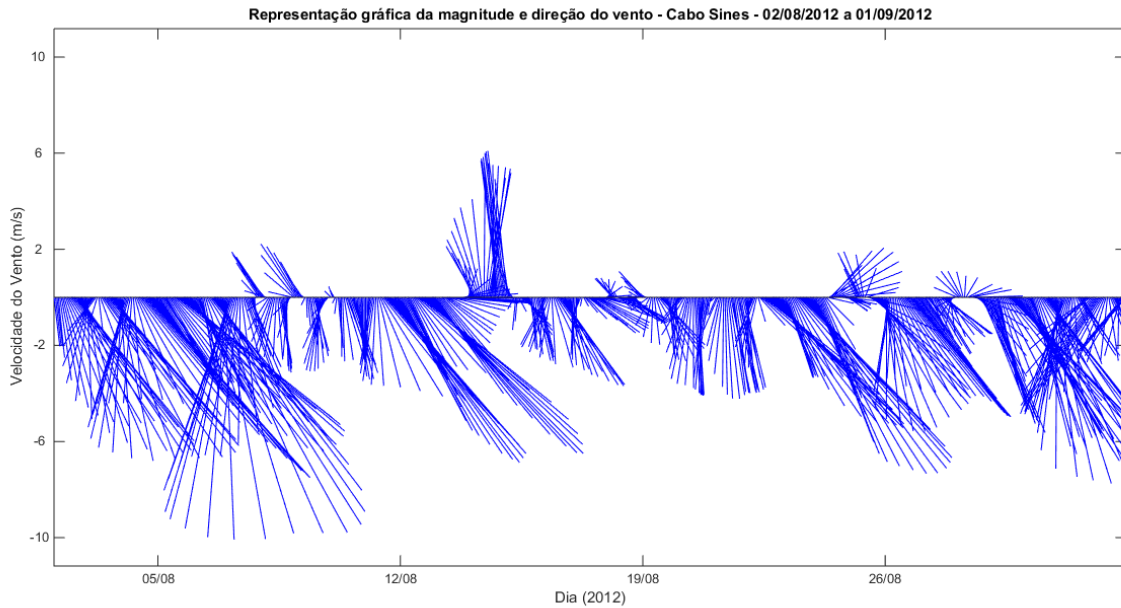


Figura 2.1: Gráfico direcional (stick plot) da magnitude e direção do vento na estação meteorológica do Cabo de Sines, para o período entre 2 de agosto (08/02) e 1 de setembro (09/01) de 2012.

Observa-se que neste período o vento soprou predominantemente de norte, tendo também uma componente zonal um pouco menos intensa, com um sentido predominante de oeste. Quanto à componente meridional, existiram algumas inversões temporárias do seu sentido (a mais relevante tendo ocorrido nos dias 14 e 15 de agosto), mas de uma forma geral verifica-se o padrão de “nortada” esperado para o vento na costa continental portuguesa nesta época do ano.

Uma parte da variabilidade do vento está associada ao seu ciclo diurno, mais concretamente ao sistema de brisas frequentemente observado em zonas costeiras, em especial no Verão. Durante o dia a radiação solar aquece o solo e o oceano de modo diferente, por causa da diferença em capacidade calorífica das duas superfícies. A temperatura do oceano varia muito mais lentamente que a do solo. Deste modo, a superfície do solo aquecerá mais que a superfície do oceano durante o dia, e existirá um gradiente de temperatura entre as superfícies terrestre e marítima. Este por sua vez dá origem a um gradiente de pressão, o que força uma circulação atmosférica. O ar aquecido sobre a superfície terrestre sobe, por ser menos denso que o ar em altitude, e tende a deslocar-se em direção ao mar. Este ar quente é substituído por ar mais fresco que inicialmente se encontrava sobre o oceano (“brisa marítima”). De noite, o sentido desta circulação inverte-se (“brisa terrestre”) devido ao facto de a temperatura da superfície do solo ser mais baixa do que a temperatura da superfície do oceano (Miranda, 2009). Na região em estudo, a linha de costa está em geral aproximadamente alinhada com a direção norte-sul. A brisa sopra perpendicularmente à linha de costa, estando portanto neste caso contida na componente zonal do vento. Na Figura 2.2 observam-se apenas os primeiros 3 dias do registo do vento, onde se pode observar com mais detalhe a variação diurna da componente zonal e a alteração do seu sentido durante o dia.

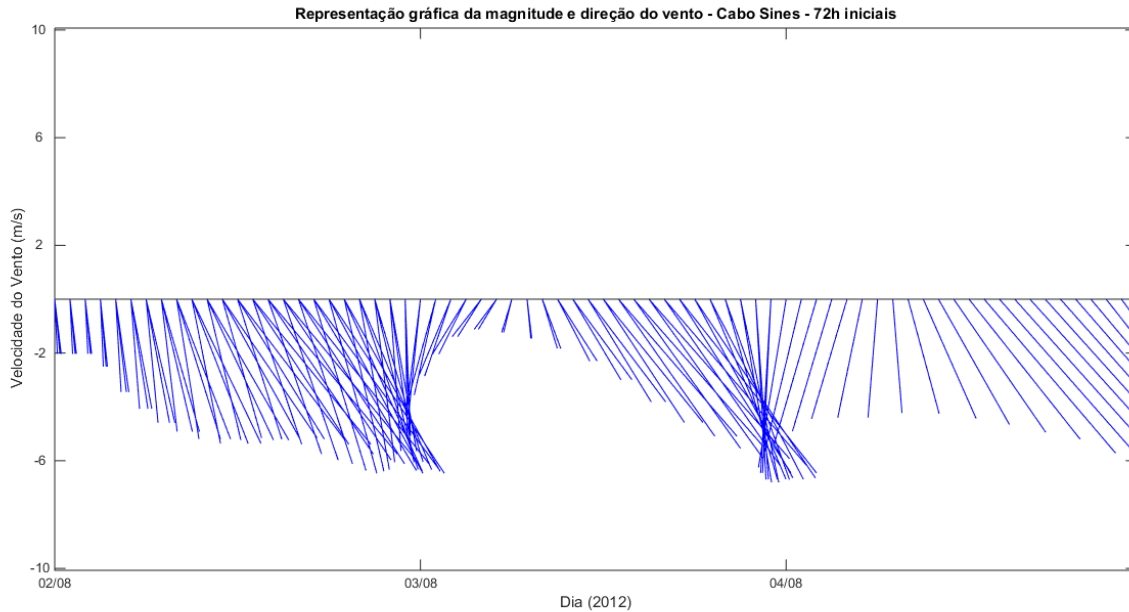


Figura 2.2: Gráfico vetorial (stick plot) do vento no Cabo Sines, apenas para os primeiros 3 dias/72 h do registo (2 a 4 de agosto de 2012). Pode-se observar nesta imagem que a componente zonal do vento tem um ciclo diurno.

Outro fator que contribui para que o vento tenha uma componente zonal é a topografia da linha de costa, em particular a presença de características topográficas como o promontório da Estremadura, na região de Lisboa, que fazem com que o alinhamento da costa não seja sempre aproximadamente meridional, o que pode dar origem a deflexões no sentido do vento.

Na Figura 2.3 apresentam-se os espectros de Fourier dos dados do vento. Na componente este-oeste (Fig. 2.3 b) existe um pico diurno bastante evidente, que pode ser explicado pela existência do sistema de brisa marítima/terrestre descrito nesta secção. Observa-se também dois picos menores, associados a períodos de cerca de 3 a 5 dias. A componente meridional do vento (Fig. 2.3 a) parece ter uma variabilidade bastante maior, tendo energia distribuída por uma grande gama de frequências. No entanto, tem também máximos relativos de energia para os períodos que dominam na componente zonal (1 dia e 3 a 5 dias), e manifesta ainda um crescimento exponencial de energia para as baixas frequências, mais pronunciado do que no caso da componente zonal.

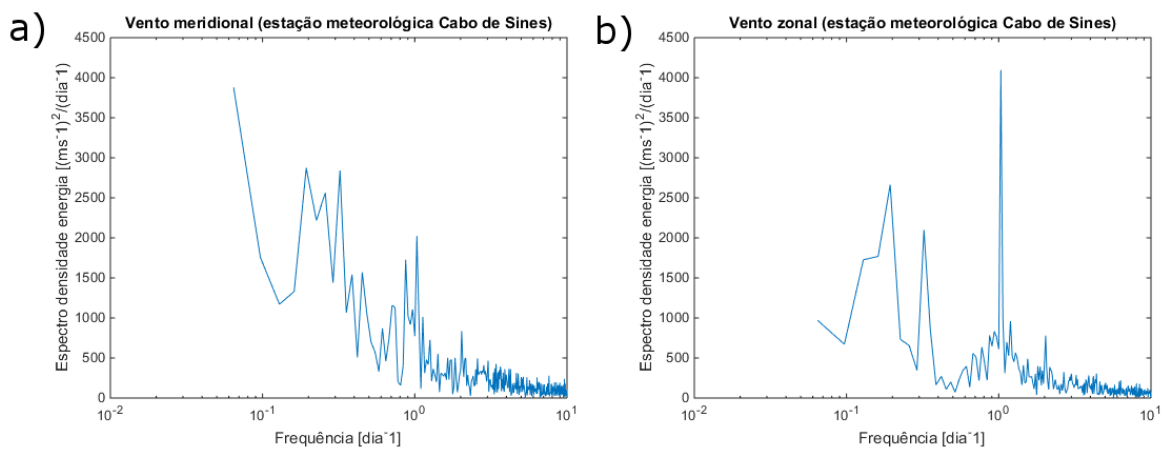


Figura 2.3: Espectros de potência de Fourier do vento. (a) Componente norte-sul; (b) Componente este-oeste.

2.2.2 Corrente

As medições da corrente foram realizadas entre 26 de julho e 1 de setembro de 2012, com um correntómetro eletromagnético S4A (Figura 2.4). Este estava suspenso de uma boia superficial, a cerca de 0,5 m de profundidade, e localizado a cerca de 700 m de distância da costa (coordenadas: 37° 53' 12.96" N, 8° 48' 16.56" W), em plena plataforma continental interna, sobre a isóbata de 12 m, ao largo da Praia da Oliveirinha.

A taxa de amostragem (intervalo entre medições consecutivas) utilizada foi de 3 minutos, tendo a série temporal um total de 17792 medições. A família de correntómetros S4, incluindo o modelo S4A, funciona de acordo com os princípios de indução eletromagnética de Faraday, segundo os quais a passagem de uma substância condutora por um campo magnético constante resulta numa força eletromotriz. Esta força será perpendicular tanto ao campo magnético como à direção da corrente oceânica, e dará origem a uma diferença de potencial. Neste caso a substância condutora será a água do mar (corrente oceânica), sendo o campo eletromagnético gerado pelo próprio instrumento. O correntómetro S4 possui dois pares de eléctrodos (placas de metal) que medem a diferença de potencial associada à passagem da corrente oceânica. As componentes zonal e meridional da corrente são medidas separadamente (Emery & Thomson, 2001).

Na Figura 2.5, representa-se a série temporal da corrente num *stick plot*, no qual os dados foram filtrados com um filtro de média corrida de 41h (819 pontos) e subamostrados a 1h. Na Figura 2.6 a mesma série temporal é representada com as suas componentes zonal e meridional separadamente.



Figura 2.4: Correntómetro S4a utilizado na medição das correntes.

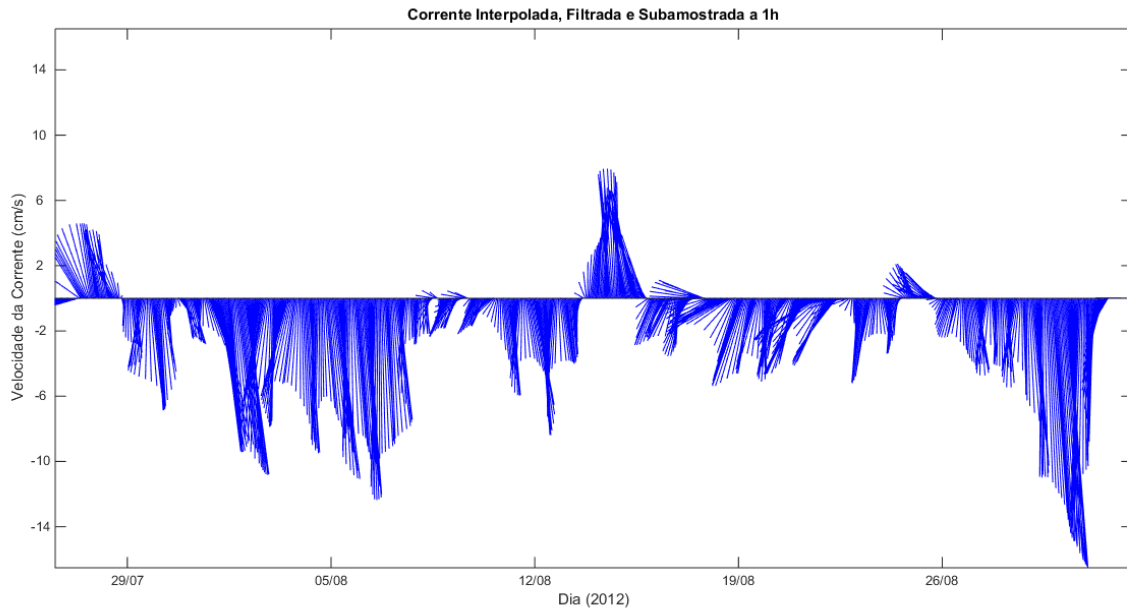


Figura 2.5: Gráfico direcional (stick plot) da corrente oceânica, medida na praia da Oliveirinha entre 26 de julho e 1 de setembro de 2012. Os dados foram filtrados com um filtro de média corrida de 41 h e subamostrados a 1h.

Na Figura 2.5, os valores negativos da velocidade correspondem a uma corrente com componente meridional para sul. Observa-se que o sentido da corrente foi geralmente de norte para sul, verificando-se aqui também algumas inversões no sentido meridional da corrente aproximadamente nas mesmas alturas do mês de agosto em que se verificaram inversões no sentido do vento. A inversão mais intensa verificou-se, novamente, nos dias 14 e 15 de agosto. De forma geral, a intensidade e duração das inversões do sentido da corrente parece ter alguma relação com a intensidade e duração das inversões do sentido do vento. Tal sugere que o vento é um dos principais fatores forçadores da corrente oceânica à superfície nesta zona. Na Figura 2.6 apresentam-se as componentes zonal e meridional da corrente em separado:

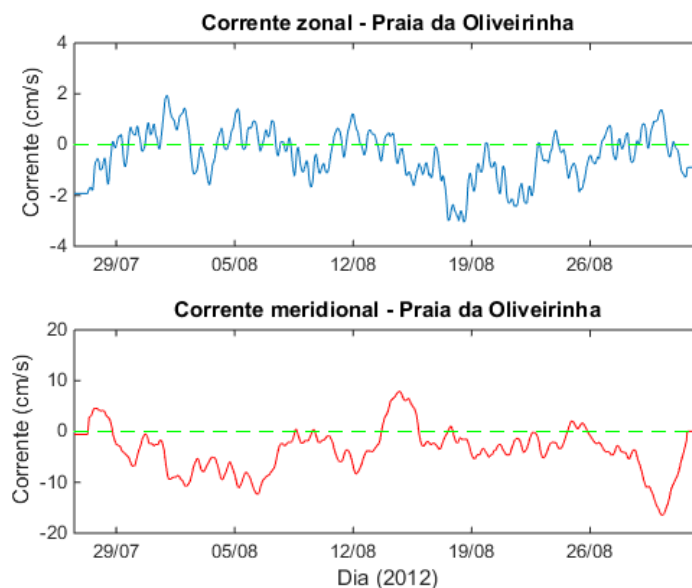


Figura 2.6: Componentes zonal (a) e meridional (b) da corrente na Praia da Oliveirinha apresentada na Fig. 2.5. Note-se a diferença entre as escalas de ambos os gráficos. Na Fig. 2.6 a) os valores negativos representam uma corrente para oeste; na Fig. 2.6 b), representam uma corrente para sul.

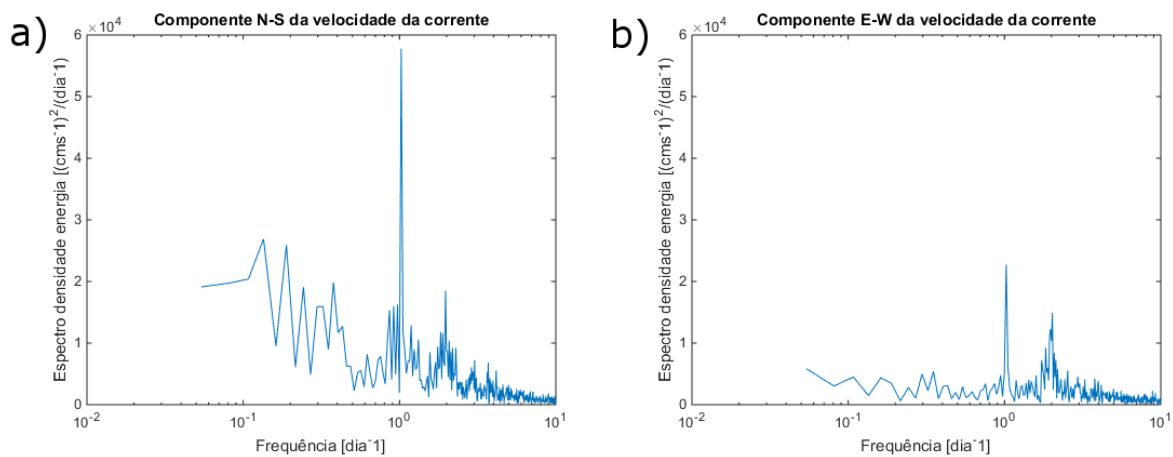


Figura 2.7: Espectros de potência de Fourier da corrente: (a) Componente norte-sul; (b) Componente este-oeste.

A componente meridional da corrente é bastante mais intensa que a sua componente zonal (Figura 2.6; note-se que a escala no eixo vertical da Fig. 2.6 b) é cinco vezes maior que na Fig. 2.6 a). Ao longo da duração da série temporal observa-se (Figura 2.5) que durante alguns períodos do mês de agosto, o sentido da corrente é aproximadamente para sul, sendo a componente zonal muito pouco relevante; no entanto, noutras alturas do mês o sentido da corrente é para su-sudeste (como na primeira quinzena do mês de agosto) ou para su-sudoeste (como no período imediatamente a seguir à inversão de corrente registada nos dias 14 e 15). Estes resultados sugerem que a componente zonal da corrente é de fraca intensidade e sentido variável.

Na Figura 2.7 a) apresenta-se o espectro de potência da componente meridional da corrente. O maior pico corresponde ao período de 1 dia (ciclo diurno); também é visível o pico correspondente ao período de meio dia (ciclo semidiurno), à direita do primeiro. A componente zonal da corrente (Figura 2.7 b) apresenta resultados semelhantes à componente meridional; no entanto a sua potência é bastante menor.

2.3 Métodos

2.3.1. Análise Harmónica

2.3.1.1 Introdução

Realizou-se a **análise harmónica** dos dados de corrente medidos na praia da Oliveirinha, que teve como objetivo geral quantificar a parte da corrente oceânica que se deve a forçamentos relacionados com a maré, na região de Sines. O princípio da análise harmónica é a decomposição de uma série temporal de dados (como medições de altura do nível do mar, ou da corrente) numa soma de ondas sinusoidais simples. Cada uma destas ondas está associada a uma frequência previamente selecionada. No caso da análise harmónica da corrente de maré, estas frequências são designadas “componentes” ou “constituintes” da maré, e dependem de forçamentos astronómicos lunares e solares (Emery & Thomson, 2001).

A análise harmónica (AH) utiliza-se frequentemente na previsão da altura da maré ou da corrente de maré, a partir de séries temporais de medições de alturas ou correntes no oceano real. No entanto, a AH pode ser usada também para estimar a parte da corrente oceânica que se deve às forças geradoras da maré (corrente de maré ou *tidal current*), em contraste com a parte da corrente induzida pelo vento e outros forçamentos (corrente residual ou *nontidal current*). A AH consegue, em princípio, distinguir a corrente de maré de outros tipos de correntes oceânicas, devido ao facto de as correntes de maré terem

periodicidade (NOAA, 1981). Encontradas as amplitudes e fases das frequências constituintes da corrente de maré, deverá ser possível reconstruir aproximadamente esta corrente e subtraí-la ao registo original para obter a corrente residual (Emery & Thomson, 2001).

A análise harmónica dos dados de corrente realizada neste estudo foi feita com a ajuda do programa para MATLAB **t_tide.m**, desenvolvido por R. Pawlowicz, B. Beardsley e S. Lentz e disponível em <https://www.eoas.ubc.ca/~rich/>. Uma descrição mais detalhada deste programa encontra-se em Pawlowicz *et al* (2002).

Para interpretar os resultados da AH, é necessário comparar a contribuição relativa das componentes da maré para a corrente reconstruída, com a sua contribuição relativa para a maré de equilíbrio. A maré de equilíbrio é um conceito teórico que descreve a maré que seria gerada por forças astronómicas caso o planeta Terra estivesse completamente coberto de água e não houvesse forças de inércia, o que levaria o oceano a responder automaticamente aos forçamentos. Apesar dos resultados obtidos com esta teoria serem pouco realistas, são essenciais como sistema de referência para a AH (Pugh, 1987). Na teoria estão incluídas componentes de longo período, diurnas e semidiurnas.

Na Tabela 2.1 mostram-se as contribuições relativas de algumas componentes da maré de equilíbrio, em termos da sua altura (dados de Kowalik & Luick, 2013). Os nomes de todas as componentes da maré, exceto as componentes de longo período, incluem um número que indica qual a sua periodicidade aproximada em ciclos por dia. As componentes com maior importância para a maré de equilíbrio são M2 entre as componentes semidiurnas e K1 entre as componentes diurnas. A contribuição das componentes de longo período é relativamente pequena (Kowalik & Luick, 2013). De acordo com a teoria, a corrente está em fase com a elevação da maré (Hautala *et al*, 2005), logo, as amplitudes de ambas são proporcionais. Deste modo, as componentes com maiores contribuições relativas para a altura da maré são também aquelas que mais contribuem para a corrente de maré.

Tabela 2.1: Algumas componentes da maré de equilíbrio, juntamente com a sua contribuição para a altura total da maré de acordo com esta teoria (dados de Kowalik e Luick 2013).

Constituinte	Período (horas solares médias)	Altura maré de equilíbrio (m)
M2 (Principal lunar)	12.421	0.242334
S2 (Principal solar)	12.000	0.112841
N2 (Lunar elíptica)	12.658	0.046398
K1 (Declinação lunissolar)	23.934	0.141565
Q1 (Elíptica lunar)	26.868	0.019256
MF (lunar quinzenal)	327.864 (=13.661 dias)	0.041742
MM (lunar mensal)	661.32 (=27.555 dias)	0.022026

No oceano real, por outro lado, a presença de fronteiras (continentes ou batimetria) altera o comportamento das marés. A maré pode ser vista como uma onda muito longa, cujo comportamento pode ser descrito por uma “onda de Kelvin”. De acordo com Boon (2011), a onda de Kelvin é o resultado

de um balanço de forças envolvendo o equilíbrio hidrostático e a força de Coriolis. Durante a propagação da onda de maré, o efeito de Coriolis leva a uma acumulação de água junto a uma das fronteiras da bacia oceânica; no entanto, como tem de se verificar o equilíbrio hidrostático, esta acumulação será corrigida por uma força de gradiente de pressão. De acordo com a teoria, a direção de propagação da onda de Kelvin roda no sentido ciclónico, à volta de um “ponto anfidrómico” onde a altura do nível do mar não varia.

No oceano real, irregularidades na forma das bacias oceânicas podem dar origem a comportamentos que não estão previstos pela teoria da onda de Kelvin (Boon, 2011). Por exemplo, quando a onda de maré se começa a aproximar da plataforma continental, o atrito causado pela presença do fundo pode provocar interações não lineares entre frequências (Kowalik & Luick, 2013), dando origem a novas componentes da maré em águas pouco profundas (Boon, 2011).

Na discussão e interpretação dos resultados da análise harmónica utilizou-se a *toolbox* TMD (Tidal Model Driver) para MATLAB, acompanhada do modelo TPXO (versão 9.1). O modelo foi desenvolvido por Gary Egbert e Lana Erofeeva (Oregon State University, EUA), e está disponível em <http://volkov.oce.orst.edu/tides/global.html>. Uma descrição detalhada do modelo encontra-se em Egbert e Erofeeva (2002). A *toolbox* TMD foi programada por Lana Erofeeva e está disponível em <https://www.esr.org/research/polar-tide-models/tmd-software/>.

2.3.1.2 Aspectos teóricos

A análise harmónica é semelhante à análise de Fourier, na qual as séries temporais podem ser vistas como uma soma de componentes periódicas. Cada parcela desta soma é representada por uma soma de funções trigonométricas sinusoidais (senos ou cossenos) que descrevem ondas simples, da forma:

$$X(t) = C_q \cos(\omega_q t - \Phi_q) = A_q \cos(\omega_q t) + B_q \sin(\omega_q t) \quad (2.1)$$

em que C_q é a amplitude da onda, ω_q a sua frequência angular (relacionada ao período da onda por: $T_q = 2\pi/\omega_q$) e Φ_q é a sua fase. A_q e B_q são os coeficientes de Fourier do cosseno e do seno respetivamente. A amplitude é expressa em termos dos coeficientes de Fourier como: $C_q = (A_q^2 + B_q^2)^{1/2}$ e a fase é dada por $\Phi_q = \arctan(B_q/A_q)$ (Emery & Thomson, 2001).

A amplitude é considerada constante e, no caso das séries de Fourier, está associada a uma frequência ω_q que é um múltiplo da frequência fundamental, $\omega = 2\pi/T$, onde T é a duração da série temporal em estudo. No entanto, na análise harmónica das marés, as frequências ou componentes ω_q associadas a cada onda/parcela são predefinidas por forçamentos astronómicos em vez de serem determinadas pela duração da série. A análise harmónica calcula a amplitude e a fase associada a cada uma das componentes. Com estes parâmetros calculados pode-se reconstruir a série temporal original, utilizando o modelo descrito pela seguinte equação (Emery & Thomson, 2001):

$$X(t) = X_0 + \sum_{q=1}^M [A_q \cos(\omega_q t) + B_q \sin(\omega_q t)] + X_r(t) \quad (2.2)$$

na qual X_0 é o valor médio da série temporal X , e X_r é o valor da série residual (diferença entre a série temporal medida e a série calculada por análise harmónica). O sistema a ser resolvido na análise harmónica tem M equações da forma (2.2), uma por cada componente incluída na análise harmónica.

Logo, precisam de ser determinados $2M+1$ coeficientes (A_q e B_q para cada componente, bem como a média da série, X_0). Em geral o número de dados na série temporal é muito superior ao número de componentes a calcular, o que dá origem a um problema sobredeterminado (Foreman e Henry, 1989). Para determinar a melhor solução entre as várias possíveis, é comum usar o método dos mínimos quadrados, que minimiza a variância da série residual, $X_r^2(t)$, dada pela diferença quadrada entre a série temporal original $X(t)$ e a série reconstruída pela análise harmónica (Emery & Thomson, 2001):

$$e^2 = \sum_{n=1}^N X_r^2(t_n) = \sum_{n=1}^N \left(X(t_n) - \left[X_0 + \sum_{q=1}^M D(t_n) \right] \right)^2 \quad (2.3)$$

onde se definiu N como o número de pontos total das séries e $\mathbf{D}(t_n) = \mathbf{A}_q \cos(\omega_q t_n) + \mathbf{B}_q \sin(\omega_q t_n)$. Calculando as derivadas parciais da expressão (2.3) em ordem aos coeficientes A_q e B_q e igualando-as a zero, obtém-se as equações que permitem determinar estes coeficientes (ver por exemplo Emery & Thomson, 2001). Estas equações têm de ser resolvidas numericamente.

Para determinar as frequências a utilizar na análise harmónica, é necessário um critério de seleção. O mais habitual é o critério de Rayleigh (equação 2.4), no qual se separam as componentes da maré em categorias, com base na sua periodicidade (de longo período, diurnas, semidiurnas, etc). Dentro de cada categoria, ordenam-se as frequências com base na sua importância para o potencial gerador das forças de maré (Dias, 2001). O critério de Rayleigh determina então se uma frequência f_m deve ser incluída na análise harmónica, com base na diferença $f_m - f_R$ onde f_R é uma frequência já incluída na análise, e que pertence à mesma categoria de periodicidades de f_m . A condição para decidir se f_m é também incluída na análise, é a seguinte (Emery & Thomson, 2001):

$$|f_m - f_R|T > R \quad (2.4)$$

O número de componentes escolhidas para a análise depende da duração da série temporal, T . Séries temporais mais longas permitem uma melhor resolução (ou seja, mais frequências, com menor espaçamento entre elas). O fator R é normalmente tomado como 1.

2.3.1.3 Aplicação t-tide

O programa **t_tide** de Pawlowicz *et al* (2002) pode fazer a análise harmónica tanto de uma série temporal escalar (nesse caso, os dados correspondem à elevação da maré) como de uma série temporal vetorial de dados de corrente oceânica, com componentes este-oeste \mathbf{u} e norte-sul \mathbf{v} , no plano complexo: $\mathbf{V} = \mathbf{u} + i\mathbf{v}$. Para estas séries o *output* do programa **t_tide** inclui parâmetros que definem elipses de corrente de maré (*tidal ellipses*). As correntes de maré não têm sempre a mesma direção ou sentido, rodando com o tempo. Uma elipse de corrente é descrita pela hodógrafa do vetor velocidade, isto é, a linha que une as posições do extremo deste vetor em diferentes instantes mantendo sempre a mesma origem (ver Figura 2.8).

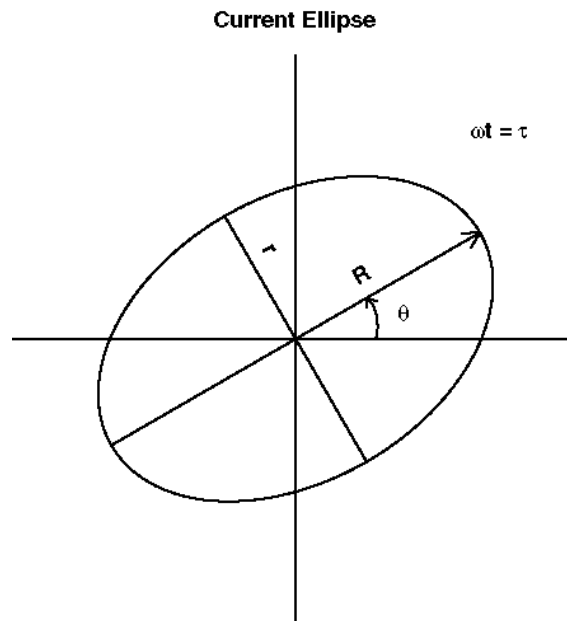


Figura 2.8: Representação de uma elipse de corrente de maré (tidal ellipse) e dos seus parâmetros. R é o eixo maior da elipse, r é o seu eixo menor e θ é a sua orientação em relação à direção Este. Na equação, τ é a fase e ω a frequência da componente a que se refere a elipse. Fonte: site da Naval Postgraduate School (<http://www.oc.nps.edu/nom/day1/partc.html>).

Existe uma elipse de corrente associada a cada uma das componentes/frequências ω_q calculadas pela análise harmónica. O vetor velocidade descreve uma rotação completa ao fim de um período (dado por $2\pi/\omega_q$). As magnitudes dos semieixos maior e menor da elipse são respetivamente as magnitudes máxima e mínima da corrente de maré associada a esta componente (Vindenes *et al*, 2018). A inclinação da elipse, medida em relação à direção Este (que corresponde a valores positivos do eixo horizontal) indica a direção e sentido da corrente máxima. De acordo com a definição usada no programa **t_tide**, os ângulos de fase das componente da corrente são medidos em relação ao valor máximo do forçamento da maré de equilíbrio à longitude de 0° (meridiano de Greenwich) (Pawlowicz *et al*, 2002). O sentido de rotação do vetor velocidade é determinado pelo sinal do semieixo menor da elipse, que é tomado por convenção como positivo caso a rotação seja ciclónica, e negativo se for anticiclónica (Vindenes *et al*, 2018).

Os intervalos de confiança dos parâmetros que definem as elipses da corrente de maré, podem ser calculados pelo programa **t_tide** de diversas maneiras. Neste estudo, utilizou-se a opção *default* do programa (**cboot**), que envolve o uso de um método *bootstrap* no cálculo dos erros. Uma das aplicações mais comuns deste método é no caso em que se deseja calcular intervalos de confiança para uma série temporal que não pode ser reproduzida, como as séries de medições de corrente. Para calcular intervalos de confiança é necessário comparar várias realizações da mesma experiência, de modo a determinar se estas são ou não amostras da mesma população. Normalmente, isto faz-se comparando parâmetros de interesse (como a variância) calculados em várias amostras. O método *bootstrap* é utilizado em situações em que apenas se tem uma amostra de uma população desconhecida. Desta amostra retiram-se amostras mais pequenas, e em cada uma destas calcula-se o valor do parâmetro que se deseja estimar. Após muitas realizações do método *bootstrap* é possível estimar uma distribuição para esse parâmetro (Emery & Thomson, 2001). No programa **t_tide**, usa-se uma variante do método, designada “*parametric bootstrap*” em que se supõe que a população tem uma distribuição de tipo conhecido (por exemplo, normal), cujos parâmetros são obtidos através de um modelo paramétrico aplicado aos dados. Na aplicação deste método, em vez de se retirarem amostras mais pequenas da amostra original, retiram-se, da distribuição parametrizada, amostras do mesmo tamanho da amostra original. Calculam-se os

parâmetros destas novas amostras, sendo estes depois comparados com os parâmetros dos dados originais, de modo a que seja possível calcular os seus intervalos de confiança (Efron & Tibshirani, 1993).

O programa **t_tide** possibilita também a adição de componentes de *águas pouco profundas* (*shallow water constituents*). As interações não lineares entre as frequências que se verificam na zona da plataforma continental podem levar a que alguns termos que normalmente são desprezáveis em oceano aberto passem a ter importância. Caso estes efeitos sejam previsíveis até certo ponto, é possível corrigir a análise harmónica, adicionando uma ou mais componentes *shallow water*. (Pawlowicz *et al*, 2002).

2.3.2. Análise por onduletas

Numa fase posterior, realizou-se a **análise por onduletas** (*wavelets*) das séries temporais da corrente e do vento, com a ajuda de uma *toolbox* para MATLAB (**wave_matlab**) desenvolvida por Christopher Torrence e Gilbert P. Compo, disponibilizada em <http://paos.colorado.edu/research/wavelets>. Um exemplo de utilização desta *toolbox*, juntamente com uma descrição mais detalhada dos métodos utilizados, encontra-se no artigo de Torrence e Compo (1998) disponível no mesmo *site*.

2.3.2.1 Introdução

A análise de Fourier não é adequada para o estudo de sinais com amplitudes ou períodos variáveis no tempo, pois pode ignorar informação importante sobre a forma como estas grandezas evoluem. Por outro lado, a análise por *wavelets*, traduzida habitualmente por **análise por onduletas**, fornece informação sobre a evolução da amplitude, do período/frequência e também da fase do sinal ao longo do tempo. Esta informação é especialmente importante no estudo de sinais cujos forçamentos têm uma gama vasta de escalas temporais. Este é o caso para os sinais aqui analisados. Alguns forçamentos com períodos superiores a aproximadamente um dia (fora da banda diurna da maré, muitas vezes designados de “forçamentos sub-inerciais”) podem ser processos estocásticos, caracterizados por serem aleatórios e, portanto, imprevisíveis, ao contrário da maré (Flinchem & Jay, 2000).

2.3.2.2 Aspectos teóricos

Antes de realizar a análise por *wavelets* de uma série temporal, é necessário escolher uma função $\psi_0(t)$ chamada de *mother wavelet* ou “onduleta mãe”. A escolha da *mother wavelet* depende da série temporal em estudo. Esta deve ter uma forma e características semelhantes às da série (Emery e Thomson, 2001). Neste trabalho utilizou-se a onduleta de Morlet, que é o produto de uma função sinusoidal complexa com uma curva Gaussiana de largura unitária (Torrence e Compo, 1998):

$$\psi_0(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (2.5)$$

onde ω_0 é a frequência normalizada e t é a variável da qual depende a série, neste caso o tempo. Esta função tem de ser centrada com média zero, ter variância finita e admitir escalamento e translação de acordo com a equação (Emery & Thomson, 2001):

$$\psi_{s,\tau}(t) = s^{-1/2} \psi_0[(t - \tau)/s] \quad (2.6)$$

onde s (real e positivo) é o parâmetro de escalamento e τ (real) o parâmetro de translação. Farge (1992) afirma que, se o valor $\omega_0 = 6$ for tomado na equação (2.5), não é necessária a adição de termos de

correção à onduleta de Morlet, de modo a satisfazer a condição de admissibilidade da *mother wavelet* que requer que a sua média seja nula.

A transformada de *wavelet* define-se como a convolução da série temporal com um conjunto de transformações $\psi_{s,\tau}$ da *mother wavelet* (Torrence & Compo, 1998):

$$W_n(s) = \sum_{t=0}^{N-1} x_t \psi * \left[\frac{(t - \tau)\delta t}{s} \right] \quad (2.7)$$

Nesta equação, o parâmetro de escalamento s corresponde à largura da *wavelet* e a convolução pode ser calculada para diferentes valores de s . A convolução é uma operação matemática em que as *wavelets* escaladas $\psi(t)$ percorrem toda a duração do sinal. O seu resultado é uma medida da área em comum entre as duas funções. Se as *wavelets* escaladas tiverem uma forma semelhante ao sinal, os valores elevados da transformada de *wavelet* aparecerão nos intervalos de tempo em que essa similitude ocorre (Emery & Thomson, 2001). Deste modo consegue-se estimar a amplitude e a fase da transformada de *wavelet* da série temporal, para toda a duração do sinal. Na equação (2.7), τ é um parâmetro de translação e ψ^* é a complexa conjugada de ψ .

O método mais rápido para calcular a transformada de *wavelet* passa pelo uso de um resultado do teorema da convolução, segundo o qual a transformada de Fourier de uma convolução de duas funções é o produto das transformadas de Fourier dessas mesmas funções (Emery & Thomson, 2001). A função **wavelet.m**, da *toolbox wave_matlab* de Torrence e Compo, calcula a transformada de *wavelet* desta forma. Para o seu cálculo, é necessário definir um conjunto de parâmetros de *input* na função: **mother**, **pad**, **s0**, **dj**, **j1** e **lag1**. Estes parâmetros não podem ser escolhidos arbitrariamente; dependem das características do sinal em estudo.

O parâmetro **mother** escolhe a *mother wavelet* e neste trabalho foi definido em todas as circunstâncias como 'Morlet'. **Pad** é um parâmetro que apenas pode tomar valores 0 ou 1; se pad=1, adicionam-se zeros à série temporal discretizada, para que o seu número de pontos seja uma potência de 2. Durante o cálculo da convolução, que é feito no domínio da frequência, é necessário calcular transformadas de Fourier rápidas (FFT) da série e da *mother wavelet*. O seu cálculo é mais rápido se o número de pontos da série for uma potência de 2. Além disto, se a série for aperiódica pode-se perder informação quando se calculam as transformadas de Fourier; uma maneira de evitar estes erros é adicionar zeros desta forma (Emery & Thomson, 2001). Por estas razões, **pad** foi sempre definido como 1 neste estudo.

O período ou escala mínima analisada (**s0**) deve ser um múltiplo do intervalo de amostragem do sinal (**dt**) por uma potência de 2. Os parâmetros **dj** (espaçamento entre escalas) e **j1** (número total de escalas menos um) servem para determinar quais os outros períodos a analisar (vetor s_j) em função de **s0**, de acordo com as equações seguintes (Torrence & Compo, 1998):

$$s_j = s_0 2^{j\delta j}, j = 0, 1, \dots, j1 \quad (2.8)$$

$$j1 = \delta j^{-1} \log_2 \left(\frac{N\delta t}{s_0} \right) \quad (2.9)$$

O valor do parâmetro **lag1** afeta o cálculo dos níveis de significância nos espectros de potência das *wavelets*. Para cada uma das séries temporais em estudo, tem de se definir este parâmetro de uma forma coerente com os dados. Muitas séries temporais de processos geofísicos são modeladas como um processo autorregressivo ou processo de Markov univariado (AR-1), segundo a equação (2.10) (Torrence & Compo, 1998, eq. 15):

$$x_n = \alpha x_{n-1} + z_n \quad (2.10)$$

onde α é a autocorrelação lag-1, ou seja, a correlação assumida entre um valor da série temporal, x_n , e o valor anterior a este, x_{n-1} , separados por um intervalo de amostragem **dt**. Diz-se do processo descrito pela equação (2.10) que tem ruído vermelho, caso o valor de α seja inferior a 1 e superior a 0. Se $\alpha = 0$, o processo é designado como tendo ruído branco e nesse caso não existe correlação entre observações consecutivas no tempo. z_n é ruído branco Gaussiano, ou seja, é um processo aleatório com uma distribuição normal (Setz, 2011). Nos processos de ruído branco, nenhuma frequência domina sobre outras, enquanto que nos processos de ruído vermelho as baixas frequências (períodos longos) dominam (Vasseur & Yodzis, 2004).

O processo de ruído vermelho está associado a um espectro de potência que é tomado como o espectro de *background* do processo geofísico (equação 16 de Torrence e Compo, 1998). Este espectro pretende descrever o ruído “de fundo” que está sempre presente no sinal, mas não faz parte dele. Para calcular os níveis de significância do espectro de potência de *wavelet* da série, comparam-se o espectro da série e o espectro de *background*. (Torrence & Compo, 1998)

O valor do parâmetro **lag1** depende da série temporal. Para cada uma das quatro séries temporais (componentes zonal e meridional do vento e da corrente), calculou-se a autocorrelação “lag-1” recorrendo à função MATLAB **autocorr**. A Figura 2.9 mostra o resultado da função **autocorr** aplicada à série do vento meridional, até ao “lag” 20 (neste caso, correspondente a 20*10 minutos = 200 min. = 3h20min.)

A autocorrelação lag-1 (0.9841) do vento meridional é muito alta, tendo-se verificado valores semelhantes, também próximos de 1, para as outras três séries temporais (consultar gráficos nos Anexos 2 e 3). Tal é esperado para séries temporais que tenham intervalos de amostragem curtos. Deste modo é apropriada neste caso a utilização de um modelo AR-1 com ruído vermelho.

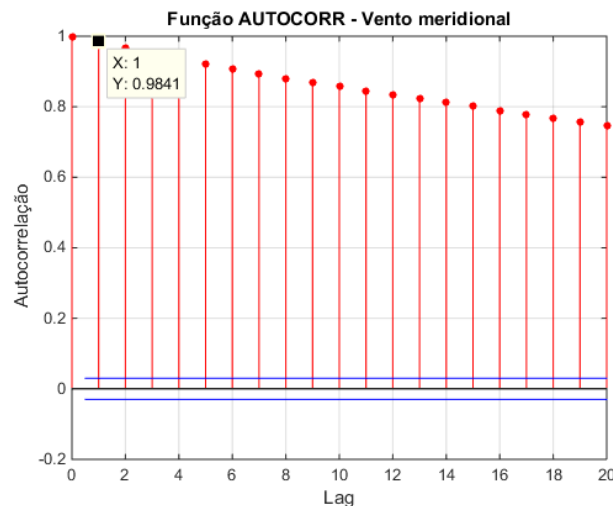


Figura 2.9: Autocorrelação da série temporal do vento meridional (cujo intervalo de amostragem é 10 minutos), até ao valor lag-20, correspondente a 20 intervalos de amostragem. As linhas horizontais a azul são os intervalos de confiança do valor 0 da função “autocorr”.

3. Resultados e discussão

De seguida apresentam-se os resultados da análise harmónica dos dados de corrente recolhidos na Praia da Oliveirinha (secção 3.1), seguidos dos resultados da análise por onduletas (*wavelets*) dos dados da corrente e do vento (secção 3.2). Na secção 3.3 encontram-se os resultados da aplicação da análise harmónica, para um período mais curto de tempo (cerca de uma semana), realizada tendo em conta os resultados obtidos nas duas secções anteriores.

3.1. Análise harmónica

Para introduzir como *input* da função **t_tide**, criou-se um vetor complexo a partir das componentes zonal e meridional da corrente. Este vetor foi filtrado com um filtro de média corrida de 2h/40 pontos e subamostrado a 1h.

Experimentou-se também realizar a filtragem, utilizando o mesmo filtro com uma janela de 4 horas. No entanto, nesse caso não se registou uma redução significativa do ruído ou da magnitude dos erros em relação ao caso da série filtrada com a janela de 2 horas. Por outro lado, a aplicação da janela de 4h implicou a filtragem de algumas das componentes do sinal, com periodicidades da ordem das 6 vezes por dia ($\approx 4h$). Consequentemente, e dada a falta de melhorias observadas nas razões sinal/ruído relativamente à filtragem com janela de 2h, escolheu-se não utilizar os resultados da filtragem de 4h.

Foram definidos os seguintes parâmetros de entrada da função: **latitude** = 37.892509 (a latitude do local em graus decimais) e **dt** = 1 (o intervalo de amostragem dos dados, em horas). O valor **R** do critério de Rayleigh (equação 2.4) está definido no programa como 1, e não foi alterado. Definiu-se outro parâmetro de entrada da função (**synthesis**) que determina a partir de qual valor da razão sinal-ruído (SNR) as componentes calculadas deverão ser incluídas na reconstrução da corrente. Neste caso, **synthesis** = 1.

O *output* do programa **t_tide** inclui um vetor (**pout**) com uma série temporal da corrente de maré reconstruída a partir da série temporal original. Inclui também um ficheiro de texto com a lista de todas as componentes calculadas pela análise harmónica, assim como os parâmetros que definem as elipses de corrente e os seus intervalos de confiança. A cada componente estão associados os seguintes parâmetros: frequência (**freq**) em ciclos por hora; comprimentos dos eixos maior e menor da elipse de corrente de maré (**major** e **minor**, respetivamente) em cm/s; e os ângulos de inclinação (**inc**) e de fase (**pha**) da mesma elipse, em graus. Os valores **emaj**, **emin**, **einc** e **epha** são os intervalos de confiança a 95% destes parâmetros, obtidos com o método *bootstrap* paramétrico não linear (descrito na subsecção 2.3.1.3). Foi também calculada, para cada componente, o valor de SNR, definido no programa como a razão quadrada entre **major** e **emaj**.

O programa **t_tide** resolveu 35 componentes distintas. Incluiu-se também na análise a componente *shallow water* M10 que é uma sub-harmónica da componente M2 (lunar semidiurna). Registou-se um SNR igual ou superior a 1 para 18 componentes; estas estão listadas na Tabela 3.1 (a tabela com todas as componentes está disponível no Anexo 1). Entre as 18 componentes com SNR ≥ 1 estão 2 componentes de longo período (MM com um período de cerca de 1 mês, e MSF com período de cerca de 1 quinzena), 4 componentes diurnas (ALP1, Q1, K1 e UPS1), 5 componentes semidiurnas (MU2, N2, M2, L2 e S2) e 7 componentes com períodos menores que $\frac{1}{2}$ dia (M3, SK3, SN4, MS4, 2MN6, 3MK7 e M8). Estas últimas resultam de interações não lineares entre as constituintes principais da onda de maré (Godin, 1972).

O programa **t_tide** calculou ainda, para **x** (corrente zonal) e **y** (corrente meridional) os seguintes parâmetros estatísticos: média; tendência (*trend*); variância da série original; variância da série prevista/reconstruída pela análise harmónica e variância da série residual. Estes dados estão disponíveis

na Tabela 3.2. Finalmente o programa calculou a razão entre as variâncias da série prevista e da série original. Esta foi 45.3% para a componente zonal da corrente e 50.4% para a componente meridional. Estes números refletem de algum modo a fração da corrente que se deve a forçamentos associados à maré, no entanto os resultados têm de ser interpretados cuidadosamente.

Devido à natureza estocástica do método usado para calcular os intervalos de confiança, os parâmetros que os descrevem (**emaj**, **emin**, **einc** e **epha**), bem como o SNR que depende do parâmetro **emaj**, serão ligeiramente diferentes em cada realização da análise harmónica, no entanto os valores dos eixos e dos ângulos de inclinação e fase serão sempre os mesmos (Pawlowicz *et al*, 2002).

Tabela 3.1: Lista das 18 componentes da corrente de maré utilizadas pela análise harmónica, com razão entre sinal e ruído (SNR) igual ou superior a 1. Os quatro parâmetros major, minor, inc e pha são os parâmetros da elipse de corrente de maré associada a cada componente/frequência, sendo emaj, emin, einc e epha os respetivos intervalos de confiança a 95%.

tide	freq [h ⁻¹]	major [cm/s]	emaj [cm/s]	minor [cm/s]	emin [cm/s]	inc [°]	einc [°]	pha [°]	epha [°]	SNR [adim.]
MM	0.0015122	3.761	0.479	0.219	0.11	101.85	1.60	279.09	7.10	62
MSF	0.0028219	2.270	0.457	-0.303	0.08	83.30	2.37	219.78	12.67	25
ALP1	0.0343966	2.415	1.466	-0.410	0.50	91.08	13.20	302.59	33.67	2.7
Q1	0.0372185	1.894	1.273	-0.350	0.53	90.90	16.48	145.81	47.75	2.2
K1	0.0417807	7.027	1.472	-2.098	0.49	102.88	5.77	309.94	11.43	23
UPS1	0.0463430	1.821	1.666	-0.186	0.69	103.31	20.68	128.02	58.69	1.2
MU2	0.0776895	1.183	1.031	-0.621	1.02	107.52	76.35	74.99	97.11	1.3
N2	0.0789992	1.124	0.981	-0.999	1.00	179.12	136.48	270.75	159.74	1.3
M2	0.0805114	1.451	1.279	-0.234	1.03	71.96	47.18	93.48	62.74	1.3
L2	0.0820236	1.523	1.052	-0.763	0.89	40.23	57.86	177.83	59.79	2.1
S2	0.0833333	1.531	1.102	-0.803	1.17	15.71	74.14	68.64	64.06	1.9
M3	0.1207671	0.689	0.509	-0.498	0.43	89.01	83.13	250.76	105.15	1.8
SK3	0.1251141	0.649	0.625	-0.195	0.45	71.91	43.30	46.52	62.32	1.1
SN4	0.1623326	0.314	0.304	-0.116	0.29	79.44	72.97	172.77	74.01	1.1
MS4	0.1638447	0.486	0.301	-0.097	0.32	43.05	44.76	114.56	42.91	2.6
2MN6	0.2400221	0.156	0.131	-0.018	0.14	137.73	52.93	353.17	70.26	1.4
3MK7	0.2833149	0.094	0.094	-0.040	0.10	73.47	91.76	102.19	102.57	1
M8	0.3220456	0.055	0.049	-0.016	0.05	99.07	66.96	312.41	62.09	1.3

Tabela 3.2: Média e variância para as componentes zonal (x) e meridional (y): da série temporal da corrente original, da corrente reconstruída por análise harmónica, e da corrente residual (diferença entre a série original e a série reconstruída).

	Média [cm/s]	Trend	Variância da série original [(cm/s) ²]	Variância da série prevista / reconstruída [(cm/s) ²]	Variância da série residual [(cm/s) ²]
x	-0.112	0	15.106	6.839	8.0866
y	0.316	0	76.0733	38.341	38.9759

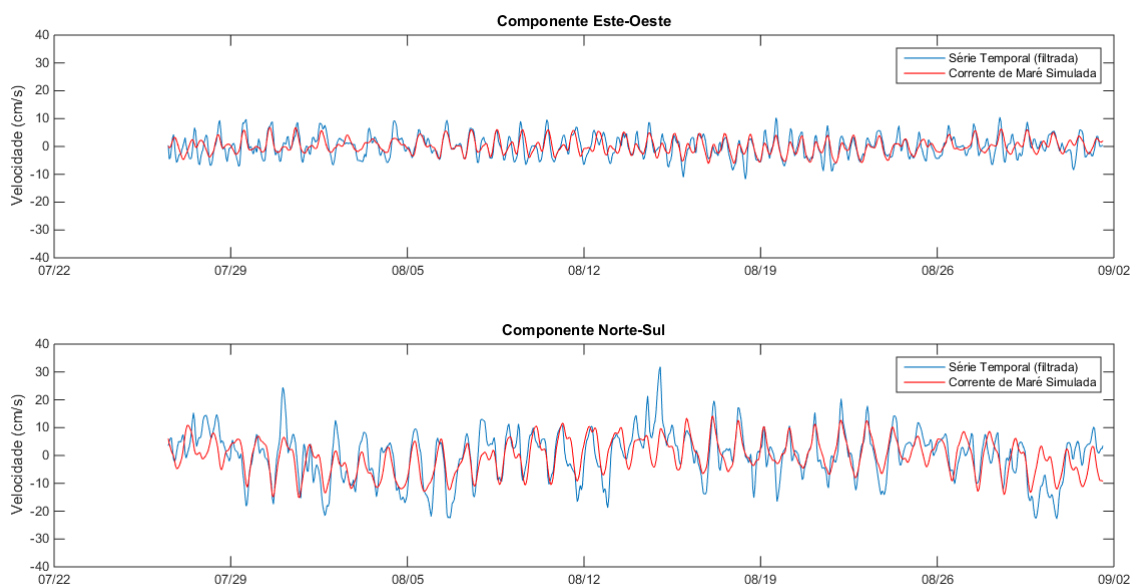


Figura 3.1: A vermelho mostram-se as componentes este-oeste (em cima) e norte-sul (em baixo) da série temporal da corrente de maré simulada por análise harmónica, utilizando o programa *t_tide*. A azul mostram-se as séries temporais originais correspondentes.

De modo a possibilitar uma comparação do resultado da análise harmónica com a série original, o vetor **pout** foi separado em componentes este-oeste e norte-sul. Isto fez-se calculando a parte real e a parte imaginária (respetivamente) de **pout**. Na Figura 3.1, mostra-se uma comparação entre a série temporal original (a azul) e a série temporal simulada (a vermelho) da corrente de maré.

Observa-se que a corrente de maré simulada tem oscilações com uma periodicidade aproximadamente diurna, sobretudo na sua componente meridional. No entanto, na costa ocidental da Península Ibérica, a onda de maré é habitualmente dominada pelas componentes semidiurnas M2 e S2, exceto no Promontório de Lisboa, que é o único local onde a componente diurna K1 tem uma importância comparável às componentes semidiurnas (Marta-Almeida & Dubert, 2006). Na zona de Sines esperar-se-ia então que as correntes de maré apresentassem uma periodicidade predominante semidiurna.

Esta diferença aparente entre os resultados obtidos e a situação normalmente verificada na costa ocidental Ibérica pode ser o resultado de diferentes fenómenos. Existem vários fatores que podem afetar a periodicidade dominante na corrente de maré, como por exemplo a proximidade à costa e a sua geometria e topografia na zona da plataforma continental. Todos estes fatores podem levar a que a onda de maré seja modificada junto à costa. Tal como já descrito na secção 2.1, isto pode dar origem a interações não lineares entre as várias frequências da onda, que podem amplificar as componentes diurnas da maré. No entanto, este resultado pode também dever-se a um problema inerente à análise harmónica. Esta separa sinais periódicos de sinais não periódicos, e deste modo determina qual a parte

de uma série temporal que se deve às forças da maré, pois estas são habitualmente as únicas forças com periodicidade. No entanto, para séries temporais relativamente curtas em que o vento seja um fator forçador importante, é possível que, se o vento tiver algum tipo de periodicidade, esta “contamine” a reconstrução da corrente de maré, isto é, seja erradamente interpretada pela análise harmónica como sendo devida à maré (Jay & Flinchem, 1999). Um estudo de Rosenfeld *et al.* (2009) na Baía de Monterey, na Califórnia, EUA (uma região com características oceanográficas semelhantes à costa ocidental de Portugal Continental, incluindo ventos de norte e *upwelling* durante o verão) apoia estas conclusões. Neste estudo compararam-se medições reais com os resultados de um modelo numérico em que apenas foi considerado o forçamento da maré. Observou-se que, em geral, a componente K1 da corrente tinha muito maior intensidade nas medições do que no resultado do modelo. Os autores concluíram (secção 7.3.1 do artigo) que os forçamentos meteorológicos, e em particular o vento, são a razão mais provável para esta discrepância.

Para estimar a corrente residual na praia da Oliveirinha, subtraiu-se a corrente de maré reconstruída pela análise harmónica (vetor **pout**) à série temporal original. O resultado é mostrado na Figura 3.2.

Observa-se que a corrente residual tem, tal como a corrente de maré, uma periodicidade aproximadamente diurna, sobretudo na sua componente norte-sul. Tal pode estar associado ao ciclo diurno do vento, resumidamente descrito na subsecção 2.1. Comparando as Figuras 3.1 e 3.2, nota-se que ambas as componentes da corrente residual têm velocidades em módulo superiores às da corrente de maré reconstruída. Tal pode sugerir que neste local o forçamento do vento tem uma maior contribuição para a corrente total que o forçamento da maré. Flinchem & Jay (1999) afirmam que o uso da análise harmónica na reconstrução da corrente de maré é mais difícil nos casos em que o forçamento devido à maré é menor que os forçamentos devidos a outros fatores. Note-se também que a intensidade do vento é variável consoante as condições meteorológicas. Estes fatores podem conferir uma maior incerteza à interpretação dos resultados apresentados nesta secção.

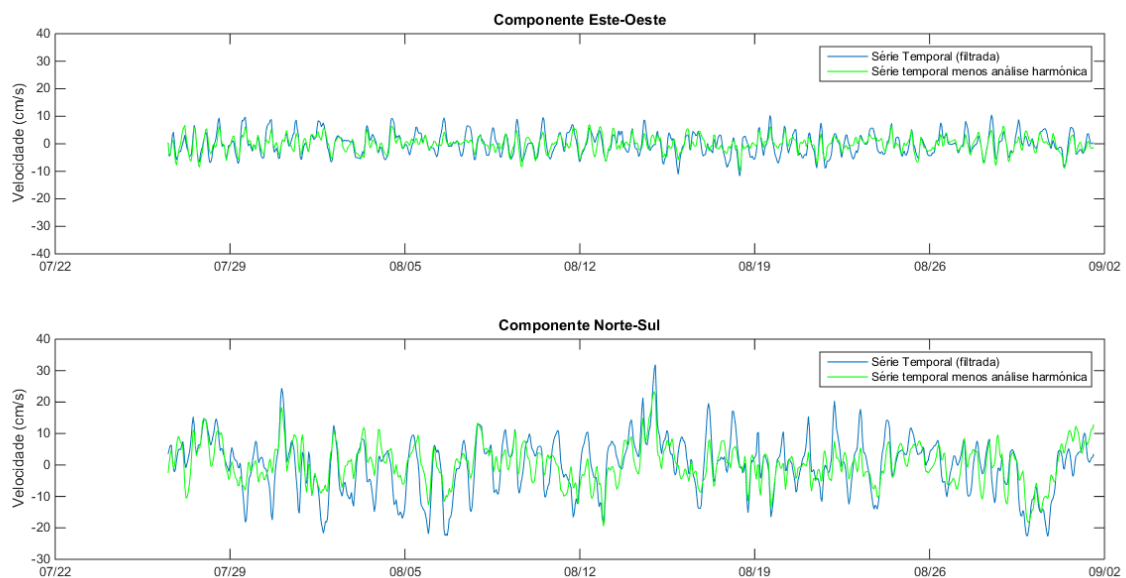


Figura 3.2: A verde mostra-se a série residual, ou seja, a série temporal que resulta do cálculo da diferença entre os dados de corrente originais (a azul) e a corrente de maré simulada pela análise harmónica (a vermelho na Fig. 3.1), separada em componentes este-oeste (em cima) e norte-sul (em baixo).

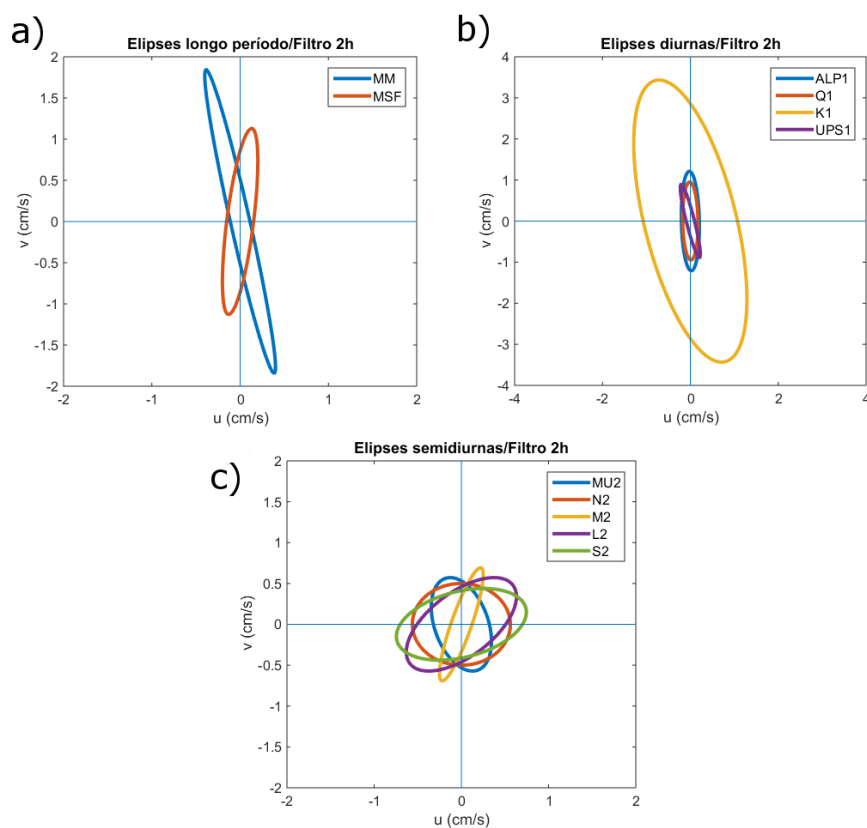


Figura 3.3: Elipses da corrente de maré para as componentes com $SNR > 1$: (a) as componentes de longo período MM (mensal) e MSF (quinzenal); (b) as 4 componentes diurnas; (c) as 5 componentes semidiurnas. Notar que a gama de valores nos eixos de (b) é o dobro daquela em (a) e (c).

Na Figura 3.3 mostram-se as elipses da corrente de maré das componentes: a) de longo período; b) diurnas; e c) semidiurnas, usadas na reconstrução do sinal. A componente da corrente de maré com maior intensidade, tal como calculada pela análise harmônica, é de longe a componente K1. Note-se que a gama de valores nos eixos da Figura 3.3 b) é o dobro da escala de 3.3 a) e c). De acordo com a teoria da maré de equilíbrio, K1 é a principal componente diurna; no entanto, a sua importância deveria ser menor que a da componente semidiurna M2, o que não corresponde ao resultado observado na Figura 3.3 c).

Na Figura 3.3 b), observa-se que o eixo maior da elipse da componente K1 ($\text{inc} = 102.88^\circ$) está aproximadamente alinhado com o eixo norte-sul, apresentando semelhanças com a orientação da costa na região de estudo (Figura 1.1). De notar ainda que a inclinação desta elipse é similar à direção predominante do vento (eixo nor-noroeste/su-sudeste), como foi discutido na subsecção 2.1 (*Enquadramento oceanográfico*). Em águas pouco profundas, quando as camadas limite superficial e bêntica se sobrepõem, espera-se que as correntes induzidas pelo vento tenham uma direção e sentido semelhante ao sentido predominante do vento (Talley *et al*, 2001).

Comparando as Figuras 3.3 a) e 3.3 c), observa-se que a corrente gerada pelas componentes de longo período tem uma velocidade superior (em módulo) à corrente associada às componentes semidiurnas. Este resultado é bastante diferente do previsto pela teoria da maré de equilíbrio, na qual as constituintes de longo período têm uma importância relativamente pequena para a força geradora da maré, sobretudo quando comparadas com as constituintes semidiurnas (ver Tabela 2.1).

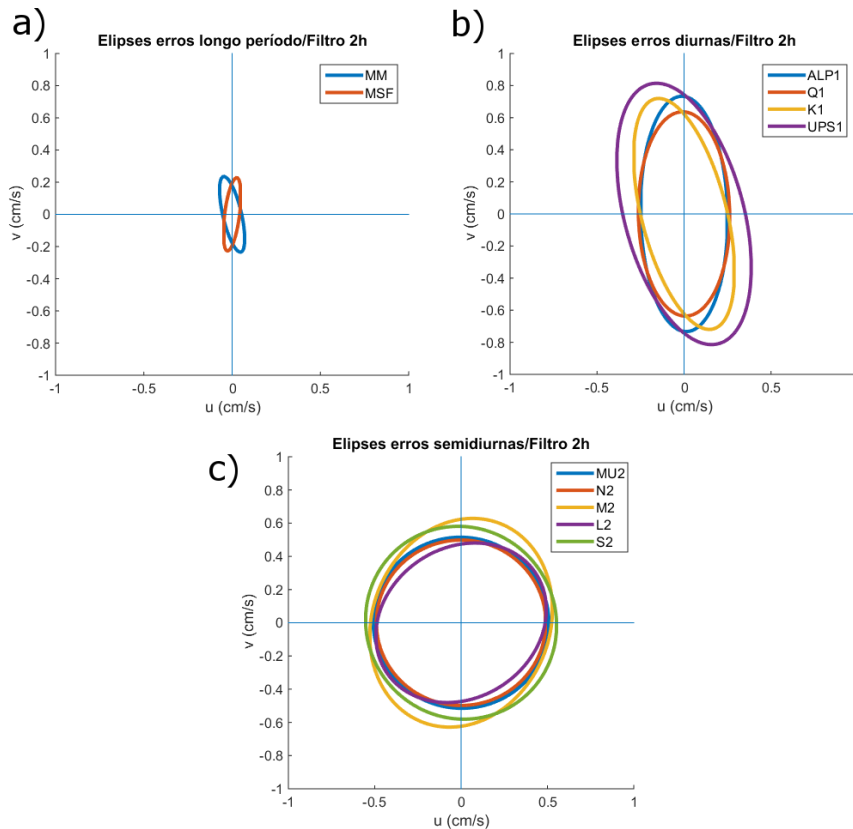


Figura 3.4: Elipses de erro da corrente de maré, para as componentes com $SNR > 1$: (a) de longo período; (b) diurnas; (c) semidiurnas. No gráfico representam-se as elipses cujos eixos maior e menor (**emaj** e **emin**) são, respetivamente, os intervalos de confiança a 95% dos eixos maior e menor das elipses de corrente.

Para todas as elipses mostradas na Figura 3.3 exceto na elipse associada à componente de longo período MM (mensal lunar), o vetor corrente roda no sentido anticiclónico (horário). A teoria das ondas de Kelvin prevê que, em mar aberto, as correntes de maré rodem no sentido ciclónico (Boon, 2011). No entanto, na zona da plataforma continental, o sentido de rotação da corrente tem uma variabilidade muito maior; as irregularidades batimétricas e topográficas que aí se verificam podem inverter o sentido da rotação da corrente (Marta-Almeida & Dubert, 2006). É também importante ter em conta que, para todas as componentes resolvidas pela análise harmónica com uma razão sinal-ruído superior a 1, exceto MM, MSF, K1 e M3, os limites do intervalo de confiança a 95% para o eixo menor da elipse de corrente (**emin**, na Tabela 3.1) são maiores em módulo do que o próprio valor deste eixo (**minor**), cujo sinal descreve o sentido de rotação do vetor corrente. Isto confere uma incerteza ao sentido de rotação de quase todas as componentes da corrente aqui calculadas.

Na Figura 3.4, mostram-se as elipses de erro das componentes apresentadas na Figura 3.3. Todos os gráficos da Figura 3.4 têm a mesma escala. As duas componentes de longo período têm erros relativamente pequenos (Figura 3.4 a). Estas são as componentes com melhor razão sinal-ruído (SNR) na análise harmónica. Em grande parte, tal deve-se à duração da série temporal utilizada na reconstrução da corrente de maré ser 37 dias, ou seja, pouco superior a um mês. A identificação e separação das constituintes MM e MSF, com períodos aproximadamente mensal e quinzenal respetivamente, pode estar afetada por erros de *aliasing* (empastelamento). Estes erros devem-se a métodos utilizados na análise harmónica, na qual está implícita uma suposição que o registo é periódico; no entanto as séries temporais de dados reais podem não o ser. Esta suposição pode dar origem a falsos “períodos” da ordem de grandeza da duração da série temporal a ser analisada (Emery & Thomson, 2001). Para além dos

erros de *aliasing*, podem também existir forçamentos meteorológicos com periodicidades de várias semanas, como por exemplo bloqueios atmosféricos (Pelly, 2001). Como as correntes de maré de longo período são teoricamente, muito pouco intensas (ver Tabela 2.1), a análise harmônica pode não conseguir separar, para estas componentes, os forçamentos meteorológicos do forçamento devido à maré (Emery & Thomson, 2001).

As constituintes diurnas da corrente de maré têm uma maior incerteza ao longo da sua componente meridional em relação à componente zonal (Figura 3.4 b). Este resultado é esperado devido à maior intensidade da corrente na direção norte-sul. As constituintes semidiurnas (Figura 3.4 c) têm elipses de erro semelhantes entre si e aproximadamente circulares, sendo mais isotrópicas comparadas com as elipses de erro das constituintes diurnas.

Os intervalos de confiança da inclinação do eixo maior da elipse (**einc**), não mostrados no gráfico, são, em certos casos, bastante grandes, particularmente para as componentes com periodicidades semidiurnas ou menores. Todas as componentes semidiurnas têm valores de **einc** superiores a 45° . A componente N2 tem o maior valor de **einc** entre as componentes incluídas na análise (136.48°). Existe então uma incerteza relevante, no que toca à direção principal da corrente de maré semidiurna.

Na Figura 3.5, estão representadas as elipses de corrente das componentes com periodicidades inferiores a $\frac{1}{2}$ dia. Note-se que a escala da figura 3.5 c) é metade da escala de 3.5 a) e b).

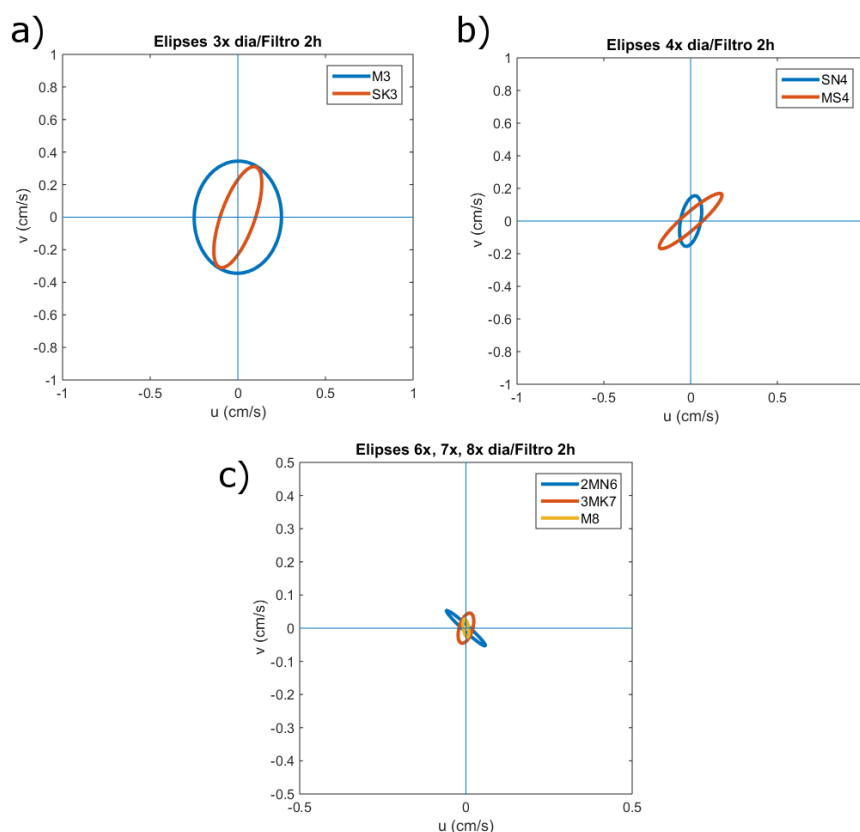


Figura 3.5: Elipses da corrente de maré para (a) as componentes com periodicidade ≈ 3 vezes por dia; (b) as componentes com periodicidade ≈ 4 vezes por dia; (c) as componentes com periodicidades ≈ 6 ou mais vezes por dia.

Tabela 3.3: Razões de amplitudes entre diferentes componentes da corrente de maré, arredondadas à unidade.

Componente	Razão com K1	Razão com Q1	Razão com M2
M3	~12%	~44%	~58%
MS4	~7%	~26%	~34%
2MN6	~2%	~8%	~11%

A teoria da maré de equilíbrio não prevê componentes com periodicidades inferiores à semidiurna, logo é necessária outra maneira de quantificar esta parte do resultado da análise harmónica. Neste estudo escolheu-se fazer uma razão entre as amplitudes de algumas destas componentes e as amplitudes de algumas das componentes com períodos maiores, cujas elipses já tinham sido apresentadas na Figura 3.3. A amplitude definiu-se como $C = \sqrt{A^2 + B^2}$ em que A e B são os semieixos maior e menor da elipse, respetivamente. O quadrado da amplitude de uma componente da corrente é proporcional à sua energia (Marta-Almeida & Dubert, 2006).

Compararam-se as amplitudes das componentes M3, MS4 e 2MN6 (Figura 3.5) com as amplitudes da componente semidiurna M2 e de duas componentes diurnas, K1 e Q1. Na escolha destas frequências como pontos de referência para as comparações, teve-se em conta a sua importância para a teoria da maré de equilíbrio. Considerou-se também a razão sinal-ruído (SNR) das componentes a serem comparadas. Os resultados são apresentados na Tabela 3.3. Observando esta tabela e comparando os resultados obtidos com os resultados de um exemplo incluído em Pugh (1987), é de notar que a razão entre as amplitudes de M3/M2 é bastante maior no presente estudo. Na Fig. 4.5 de Pugh que ilustra as elipses de corrente do exemplo, as razões entre as amplitudes das componentes com períodos de 3 vezes por dia e a componente M2 parecem não ultrapassar 30%. Na Praia da Oliveirinha, a razão entre as amplitudes de M3 e M2 obtida pela AH é de aproximadamente 58%. Tem, no entanto, de se ter em conta que o exemplo de Pugh baseia-se em dados registados no farol de Inner Dowsing, no Mar do Norte, logo as importâncias relativas de diferentes componentes da onda de maré entre os dois locais podem não ser exatamente iguais. No entanto, dado que ambas as medições foram realizadas em zonas adjacentes ao Oceano Atlântico Norte e em águas pouco profundas (mais concretamente na plataforma continental), pode-se esperar que exista uma semelhança genérica entre as correntes de maré nestes locais.

No artigo de Foreman e Neufeld (1991) está também disponível um exemplo de um estudo realizado em Victoria, Canadá (localizada numa zona adjacente ao Oceano Pacífico, também na plataforma continental) no qual são comparadas as amplitudes de várias componentes da maré, incluindo algumas componentes *shallow water* (SW). Neste exemplo foram obtidas amplitudes da elevação da maré muito semelhantes (sempre cerca de 5 cm) para as principais componentes diurnas e semidiurnas (DS), incluindo K1, Q1 e M2. As componentes SW com maiores amplitudes em Victoria foram MK3 (≈ 2 cm) e MO3 (≈ 1.8 cm) com amplitudes de cerca de 36-40% das componentes DS mais importantes. Estas razões estão um pouco mais próximas daquelas obtidas em Sines; no entanto, continuam a ser menores. A componente MS4, no exemplo de Foreman e Neufeld tem amplitudes de cerca de 1 cm ($\approx 20\%$ de DS); e a amplitude de 2MN6 é de 0.8 cm ($\approx 16\%$ de DS). Verifica-se (Tabela 3.3) que a razão entre MS4 e as componentes DS é ligeiramente maior em Sines relativamente a Victoria; no entanto, a razão entre 2MN6 e as mesmas componentes é mais elevada no exemplo de Foreman e Neufeld. Os resultados destas comparações entre amplitudes sugere que em regiões costeiras pode haver uma variabilidade grande nas amplitudes das componentes SW.

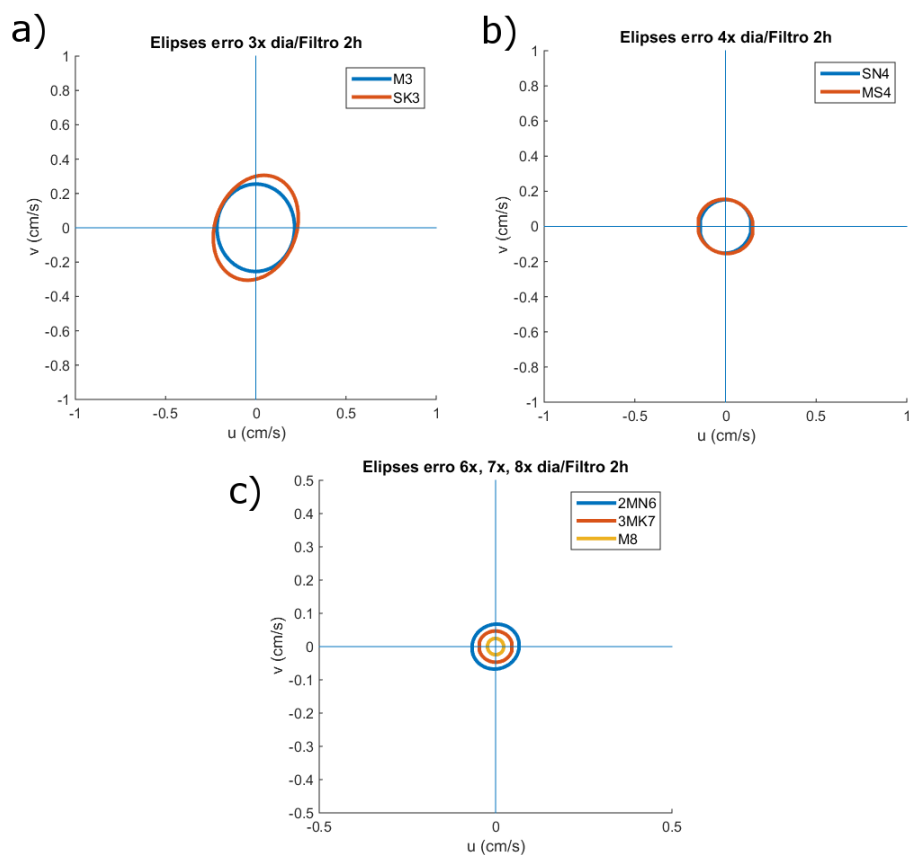


Figura 3.6: Elipses de erro da corrente de maré, para: (a) as componentes de periodicidade ≈ 3 vezes por dia; (b) as componentes de periodicidade ≈ 4 vezes por dia; (c) as componentes com periodicidade 6 ou mais vezes por dia. No gráfico representam-se as elipses cujos eixos maior e menor (**emaj** e **emin**) são, respetivamente, os intervalos de confiança a 95% dos eixos maior e menor das elipses de corrente.

Quanto às elipses de erro das componentes com períodos inferiores ao semidiurno, elas são apresentadas na Figura 3.6. Mais uma vez, a escala da figura 3.6 c) é metade da escala de 3.6 a) e b). As elipses de erro da Figura 3.6 têm dimensões semelhantes às elipses de corrente para as componentes com períodos inferiores a $\frac{1}{2}$ dia (Figura 3.5), o que aponta para uma incerteza importante quanto ao resultado da análise harmónica relativo a estas componentes.

3.2. Modelo numérico TPXO

Para conferir maior objetividade à discussão dos resultados da análise harmónica, recorreu-se ao modelo TPXO (versão 9.1). Este é um modelo global de um oceano homogéneo com topografia realista, que permite obter soluções numéricas para a onda de maré barotrópica (gerada diretamente pelas forças astronómicas). Utilizando o modelo obtiveram-se parâmetros das elipses de corrente de 7 constituintes da maré (M2, S2, N2, K1, Q1, MS4 e MM) para a localização do correntómetro S4 ao largo da Praia da Oliveirinha (latitude = $37^{\circ} 53' 12.96''$ N; longitude = $8^{\circ} 48' 16.56''$ W). De entre as constituintes que o modelo permite resolver, estas tinham sido resolvidas com sucesso ($\text{SNR} > 1$) na análise harmónica anteriormente realizada. O *output* do modelo está resumido na Tabela 3.4. Na Figura 3.7 estão ilustradas as elipses das componentes: (a) diurnas e (b) semidiurnas, tal como calculadas pelo modelo.

Tabela 3.4: Output do modelo TPXO para o local do correntómetro S4. De entre as componentes disponíveis neste modelo, foram escolhidas aquelas que a análise harmónica resolveu com SNR > 1.

Constituinte	Eixo maior [cm/s]	Eixo menor [cm/s]	Inclinação [°]	Fase [°, GMT]
M2	3.3643	1.7129	135.44	92.57
S2	1.3172	0.5792	137.97	125.95
N2	0.6634	0.3567	139.70	79.21
K1	0.3493	0.0921	106.63	61.55
Q1	0.0662	0.0253	120.79	248.58
MM	0.0007	0.0000	125.48	276.11
MS4	0.0398	0.0079	143.96	342.94

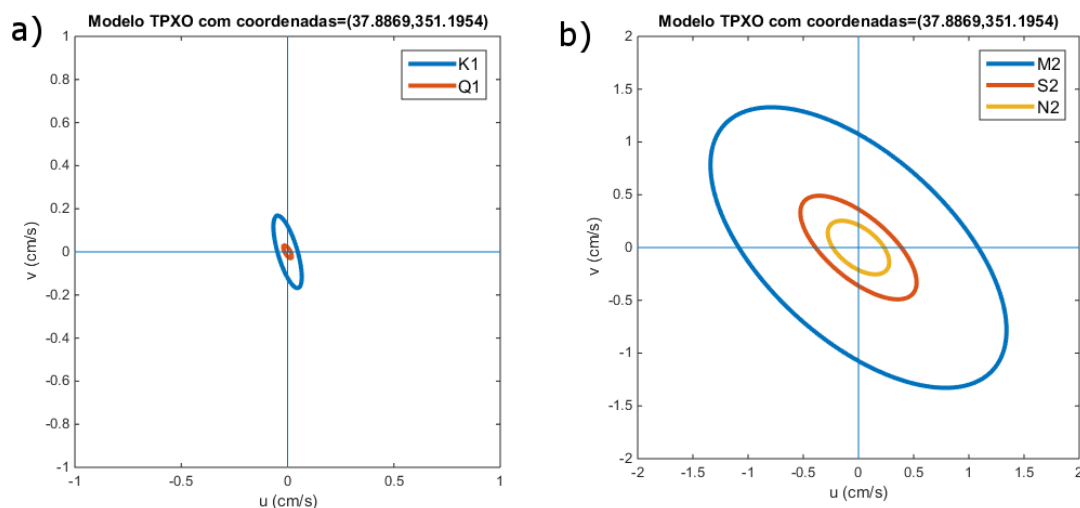


Figura 3.7: Output do modelo TPXO para a Praia da Oliveirinha. Elipses de corrente das componentes: a) diurnas (K1, Q1) e b) semidiurnas (M2, S2, N2). Note-se a diferença entre as escalas dos dois gráficos.

Comparando o resultado do modelo TPXO para as componentes diurnas K1 e Q1 (Figura 3.7a) com os resultados da análise harmónica (AH) (Figura 3.3b), notam-se diferenças evidentes. A magnitude do eixo maior aqui obtida para K1, 0.3493 cm/s, é apenas cerca de 5% da magnitude do eixo maior (7.027 cm/s) obtida para a mesma componente na AH. De realçar também que no resultado do modelo a componente K1 é menos intensa que as três componentes semidiurnas, M2, S2 e N2. Quanto a Q1, a razão entre os eixos maiores da sua elipse obtidos no modelo TPXO (0.0662 cm/s) e na análise harmónica (1.894 cm/s) é inferior a 4%.

Quanto às componentes semidiurnas, existem também diferenças entre os resultados no modelo barotrópico e na prática: a magnitude do eixo maior da elipse de corrente de M2 no modelo (3.3643 cm/s) é mais do dobro do valor obtido na AH (1.451 cm/s). O valor do eixo maior de N2 calculado pelo modelo (0.6634 cm/s), por outro lado, é aproximadamente 60% daquele obtido na AH (1.124 cm/s). Para a componente S2, as diferenças são menores (1.3172 cm/s no modelo TPXO vs. 1.531 cm/s na AH).

A elipse da componente MS4 obtida com o modelo (não mostrada) tem eixos com uma ordem de grandeza menores que os obtidos com a AH. Nos resultados do modelo TPXO a razão entre as amplitudes de MS4 e M2 é apenas cerca de 1%, em contraste com cerca de 34% na AH. Este resultado, no entanto, pode estar próximo da realidade, se se tiver em conta o facto de que as *shallow water components* resultam de interações entre as componentes astronómicas que acontecem tipicamente em regiões costeiras (Foreman & Henry, 1989); quanto menor for a profundidade do local, mais intensas deverão ser estas interações. Em geral, os modelos numéricos globais não têm em conta muitos destes efeitos verificados em regiões de águas pouco profundas, dada a dificuldade de os resolver adequadamente (Lamas, 2018).

A maior diferença entre os resultados da AH e do modelo, no entanto, verifica-se para a elipse da componente de longo período MM, que é a segunda maior elipse no resultado da AH (eixo maior = 3.761 cm/s) e no entanto é praticamente inexistente no *output* do modelo (eixo maior = 0.007 cm/s). É de realçar que o eixo menor da elipse de MM obtida com o modelo foi zero; esta corrente de longo período aparenta ser tão pouco intensa que a sua magnitude é inferior à precisão do modelo.

As inclinações das elipses de corrente no modelo TPXO foram mais regulares do que na AH. As 7 elipses no *output* do modelo têm todas inclinações entre 106° e 143° em relação a Este. Para as duas componentes diurnas, as inclinações das elipses são bastante semelhantes entre o modelo e a AH (ver Figuras 3.7a) e 3.3b). No resultado do modelo, as elipses das três componentes semidiurnas têm inclinações muito semelhantes entre si (Figura 3.7 b); no entanto, no resultado da AH, as inclinações destas elipses são altamente variáveis (71.96° para a componente M2, 15.71° para S2 e 179.12° para N2).

O sentido de rotação da corrente, determinado pelo sinal do eixo menor das elipses, foi sempre ciclónico nos resultados do modelo, exceto na componente MM em que o eixo menor, tal como já mencionado, foi nulo. Isto é coerente com a teoria da onda de maré, mas diferente do resultado da AH.

Tal como discutido anteriormente (secção 2.3.1.1), as diferenças no sentido de rotação podem ser devidas às interações não lineares entre frequências, que se verificam em águas pouco profundas. As discrepâncias entre as magnitudes da corrente observadas na AH e no modelo são mais difíceis de justificar deste modo; a costa poderia ter alguma influência, no entanto as diferenças entre modelos e observações não são habitualmente tão grandes, mesmo em estudos de regiões costeiras (ver por exemplo os estudos de Marta-Almeida & Dubert, 2006 ou Vindenes *et al*, 2018). No entanto, a versão 9.1 do modelo TPXO tem uma resolução espacial de cerca de 1/6 de grau de latitude (ver *site* do modelo TPXO, na secção 6), o que corresponde a cerca de 19 km; esta resolução tem uma escala espacial muito superior àquela em que se dão os fenómenos costeiros já abordados (< 1 km).

3.3. Análise por *wavelets*

Nesta secção, para cada uma das componentes do vento bem como da corrente, são apresentados 4 gráficos, que ilustram os resultados obtidos com a aplicação da análise por *wavelets*. Os 4 gráficos representam:

a) a série temporal $\mathbf{x}(t)$;

b) o espectro de potência de onduleta (*wavelet power spectrum*), definido como $|W_n(s)|^2$ ou seja, a norma quadrática da transformada de *wavelet* da série temporal s .

c) o espectro de onduleta global (*global wavelet spectrum*). Em cada ponto da série, existe um *wavelet power spectrum* local. A média de todos estes espectros locais é o *global wavelet spectrum* (eq. 22 de Torrence & Compo, 1998).

d) *scale-averaged wavelet power*, que é a média ponderada do espectro de potência de *wavelet* entre um intervalo de períodos (escalas) $[s_1, s_2]$ definido pelo utilizador, tal como definida pela equação (3.1) (Torrence & Compo, 1998, eq. 24). Este intervalo não é arbitrário, visto que deve incluir a maior parte da energia das oscilações observadas no espectro de potência descrito em b).

$$\overline{W_n}^2 = \frac{\delta j \delta t}{C_\delta} \sum_{j=j_1}^{j_2} \frac{|W_n(s_j)|^2}{s_j} \quad (3.1)$$

Nesta equação s_j é o parâmetro de escalamento correspondente a cada valor j no intervalo de escalas $[s_1, s_2]$, δj é o tamanho da janela (também variável em função do instante no tempo), δt é o intervalo de amostragem da série temporal e C_δ é um coeficiente empírico dependente da forma da *mother wavelet* (para a onduleta de Morlet, $C_\delta = 0.776$.)

3.3.1. Vento

Para o sinal do vento, a taxa de amostragem (intervalo entre medições consecutivas) é $dt = 10 \text{ min}$. O período mínimo s_0 escolhido foi $4*dt = 40 \text{ min}$. O espaçamento entre escalas escolhido foi $dj = 0.125$. O parâmetro j_1 foi escolhido com base na duração da série, da forma: $j_1 = \text{pot}2\text{max}/dj$, em que $\text{pot}2\text{max}$ é o logaritmo de base 2 do quociente entre o período máximo (definido como metade da duração da série) e o período mínimo s_0 .

Para determinar o parâmetro $\text{lag}1$ utilizou-se, como já mencionado, o resultado da função **autocorr** do programa MATLAB e em particular a autocorrelação lag-1, que para a componente meridional do vento foi $\text{lag}1 = 0.9841$ e para a componente zonal, $\text{lag}1 = 0.9753$.

Ambas as componentes do vento (zonal e meridional) foram normalizadas, ou seja, foram subtraídas da sua média e divididas pelo seu desvio padrão. A normalização foi feita de modo a que as escalas dos gráficos de ambas as componentes pudessem ser iguais, facilitando assim a visualização e comparação dos resultados.

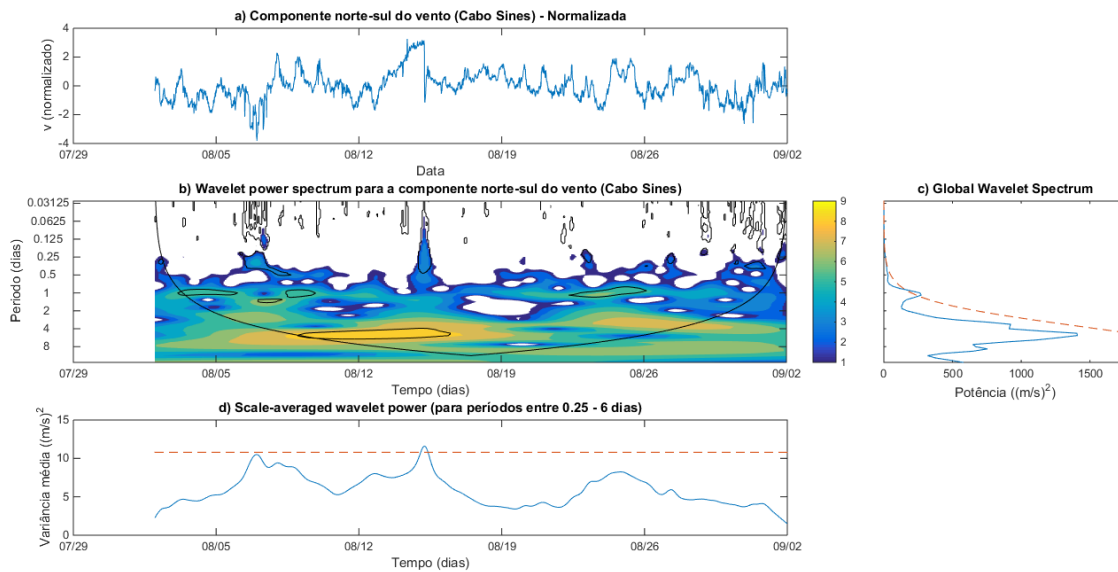


Figura 3.8: Resultados da análise por wavelets da série temporal do vento (componente meridional, centrada e dividida pelo seu desvio padrão). A linha preta em forma de ogiva no gráfico b) é o cone de influência, abaixo do qual os resultados não devem ser considerados. Os restantes contornos a preto em b) e as linhas a tracejado vermelhas em c) e d) são os níveis de significância a 95% dos espectros de potência (o seu cálculo está explicado na secção 2.3 - Métodos).

A série temporal do vento meridional mostra-se na Figura 3.8 a), juntamente com o seu espectro de potência de *wavelet*, na Figura 3.8 b). Nota-se que as oscilações de maior amplitude no espectro (representadas a amarelo) têm frequências que correspondem a períodos de aproximadamente 4 a 6 dias. Este pico é também visível no espectro de *wavelet* global (Figura 3.8 c). Fenómenos naturais com períodos semelhantes, que poderão explicar a presença deste pico, são os processos de escala sinóptica. O padrão do vento é influenciado por estes processos, que têm uma duração típica da ordem de alguns dias (inferior a uma semana) nas latitudes médias. Também se observa um pico, embora de menor potência, nos períodos de cerca de 1 dia. Tal pode ser devido ao ciclo diurno do vento.

Para o espectro da potência média integrada (Figura 3.8 d), escolheu-se integrar entre 0.25 e 6 dias, tendo em conta a gama de períodos observada em ambas as componentes do vento, bem como no sinal da corrente (ver as subsecções seguintes). Teve também de se ter em conta a localização do “cone de influência” (*cone of influence*) que resulta da adição de zeros (*padding*) às extremidades da série. Assim, haverá erros no cálculo das transformadas para os dados perto do início e do fim das séries temporais. O cone de influência (assinalado por uma linha preta em forma de ogiva na Figura 3.8 b) indica as zonas em que existem estes erros. A parte do espectro que estiver por baixo do cone deverá ser ignorada.

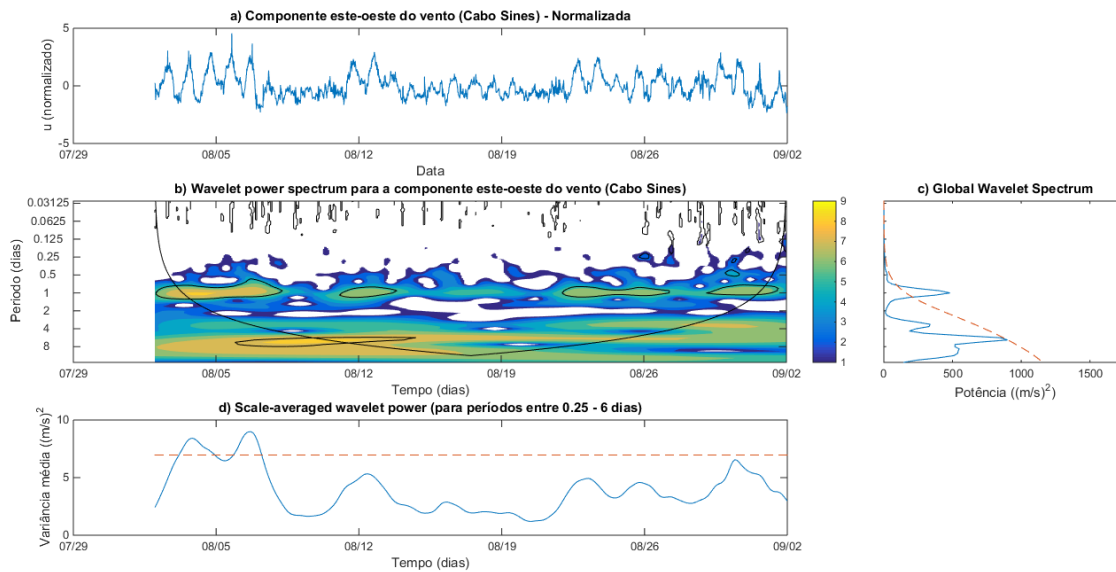


Figura 3.9: Resultados da análise por wavelets da série temporal do vento (componente zonal, centrada e dividida pelo seu desvio padrão). Os gráficos (a), (b), (c) e (d) são análogos aos da figura 3.8.

Na componente zonal do vento (Figura 3.9 a), os espectros têm algumas semelhanças com os observados na componente meridional. No entanto, a potência da componente zonal é inferior à da componente meridional (ver Figuras 3.9 b e 3.9 c). Esta diferença entre ordens de grandeza da potência das componentes do vento é ainda maior nos dados originais (não normalizados). Tal significa que o sinal do vento está concentrado na direção norte-sul, o que é esperado, tendo em conta o regime de nortada (já discutido na subsecção 2.1 – *Enquadramento oceanográfico*).

Quanto aos períodos/frequências predominantes, existe um pico distinto com um período de 1 dia. Supõe-se que a existência de um ciclo diurno no vento zonal seja devida ao sistema de brisa terrestre/marítima (descrito em mais detalhe na subsecção 2.1) induzido pelo gradiente de temperatura entre a terra e o mar. No local em estudo este gradiente está aproximadamente alinhado com a direção zonal.

3.3.2 Corrente

A taxa de amostragem do sinal de corrente é $dt = 3 \text{ min}$. O período mínimo foi escolhido como $s0 = 13 * dt = 39 \text{ min}$, de modo a que as escalas mínimas dos espectros da corrente e do vento fossem o mais semelhantes possível entre si, facilitando assim a comparação entre os vários *outputs*. Os parâmetros dj e $j1$ foram definidos da mesma forma que anteriormente (ver secção 3.2.1).

O parâmetro $lag1$ foi definido também como anteriormente, a partir de valores obtidos com a função **autocorr**; para a componente meridional da corrente usou-se $lag1 = 0.9869$ e para a componente zonal da mesma, $lag1 = 0.9368$.

As componentes meridional e zonal da corrente foram normalizadas, exatamente como as componentes do vento o tinham sido anteriormente.

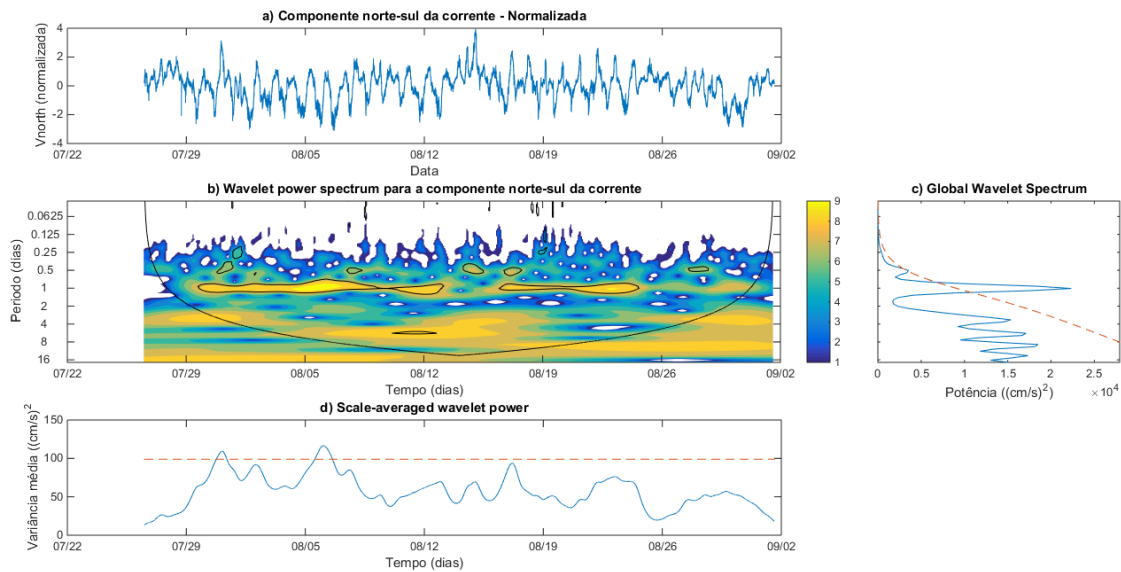


Figura 3.10: Resultados da análise por wavelets da série temporal da corrente (componente meridional, centrada e dividida pelo seu desvio padrão). Os gráficos (a), (b), (c) e (d) são análogos aos das Figuras 3.8 e 3.9. O gráfico (d) obteve-se integrando o gráfico (b) para períodos entre 0.25 e 4 dias.

Na componente meridional da corrente (Figura 3.10 a), as oscilações predominantes têm períodos de cerca de 1 dia, de acordo com os espectros nas Figuras 3.10 b) e c). Também existem oscilações de alguma significância com períodos de $\frac{1}{2}$ dia e cerca de 4 dias. No espectro de potência média integrada (Figura 3.10 d), a gama de períodos escolhida foi de 0.25 a 4 dias, para ambas as componentes da corrente.

Supõe-se que o pico semidiurno esteja relacionado com a oscilação (também semidiurna) de maré. Os picos associados a períodos de aproximadamente 1 dia e cerca de 4 dias já tinham sido observados no sinal do vento. É possível que estes mesmos picos existam também nas séries da corrente devido ao facto de o vento impor um forçamento considerável nas correntes observadas à superfície na zona de Sines. Outro fator contribuinte para as oscilações diurnas poderá ser a componente diurna da onda de maré. Esta é menos predominante que a componente semidiurna da maré, mas também tem relevância.

Um fenómeno periódico natural que não pode ser ignorado neste contexto são as oscilações inerciais. O período inercial é dado por $T = 2\pi/f$ em que $f = 2\Omega\sin\varphi$ é o parâmetro de Coriolis e $\Omega = 7.292 \times 10^{-5}$ rad/s é a velocidade angular de rotação da Terra. À latitude da praia da Oliveirinha ($\varphi=37.893^\circ\text{N}$) as oscilações inerciais têm um período de 19.5 horas. A existência destas oscilações pode dificultar a separação entre as componentes de maré e outras componentes da corrente (Flinchem & Jay, 1999). Nos espectros de wavelets, e também nos espectros de Fourier apresentados na secção 2.2, o período inercial é difícil de distinguir dos períodos diurno e semidiurno.

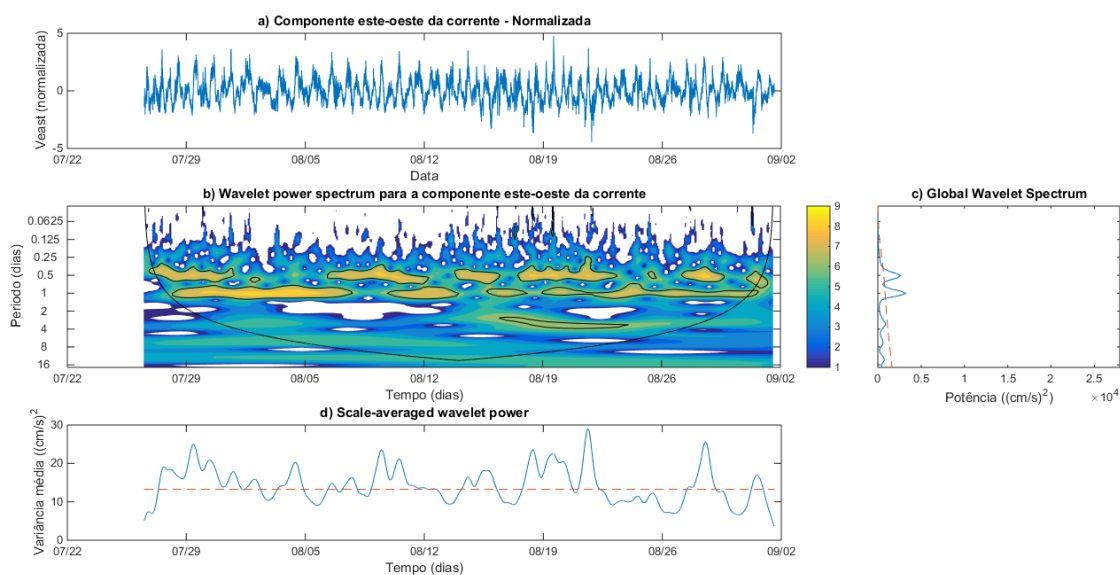


Figura 3.11: Resultados da análise por wavelets da série temporal da corrente (componente zonal, centrada e dividida pelo seu desvio padrão). Os gráficos (a), (b), (c) e (d) são análogos aos das Fig. 3.8 e 3.9. O gráfico (d) obteve-se integrando o gráfico (b) para períodos entre 0.25 e 4 dias.

Na componente zonal da corrente (Figura 3.11 a), nota-se que os valores das potências, no eixo horizontal do espectro de potência global (Figura 3.11 c) são uma ordem de grandeza inferiores na componente zonal da corrente, comparativamente à componente meridional (Figura 3.10 c). Isto sugere que a corrente oceânica ao largo de Sines está concentrada na direção norte-sul. Este é um resultado esperado, tendo em conta os seguintes fatores: o padrão típico do campo do vento no Verão (nortada) na costa oeste de Portugal Continental, o alinhamento da linha de costa local na direção Norte-Sul, e a forte relação observada entre o vento e a corrente.

Os períodos das oscilações predominantes no *wavelet power spectrum* (Figura 3.11 b) são $\frac{1}{2}$ dia e 1 dia. Supõe-se que as oscilações semidiurnas estejam relacionadas em grande parte com a componente semidiurna da maré. As oscilações diurnas estão muito provavelmente associadas ao ciclo de brisas terrestre/marítima que está presente sobretudo nesta componente, bem como à componente diurna da onda de maré.

3.4. Repetição da análise harmónica

Tendo em conta os resultados da análise por onduletas, decidiu-se repetir a aplicação da análise harmónica para um período de tempo mais curto. Escolheu-se a semana de 12 a 19 de agosto, devido ao facto de a energia da corrente na banda diurna não ter sido tão intensa nestes dias, relativamente ao resto do período estudado (ver Figuras 3.10 e 3.11). No *stick plot* do vento (Figura 2.2) também se observa que o vento é mais calmo em meados de agosto (aproximadamente entre os dias 8 e 23) do que no resto do registo, tendo neste período uma intensidade que raramente ultrapassa os 6 m/s.

Esta nova aplicação da análise harmónica foi realizada nas mesmas condições da anterior (utilização de filtro de média corrida de 2h, subamostragem a 1h e inclusão da componente *shallow water* M10). Os parâmetros de entrada (exceto o primeiro ponto da série) foram também os mesmos que anteriormente.

De seguida, na Tabela 3.5 apresentam-se os resultados principais desta análise. Foram resolvidas 9 componentes, das quais 7 apresentam um SNR maior ou igual a 1. Apenas se resolveu uma componente diurna (K1) e uma componente semidiurna (M2). Devido à menor duração do registo, não é possível separar um grande número de frequências nas bandas diurna e semidiurna.

Tabela 3.5: Componentes da análise harmónica realizada com os dados de corrente da Praia da Oliveirinha relativos à semana entre 12 e 19 de agosto de 2012.

tide	freq [h ⁻¹]	major [cm/s]	emaj [cm/s]	minor [cm/s]	emin [cm/s]	inc [°]	einc [°]	pha [°]	epha [°]	SNR [adim.]
K1	0.0417807	6.434	3.953	-2.052	1.38	105.29	17.09	305.66	41.02	2.6
M2	0.0805114	2.979	2.528	-1.045	2.42	50.69	72.88	80.03	66.78	1.4
M4	0.1610228	0.776	0.690	-0.236	0.73	70.91	68.95	84.47	86.77	1.3
2SK5	0.2084474	0.303	0.231	-0.155	0.25	32.13	79.86	101.92	56.66	1.7
M6	0.2415342	0.420	0.267	-0.023	0.20	89.32	34.93	241.90	35.25	2.5
3MK7	0.2833149	0.407	0.257	-0.063	0.31	53.79	65.27	107.27	52.17	2.5
M8	0.3220456	0.191	0.130	-0.011	0.13	106.21	46.60	308.05	41.47	2.1

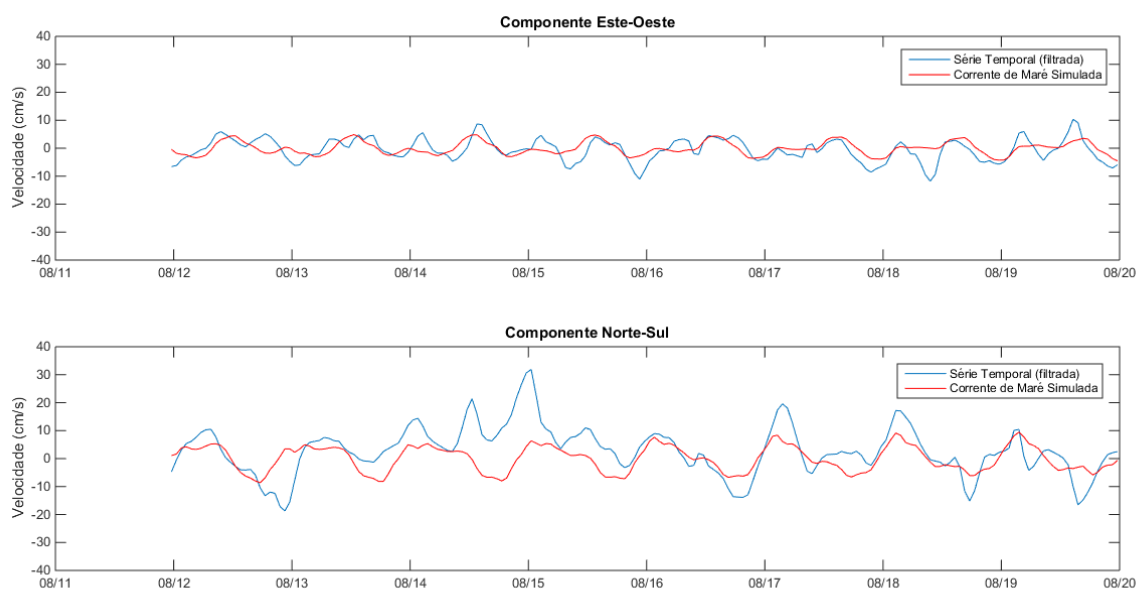


Figura 3.12: Corrente de maré simulada (a vermelho) para o período entre 12 e 19 de agosto de 2012, utilizando os dados de corrente da Praia da Oliveirinha para o mesmo período (a azul).

Na Figura 3.12 mostra-se a corrente de maré simulada correspondente a estes dados. Na Figura 3.13 mostram-se as elipses de corrente de K1 e M2; estas duas componentes explicam a maior parte da variabilidade da corrente de maré calculada nesta análise.

Como se pode observar, a periodicidade predominante da corrente de maré simulada continua a ser diurna, em particular para a componente norte-sul. Observa-se também na Figura 3.12 um ciclo semidiurno, ainda que de menor amplitude. Tal é diferente do resultado previsto pelo modelo TPXO. No entanto, a razão entre os eixos maiores das elipses das componentes M2 (2.979 cm/s) e K1 (6.434

cm/s) é agora de cerca de 46%, contra cerca de 20% no resultado da análise harmónica realizada em toda a série temporal. Tenha-se também em conta que a razão sinal-ruído da componente K1 é agora de 2.6, comparativamente a 23 na análise harmónica anterior. Por outro lado, a SNR de M2 manteve-se praticamente inalterada (1.3 contra 1.4).

É de notar que, na elipse de corrente da componente K1, a inclinação (105.29°) e a fase (305.66°) têm valores muito semelhantes aos obtidos na análise harmónica anterior, na qual se tinha obtido $\mathbf{inc} = 102.88^\circ$ e $\mathbf{pha} = 309.94^\circ$. No caso da elipse de M2, a diferença entre inclinações é um pouco maior que anteriormente ($\mathbf{inc} = 50.69^\circ$ nesta análise contra 71.96° na primeira análise), no entanto os erros também são maiores nesta análise – aqui, o erro da inclinação de M2 ($\mathbf{einc} = 72.88^\circ$) é superior ao próprio valor da inclinação.

Um estudo de Rosenfeld *et al.* (2009) realizado na região da baía de Monterey (Califórnia, EUA) afirma que a componente K1 pode sofrer a influência do ciclo diurno do vento. Os autores observaram que a componente K1 das correntes oceânicas, medidas em diferentes locais da baía, foi geralmente mais intensa do que a componente K1 nas mesmas correntes previstas pelo modelo numérico utilizado (ICON). Realçam também que em certas regiões no norte da baía, em que o vento observado foi particularmente forte, a componente K1 da corrente integrada em profundidade foi mais intensa que a componente M2 da mesma corrente. Uma possível explicação para a grande magnitude da componente K1 observada na Praia da Oliveirinha poderá então ser a “contaminação” dos dados de corrente pelo ciclo diurno do vento, devido ao facto de as análises harmónicas realizadas neste estudo não conseguirem separar a frequência da componente K1 (cujo período é de aproximadamente 23h. 56min) e a frequência do ciclo solar diurno (período de 24 horas).

A partir do resultado da análise harmónica apresentada nesta secção conclui-se que deverá existir, de facto alguma contaminação do registo pelo vento. No período escolhido, em que o vento é menos intenso, a componente diurna da maré não domina tanto sobre a sua componente semidiurna como anteriormente. No entanto, a componente diurna continua a ser a mais intensa, o que parece sugerir que, para os dados de corrente de Sines, não é possível remover do cálculo da corrente de maré uma parte importante do efeito da contaminação do vento.

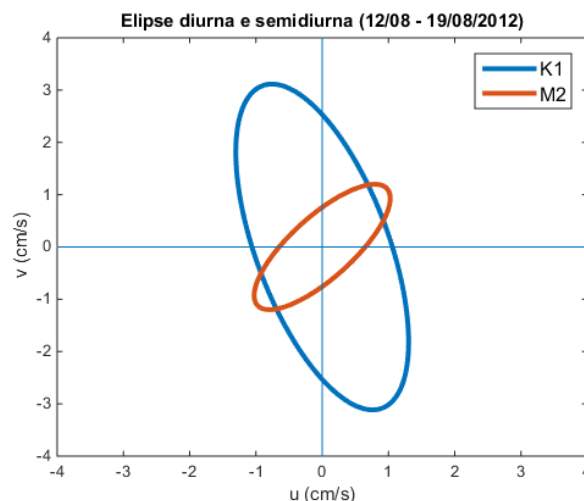


Figura 3.13: Elipses de corrente diurna (K1) e semidiurna (M2), resultantes da análise harmónica para a semana de 12 a 19 de agosto de 2012.

Aplicou-se também a análise harmónica para os períodos de 8 a 12 de agosto e 16 a 22 de agosto, escolhidos por serem os intervalos de tempo em que o vento foi menos intenso, em toda a duração do registo (ver Figura 2.1). No entanto os seus resultados não foram satisfatórios, e não são mostrados aqui. No primeiro destes períodos, os erros da AH eram demasiado grandes devido à duração curta do intervalo escolhido; no segundo, observou-se demasiada influência diurna na corrente de maré, possivelmente devido ao sinal diurno forte que se observa no espectro de *wavelet* da corrente a partir de cerca de 20 de agosto (ver Figura 3.10 b).

4. Conclusões gerais

Os resultados da análise harmónica da maré dos dados de corrente na Praia da Oliveirinha apresentam diferenças em relação ao resultado do modelo TPXO para o mesmo local, e também em relação aos resultados de outros estudos relativos à costa ocidental de Portugal Continental (ver por exemplo o artigo de Marta-Almeida e Dubert, 2006). A diferença mais evidente entre os resultados obtidos e os esperados é a dominância da componente diurna principal da corrente de maré (K1) sobre a sua componente semidiurna principal (M2). Existem várias razões possíveis para este resultado. O método da análise harmónica tem algumas limitações inerentes; uma das mais importantes é o facto de poder haver interações não lineares entre as componentes. A energia de cada frequência resolvida na AH pode depender da energia de outras frequências. Tal poderá fazer com que a energia devida à maré interaja com a energia de outros forçamentos (Flinchem e Jay, 1999).

Não existem métodos práticos para distinguir qual a origem ou os forçamentos de um sinal resolvido pela análise harmónica (Pawlowicz *et al*, 2002). Apesar disto, Rosenfeld *et al*. (2009) concluíram que a componente K1 pode sofrer a contaminação do ciclo diurno do vento, na Califórnia. Para determinar se esta contaminação poderia existir em Sines, realizou-se uma análise harmónica para o período de 12 a 19 de agosto, que foi escolhido com base nos espectros de *wavelet* e nos dados do vento. Escolheu-se um intervalo curto de tempo no qual o vento fosse menos intenso e a corrente não tivesse muita energia na banda diurna. Registou-se uma menor dominância do ciclo diurno da corrente sobre o seu ciclo semidiurno; no entanto, a periodicidade principal das correntes de maré calculadas pela AH foi sempre diurna. Com base neste resultado concluiu-se que na zona de Sines, no Verão, a influência do vento na corrente é superior à da maré.

Uma diferença importante entre os resultados da AH e do modelo TPXO foi a magnitude relativamente grande da componente de longo período MM. Esta componente, com um período de aproximadamente 1 mês, foi a segunda maior componente nos resultados da primeira análise harmónica; no entanto, o seu valor nos resultados do modelo TPXO é tão reduzido que é impossível resolver a magnitude do eixo menor da sua elipse, por ser inferior à precisão do modelo. Uma explicação para este resultado pode ser a existência de ciclos meteorológicos com um período da ordem de um mês. Álvarez-Salgado *et al*. (2003) afirmaram que em certas regiões da costa Ibérica, escalas temporais de algumas dezenas de dias podem explicar até 70% da variabilidade do vento de Norte observado. No entanto, a grande amplitude da componente MM pode também resultar de um problema da análise harmónica. A AH utiliza transformadas de Fourier, em que se supõe que a série temporal se repete infinitamente no tempo (Emery e Thomson, 2001). Neste caso, a duração da série temporal é pouco superior a 1 mês. Esta repetição pode dar origem a “periodicidades” artificiais nos dados, da ordem de grandeza da duração da série. Além disto, durante o período estudado podem existir processos não estacionários que interagem com as marés, como por exemplo ondas internas (Jay & Flinchem, 1999).

Um problema para estudos futuros sobre este assunto será encontrar abordagens que possam ajudar a resolver, pelo menos parcialmente, os problemas da “contaminação” pelo vento das correntes de maré obtidas por análise harmónica. Uma possibilidade poderia ser a utilização de registos mais longos, pois um maior comprimento do registo permite que se resolvam melhor as frequências muito próximas entre si (Emery & Thomson, 2001). Outra possibilidade podia ser a utilização de um modelo dinâmico para simular a corrente induzida pelo vento, o que permitiria quantificar melhor esta parte da corrente.

Os resultados da análise por *wavelets* confirmam que a corrente e o vento são influenciados por vários forçamentos com uma grande gama de periodicidades. Observa-se que a componente norte-sul da corrente tem uma periodicidade predominantemente diurna; esta foi também, como já mencionado, a direção principal do vento (regime de nortada) no período em estudo. A componente este-oeste da

corrente tem periodicidades diurnas e semidiurnas com intensidades semelhantes no seu espectro de potência global; a sua energia é uma ordem de grandeza menor que a da componente norte-sul.

Os resultados obtidos sugerem que, durante o período estudado, o vento teve uma contribuição maior do que a maré para a variabilidade da corrente, sobretudo na sua componente norte-sul. Tal é coerente com os resultados de estudos anteriores, como os de Antunes (2013) e Lamas *et al* (2017). Apesar disto, na componente este-oeste da corrente, os forçamentos do vento e da maré parecem ter contribuições com um peso mais semelhante entre si, em relação à sua componente norte-sul.

5. Referências

- Álvarez-Salgado, X. A.; Figueiras, F. G.; Pérez, F. F.; Groom, S.; Nogueira, E.; Borges, A. V.; Chou, L.; Castro, C. G.; Moncoiffé, G.; Ríos, A.F.; Miller, A. E. J.; Frankignoulle, M.; Savidge, G.; Wollast, R. (2003). *The Portugal Coastal Counter Current off NW Spain: New Insights on its Biogeochemical Variability*. Progress in Oceanography, 56, pp. 281-321. DOI: 10.1016/S0079-6611(03)00007-7
- Antunes, Marta (2013). *Processamento e Análise de Correntes Oceânicas ao largo de Sines*. Projeto final de licenciatura do curso de Meteorologia, Oceanografia e Geofísica (DEGGE/FCUL), 2012/13.
- Boon, J.D. (2011). *Secrets of the Tide: Tide and Tidal Current Analysis and Applications, Storm Surges and Sea Level Trends*. Woodhead Publishing, Cambridge, Reino Unido (originalmente publicado por Horwood Publishing em 2004). ISBN: 978-1-904275-17-6.
- Dias, Joaquim (2001). *Cinemática e Dinâmica da Circulação Oceânica na Margem Continental Noroeste Ibérica*. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Lisboa, 287 pp.
- Efron, B. e Tibshirani, Robert J. (1993). *An Introduction to the Bootstrap*. 1ª edição. Springer Science + Business Media, Dordrecht, Holanda (originalmente publicado por Chapman & Hall, Inc. em 1993). ISBN: 978-0-412-04231-7.
- Egbert, G. D. e Erofeeva, S. Y. (2002). *Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides*. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 19 - 2, pp. 183-204. DOI: 10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2. Artigo disponível em: <https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0426%282002%29019%3C0183%3AEIMOBO%3E2.0.CO%3B2>
- Emery, William J. e Thomson, Richard E. (2001). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. 2ª edição. Elsevier, Amesterdão, Holanda. ISBN 0-444-50757-4.
- Farge, M. (1992). *Wavelet transforms and their applications to turbulence*. Annual Review of Fluid Mechanics, 24, pp. 395-457. DOI: 10.1146/annurev.fl.24.010192.002143
- Flinchem, E. P. e Jay, D. A. (2000). *An Introduction to Wavelet Transform Tidal Analysis Methods*. Estuarine, Coastal and Shelf Science (Elsevier), 51, pp. 177-200. DOI: 10.1006/ecss.2000.0586
- Foreman, M. G. G. e Henry, R. F. (1989). *The harmonic analysis of tidal model time series*. Advances in Water Resources, 12 (3), Setembro de 1989, pp. 109-120. DOI: 10.1016/0309-1708(89)90017-1.
- Foreman, M. G. G. e Neufeld, E.T. (1991). *Harmonic tidal analyses of long time series*. International Hydrographic Review, Mônaco, 68, Janeiro de 1991, pp. 85-108.
- Godin (1972). *The Analysis of Tides*. Liverpool University Press, Reino Unido. ISBN 0-85323-441-8.
- Hautala, S., Kelly, K. e Thompson, L. (2005). *Tide Dynamics – Dynamic Theory of Tides*. Universidade de Washington, EUA. Inverno de 2005. Disponível em <https://faculty.washington.edu/luanne/pages/ocean420/notes/tidedynamics.pdf>
- Jay, D. A. e Flinchem, E. P. (1999). *A comparison of methods for analysis of tidal records containing multi-scale non-tidal background energy*. Continental Shelf Research, 19, pp. 1695-1732. DOI: 10.1016/S0278-4343(99)00036-9
- Kowalik, Z. e Luick, J. (2013). *The Oceanography of Tides*. Fairbanks, Alasca, EUA. Janeiro de 2013.

- Lamas, L., Peliz, A., Dias, J., Oliveira, P.B., Angélico, M.M., Castro, J.J., Fernandes, J.N., Trindade, A. e Cruz, T. (2017). *Diurnal variability of inner-shelf circulation in the lee of a cape under upwelling conditions*. *Continental Shelf Research*, 143, pp. 67-77. DOI: 10.1016/j.csr.2017.06.006
- Lamas, Luísa Andrade e Sousa (2018). *Cross-shelf flow forced by daily winds in the presence of a cape*. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Lisboa, com supervisão de Dr. Álvaro Peliz e Dr. Patrick Marchesiello. 174 pp.
- Marta-Almeida, M. e Dubert, J. (2006). *The structure of tides in the Western Iberian region*. *Continental Shelf Research*, 26, pp. 385-400. DOI: 10.1016/j.csr.2005.11.011
- Miranda, Pedro M. A. (2009). *Meteorologia e Ambiente*. 2ª edição. Universidade Aberta, Lisboa. ISBN 978-972-674-655-3.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (1981). *Tidal Currents - Educational Pamphlet #4*, U.S. Department of Commerce, Abril de 1981.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B. e Lentz, S. (2002). *Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE*. *Computers and Geosciences*, 28, pp. 929-937. DOI: 10.1016/S0098-3004(02)00013-4
- Pelly, Joanna L. (2001). *The predictability of atmospheric blocking*. Dissertação de Doutoramento, Universidade de Reading (Reino Unido), 207 pp.
- Pugh, David T. (1987). *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. John Wiley & Sons, Reino Unido. ISBN 0-471-91505-X.
- Relvas, P., Barton, E., Dubert, J., Oliveira, P.B., Peliz, A., daSilva, J. e Santos, A.M.P. (2007). *Physical oceanography of the western Iberia ecosystem: latest views and challenges*. *Progress in Oceanography*, 74, pp. 149–173. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2007.04.021>
- Rosenfeld, L., Shulman, I., Cook, M., Paduan, J. e Shulman, L. (2009). *Methodology for a regional tidal model evaluation, with application to central California*. *Deep-Sea Research II*, 56, Fevereiro de 2009, pp. 199-218. DOI: 10.1016/j.dsr2.2008.08.007
- Setz, Tobias (2011). *Wavelet Analysis on Stochastic Time Series – A visual introduction with an examination of long term financial time series*. Tese semestral de Inverno de 2011 do curso de Ciência e Engenharia Computacional (ETH Zurique, Suíça), com supervisão de PD Diethelm Würtz.
- Talley, L.D., Pickard, G.L., Emery, W.J. e Swift, J.H. (2011). *Descriptive Physical Oceanography: An Introduction*. 6ª edição. Elsevier, Londres, Reino Unido. ISBN: 978-0-7506-4552-2.
- Torrence, C. e Compo, G. P. (1998). *A Practical Guide to Wavelet Analysis*. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Janeiro de 1998, Vol. 79, 1, pp. 61-78. DOI: 10.1175/1520-0477(1998)07960:0061:apgtwa62;2.0.co;2
- Trindade, A., Peliz, A., Dias, J., Lamas, L., Oliveira, P.B., Cruz, T. (2016). *Cross-shore transport in a daily varying upwelling regime: A case study of barnacle larvae on the southwestern Iberian coast*. *Continental Shelf Research*, 127, pp. 12-27. DOI: 10.1016/j.csr.2016.08.004
- Vasseur, D. A. e Yodzis, P. (2004). *The color of environmental noise*. *Ecology*, 85 (4), pp.1146-1152. DOI: 10.1890/02-3122
- Vindenes, H., Orvik, K., Sjøiland, H. e Wehde, H. (2018). *Analysis of Tidal Currents in the North Sea from shipboard acoustic Doppler current profiler data*. *Continental Shelf Research*, 162, pp. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.04.001>. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278434317304673?via%3Dihub> sob licença Creative Commons.

6. Links utilizados

- Site de C. Torrence e G. P. Compo, que disponibiliza programas de análise por *wavelets* em MATLAB e Python: <http://paos.colorado.edu/research/wavelets/>
- Site de Rich Pawlowicz, que disponibiliza programas de análise harmónica em MATLAB: <https://www.eoas.ubc.ca/~rich/>
- Lista de componentes harmónicas em San Diego, Califórnia (NOAA): <https://tidesandcurrents.noaa.gov/harcon.html?id=9410170>
- Modelo TMD (Earth and Space Research, Chicago, EUA). <https://www.esr.org/research/polar-tide-models/tmd-software/>
- Modelo TPXO (Oregon State University, Oregon, EUA). <http://volkov.oce.orst.edu/tides/otps.html>
- Elipse de corrente (figura): <http://www.oc.nps.edu/nom/day1/partc.html> (Naval Postgraduate School, Monterey, Califórnia, EUA).

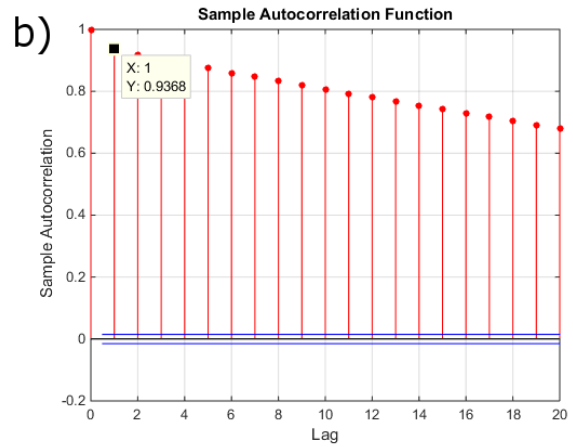
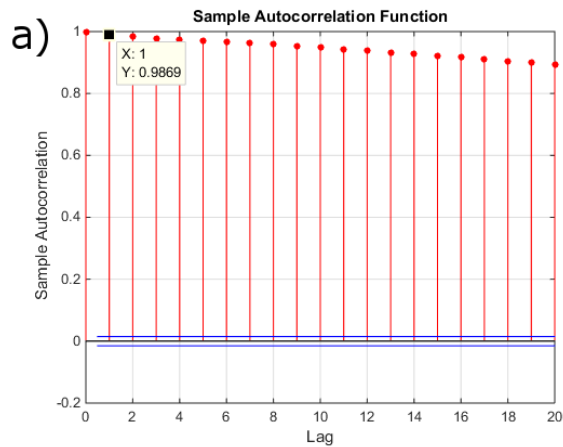
7. Anexos

Anexo 1: Lista de todas as componentes da corrente de maré utilizadas pela análise harmônica. Os quatro parâmetros *major*, *minor*, *inc* e *pha* são os parâmetros da elipse de corrente de maré associada a cada componente/frequência, sendo *emaj*, *emin*, *einc* e *epha* os respectivos intervalos de confiança a 95%.

tide	freq [h ⁻¹]	major [cm/s]	emaj [cm/s]	minor [cm/s]	emin [cm/s]	inc [°]	einc [°]	pha [°]	epha [°]	SNR [adim.]
MM	0.0015122	3.761	0.479	0.219	0.11	101.85	1.60	279.09	7.10	62
MSF	0.0028219	2.270	0.457	-0.303	0.08	83.30	2.37	219.78	12.67	25
ALP1	0.0343966	2.415	1.466	-0.410	0.50	91.08	13.20	302.59	33.67	2.7
2Q1	0.0357064	0.549	0.930	-0.192	0.56	74.91	39.68	4.59	146.06	0.35
Q1	0.0372185	1.894	1.273	-0.350	0.53	90.90	16.48	145.81	47.75	2.2
O1	0.0387307	0.916	1.097	0.466	0.53	86.67	47.77	130.59	121.76	0.7
NO1	0.0402686	0.471	0.962	-0.239	0.68	3.21	179.74	10.72	107.55	0.24
K1	0.0417807	7.027	1.472	-2.098	0.49	102.88	5.77	309.94	11.43	23
J1	0.0432929	1.153	1.274	-0.167	0.55	104.99	26.21	92.62	66.99	0.82
OO1	0.0448308	1.656	1.669	-0.315	0.65	84.28	25.13	347.54	70.72	0.99
UPS1	0.0463430	1.821	1.666	-0.186	0.69	103.31	20.68	128.02	58.69	1.2
EPS2	0.0761773	0.845	1.095	-0.103	0.83	84.19	73.15	219.76	98.09	0.6
MU2	0.0776895	1.183	1.031	-0.621	1.02	107.52	76.35	74.99	97.11	1.3
N2	0.0789992	1.124	0.981	-0.999	1.00	179.12	136.48	270.75	159.74	1.3
M2	0.0805114	1.451	1.279	-0.234	1.03	71.96	47.18	93.48	62.74	1.3
L2	0.0820236	1.523	1.052	-0.763	0.89	40.23	57.86	177.83	59.79	2.1
S2	0.0833333	1.531	1.102	-0.803	1.17	15.71	74.14	68.64	64.06	1.9
ETA2	0.0850736	1.394	1.510	-1.232	1.33	4.38	139.16	15.52	106.53	0.85
MO3	0.1192421	0.523	0.592	-0.258	0.41	104.44	55.61	70.77	91.46	0.78
M3	0.1207671	0.689	0.509	-0.498	0.43	89.01	83.13	250.76	105.15	1.8
MK3	0.1222921	0.390	0.553	-0.121	0.43	77.53	54.66	52.85	96.65	0.5
SK3	0.1251141	0.649	0.625	-0.195	0.45	71.91	43.30	46.52	62.32	1.1
MN4	0.1595106	0.275	0.301	-0.118	0.26	78.87	79.35	137.31	84.00	0.84

M4	0.1610228	0.248	0.272	0.071	0.25	31.86	90.28	16.64	95.17	0.83
SN4	0.1623326	0.314	0.304	-0.116	0.29	79.44	72.97	172.77	74.01	1.1
MS4	0.1638447	0.486	0.301	-0.097	0.32	43.05	44.76	114.56	42.91	2.6
S4	0.1666667	0.228	0.276	-0.004	0.28	111.32	90.87	191.58	93.84	0.68
2MK5	0.2028035	0.202	0.271	-0.140	0.20	98.31	74.90	349.76	116.31	0.56
2SK5	0.2084474	0.090	0.198	-0.044	0.16	14.59	118.13	357.26	152.40	0.21
2MN6	0.2400221	0.156	0.131	-0.018	0.14	137.73	52.93	353.17	70.26	1.4
M6	0.2415342	0.112	0.152	-0.031	0.11	50.08	65.17	104.16	101.35	0.55
2MS6	0.2443561	0.141	0.170	-0.007	0.10	72.69	42.85	250.82	94.40	0.69
2SM6	0.2471781	0.145	0.164	-0.033	0.14	49.73	51.19	277.27	81.45	0.78
3MK7	0.2833149	0.094	0.094	-0.040	0.10	73.47	91.76	102.19	102.57	1
M8	0.3220456	0.055	0.049	-0.016	0.05	99.07	66.96	312.41	62.09	1.3
M10	0.4025570	0.035	0.042	-0.005	0.04	114.85	99.92	359.87	109.99	0.66

Anexo 2: Gráficos de autocorrelação obtidos com a função MATLAB “autocorr”, até ao Lag-20, para: (a) a componente meridional da corrente (com uma autocorrelação Lag-1 = 0.9869) e (b) a componente zonal da corrente (com uma autocorrelação Lag-1 = 0.9368)



Anexo 3: Gráficos de autocorrelação obtidos com a função MATLAB “autocorr”, até ao Lag-20, para: (a) a componente meridional do vento (com uma autocorrelação Lag-1 = 0.9841) e (b) a componente zonal do vento (com uma autocorrelação Lag-1 = 0.9753).

