

HIDRODINÂMICA DA BAÍA DO LOBITO. PARTE I - CORRENTES DE MARÉ

António Evaristo^{1,2}, Lígia Pinto^{@1}, Isabella Ascione Kenov^{1,3}, Ramiro Neves^{1,4}

RESUMO: Este trabalho descreve o estudo das correntes de maré na Baía do Lobito, Angola, utilizando um modelo de malha fina para o interior da Baía encaixado num modelo de maior escala para a região continental adjacente, de forma a impor a maré a partir dos resultados do modelo FES2004. Foi utilizado um modelo 2D, integrado na vertical, para calcular o escoamento de maré e um modelo 3D baroclínico para estudar o efeito do vento e da estratificação termohalina. Neste artigo – Parte I do trabalho – é descrito o escoamento de maré: escoamento transiente, escoamento residual e o contributo da maré para os tempos de residência. Os resultados do modelo são validados comparando os níveis calculados com dados maregráficos reconstituídos a partir da análise harmónica de níveis medidos no interior da Baía. O modelo mostra velocidades muito baixas, com velocidades transientes da ordem dos cm/s e velocidades residuais da ordem dos mm/s. O escoamento residual devido à maré é dominado por dois grandes vórtices, ocupando cada um deles cerca de metade da baía. Os níveis medidos e calculados são semelhantes, mostrando que a condição de maré imposta (FES2004) na fronteira do modelo é adequada e que a maré no interior da baía está representada corretamente. Os tempos de residência excessivos - da ordem de meses - obtidos nas simulações sugerem que a estratificação das correntes é determinante para a renovação da água da baía. Efetivamente é essa a conclusão da Parte II deste trabalho.

Palavras-chave: modelo hidrodinâmico, correntes de maré, velocidade residual, tempo residência, Baía do Lobito, Angola.

ABSTRACT: This paper describes the study of tidal currents in Lobito Bay, Angola, using a fine mesh model for the interior of the Bay embedded in a larger scale model for the adjacent continental region, in order to impose the tide from the FES2004 model results. A 2D model integrated vertically was used to calculate the tidal flow and a baroclinic 3D model to study the effect of wind and thermohaline stratification. This article - Part I of the work - describes the tidal flow: transient flow, residual flow and the contribution of the tide to the residence time. The results of the model are validated by comparing the calculated levels with tidal levels data reconstituted from harmonic analysis of measured levels within the Bay. The model shows very low speeds, with transient speeds of the order of cm/s and residual speeds of the order of mm/s. Residual flow due to the tide is dominated by two large eddies, occupying each of them about half the bay. The measured and calculated levels are similar, showing that the imposed tide condition (FES2004) on the model boundary is adequate and that the tide propagation inside the bay is represented correctly. Excessive residence times - of the order of months - obtained in simulations suggest that the stratification dominates bay water renewal. Indeed, this is a conclusion of Part II of this work.

Keywords: hydrodynamic model, tidal current, residual velocity, residence time, Baía do Lobito, Angola.

@ Corresponding author: ligia.pinto@tecnico.ulisboa.pt

1 MARETEC—Marine, Environment and Technology Centre, Instituto Superior Técnico, LARSyS, Universidade de Lisboa

2 evaristoleao@yahoo.com.br

3 isabella.ascione@tecnico.ulisboa.pt

4 ramiro.neves@tecnico.ulisboa.pt

1. INTRODUÇÃO

A Baía do Lobito, em Angola, é um sistema semifechado com cerca de 4 km de comprimento e 2 km de largura em cuja envolvente estão instaladas zonas urbanas (cidade do Lobito), zonas de turismo (Restinga), zonas industriais e um porto. Estas atividades exercem pressões sobre a qualidade da água da baía cujos impactes dependem da hidrodinâmica e especialmente do tempo de residência da água no seu interior, conhecimento fundamental para a gestão ambiental do sistema no presente quadro de crescimento demográfico e industrial que se regista na região.

As velocidades no interior da baía são baixas, o que lhe confere características muito favoráveis à atividade portuária. Os campos de velocidade no interior da baía são mal conhecidos, limitando-se os dados de campo existentes às características da maré. A modelação matemática pode por isso desempenhar um papel fundamental no estudo da hidrodinâmica do sistema, dando uma primeira ideia das correntes e dos processos de transporte, informação que poderá ser utilizada para orientar trabalhos de campo futuros.

Em termos de modelação do sistema, as marés e a hidrodinâmica de grande escala são fornecidas por modelos globais (e.g., FES2004 para a maré e CMEMS para as correntes de densidade e distribuições de temperatura e de salinidade). O refinamento destas soluções através de um processo de *downscaling* é a forma mais rápida e mais económica de conhecer os processos de transporte no interior da Baía do Lobito e os fatores que a influenciam.

A importância relativa dos processos responsáveis pela hidrodinâmica da baía podem ser identificados através da

simulação independente da maré, do vento e da densidade. O vento atua na superfície livre e associado à estratificação vertical de densidade acentua o carácter baroclínico do escoamento e por isso deve ser simulado por um modelo tridimensional.

Área de Estudo

A Baía do Lobito situa-se na zona central de Angola – Figura 1 - na costa ocidental da África Austral, entre as latitudes 12°20'S e 13°34'S. A área de estudo é limitada a norte pelo rio Hanha e a sul pelo rio Catumbela. A Baía do Lobito é uma vasta baía natural com uma largura máxima de 2 km e profundidade média da ordem dos 18 m e limitada a oeste por uma restinga de 4 km de comprimento.

No interior da baía está localizado o Porto do Lobito que, com um terminal para minério e um terminal comercial, é o segundo mais importante de Angola e deverá crescer como consequência da entrada em funcionamento de uma refinaria (da SONAREF) em fase construção, embora esta venha a ser equipada com um emissário submarino para descarga direta no mar. Na zona circundante da baía está localizada a cidade do Lobito com cerca de 1 milhão de habitantes, cujo sistema de saneamento tem dois pontos principais de descarga, um situado no interior da baía e outro localizado no mar a sul da baía. A zona industrial em redor da baía inclui um terminal de produtos petrolíferos e estaleiros de construção e reparação naval e ainda indústria metalomecânica de apoio à exploração de petróleo *offshore*.

Morfologicamente a região inclui dois segmentos principais: uma faixa de falésia entre o rio Hanha e a embocadura da restinga e uma costa arenosa, com cerca de 20 km, desde o extremo norte da restinga até ao rio Catumbela, cuja metade norte é usada como zona balnear. O rio Catumbela é a principal

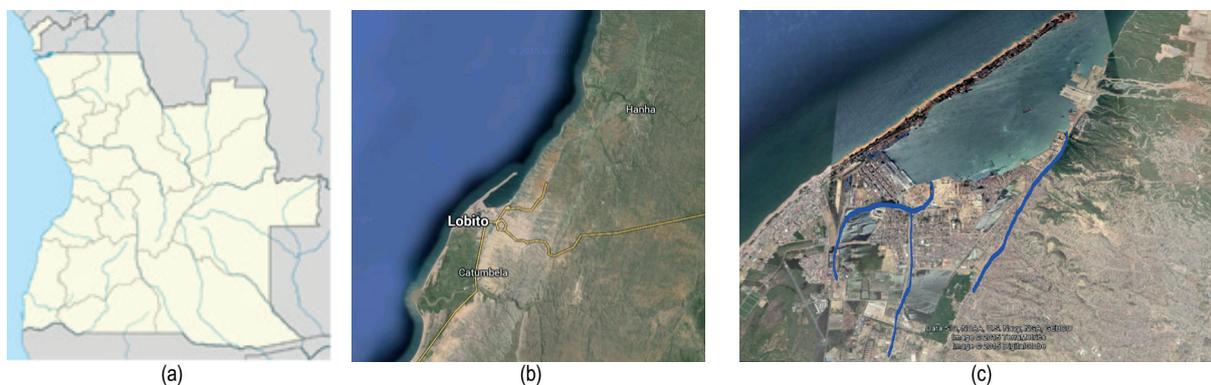


Figura 1. Localização da Baía do Lobito em Angola. A parte (c) identifica as entradas de água doce na Baía e a parte (b) mostra a zona húmida na foz do rio Catumbela, a sul da Baía do Lobito.

fonte de água doce, de nutrientes e de sedimentos na região formando um pequeno delta junto à sua foz. O rio Hanha é uma fonte importante de água de rega, sendo o caudal na foz baixo na época de estiagem, o que permite o seu fecho natural por uma língua de areia durante esse período. No interior da baía as descargas urbanas e industriais diretas ou através dos canais, representados na Figura 1(c) são uma pressão importante sobre a qualidade da água devido aos tempos de residência elevados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Marés

Para a área em estudo existem dados horários de nível medidos ao longo de um ano (1972/73) - numa estação maregráfica localizada no extremo do cais da capitânia do Porto do Lobito (12°20'S;13°33,5'E) disponíveis na base de dados do British Oceanographic Data Centre (<https://www.bodc.ac.uk/>). As constituintes harmónicas da maré foram obtidas por análise harmónica destes dados utilizando o programa em Matlab T-Tide (Foreman, 1978) e são apresentadas na Tabela 1. A Tabela 1 mostra que as componentes M_2 , S_2 , N_2 e K_1 são as mais importantes, somando as respetivas amplitudes cerca de 0,75 m. As marés vivas médias (M_2 , S_2) têm amplitude de cerca de 1,2 m e as marés mortas médias têm cerca de 0,6 m, o que significa que as velocidades do escoamento são bastante diferentes em cada regime de maré.

Tabela 1. Amplitude e fase das componentes da maré obtidas.

Constituinte de maré	Frequência (graus/h)	Amplitude (m)	Fase (°)
Q1	13,3987	0,0064	356,2
O1	13,9430	0,0114	47,2
K1	15,0411	0,0657	190,1
N2	28,4397	0,0948	81,6
M2	28,9841	0,4549	84,7
L2	29,5285	0,0106	73,1
S2	30,0	0,1463	97,6
MO3	42,9271	0,0031	73,0
MK3	44,0252	0,0002	269,3
MN4	57,4238	0,003	158,1
MS4	58,9841	0,0064	244,5
MK4	38,2947	0,0022	255,3

2.2. Correntes

No interior da baía, não existem registos de medições de velocidade e o padrão de circulação é mal conhecido. Ao largo de Angola a circulação geral é, no entanto, bem conhecida da comunidade científica internacional. A Figura 2 mostra três imagens publicadas descrevendo a circulação na região. A parte (a) Stramma e England (1999) põe em evidência o “Giro de Angola”, por vezes designado por “Domo de Angola” limitado a sul pela corrente de Benguela e a norte pela Corrente Equatorial Sul, que associada a este giro forma a corrente de Angola. A parte (b) da figura mostra o escoamento local calculado por Juliano e Alves (2007) utilizando um modelo geostrofico. A figura mostra maior detalhe do campo de velocidades, mostrando as mesmas correntes e a presença do domo. A parte (c) da figura Schneider *et al.* (1996) mostra também a circulação de forma esquemática, mostrando também a localização da frente “Angola-Benguela” ABF e um domo com localização semelhante à de Juliano e Alves (2007). Esta parte (c) indica ainda a presença de uma contracorrente costeira, consistente com a existência de afloramento costeiro associado aos ventos aliseos.

Na região situada entre 5°S e 13°S, a circulação é condicionada pelo efeito conjugado do upwelling forçado pelo vento e do downwelling induzido pelo “Domo de Angola”. Quanto mais intensa for a circulação do “Domo de Angola” mais quente é a água costeira entre a Ponta do Morro e Quicombo/Lobito e mais costeira é a corrente de Angola. Os períodos de afloramento costeiro mais intenso resultam no afastamento da costa da corrente de Angola. Isto é, mesmo circulando para sul, a corrente de Angola torna-se mais oceânica do que costeira, tendo como limite litoral neste período o talude da plataforma continental (Sangolay, 2004).

2.3. Ventos

Na região oceânica, o sistema de ventos é dominado por ventos de sul durante a maior parte do ano, sendo os ventos de norte quase inexistentes. A Figura 3 mostra a climatologia dos ventos na região. São apresentados campos médios mensais para os meses de janeiro, abril e setembro medidos por satélite. As figuras põem em evidência a dominância dos ventos de sul, com rotação para Oeste na zona do Lobito onde esta é a direção dominante, e enfraquecimento no mês de setembro. Na zona onde ocorre o “Domo de Angola” as velocidades são mais baixas (até 10 m/s), sendo ainda mais baixas junto à costa. Velocidades mais elevadas ocorrem na zona da corrente de Benguela onde a velocidade média mensal é da ordem dos 15 m/s.

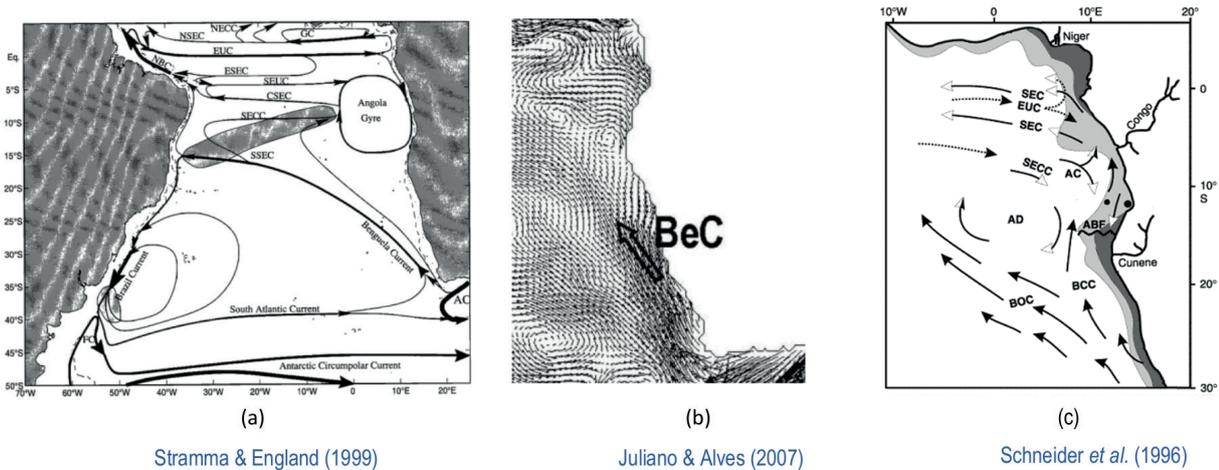


Figura 2. Correntes oceânicas ao largo de Angola de acordo com os autores indicados em cada uma delas. Todas as figuras mostram a corrente de Benguela a Sul (BC) e a Corrente Equatorial Sul (SEC) a norte, e o Domo de Angola (AD) na zona central formada pela ação conjunta destas duas correntes.

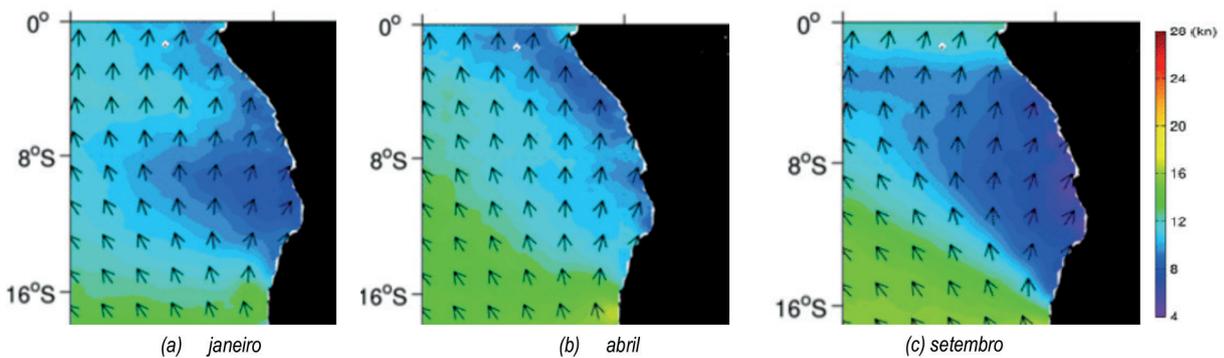


Figura 3. Ventos: Climatologia mensal obtida a partir de ventos medidos por satélite no âmbito do programa "Climatology of global ocean winds (cogow)", http://cioss.coas.oregonstate.edu/cogow/1101/23_one_x_one.html em Janeiro, Abril e Setembro.

2.4 Sistema de modelação MOHID Water

Neste capítulo, é feita uma breve descrição do modelo MOHID e da sua implementação no sistema em estudo, que inclui a construção da batimetria e a definição das descargas e dos forçamentos atmosférico e de maré.

O MOHID (www.mohid.com) é um sistema de modelação de sistemas aquáticos cujo desenvolvimento foi iniciado no Centro de Ambiente e de Tecnologias Marítimas (MARETEC) no Instituto Superior Técnico (IST), da Universidade de Lisboa, em Portugal. A estrutura modular do sistema é descrita em Neves (2013) e permite o uso de diferentes tipos de equações, de métodos numéricos e o uso de formulações alternativas para a simulação de processo biogeoquímicos, que estão agrupados em dois subsistemas: MOHID Water e o MOHID Land. No presente trabalho utilizou-se

o MOHID Studio (www.actionmodulers.pt) como interface gráfica para implementar o modelo e na exploração dos resultados.

Neste trabalho é utilizado o sistema MOHID Water que é aplicável em ambientes com superfície livre (oceânicos, costeiros, estuarinos ou albufeiras). Este sistema tem sido aplicado em Portugal e em outras áreas do mundo. São exemplos de aplicação em zonas costeiras a aplicação no estuário do Gironde (Cancino e Neves, 1998), na Ria de Vigo em Espanha (Taboada *et al.*, 1998), no estuário do Sado (Martins *et al.*, 2001), na Ria de Aveiro (Vaz *et al.*, 2005), na Lagoa de Óbidos em Portugal (Malhadas *et al.*, 2010), no Estuário do Tejo, Vaz *et al.* (2015), na zona costeira de Sines (Salgueiro *et al.*, 2015) na margem da Ocidental Europeia (Coelho *et al.*, 1999) no Arquipélago de Cabo Verde (Gomes *et al.*, 2015). Em Mateus e Neves (2013) é feita uma compilação de aplicações do modelo MOHID.

O Módulo de hidrodinâmica é o núcleo central do sistema de modelação MOHID Water e pode ser utilizado em modo bidimensional (2D) ou tridimensional (3D). No estudo de maré descrito neste texto o modelo foi aplicado com uma configuração 2D e as equações correspondentes são:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \left[\frac{\partial}{\partial x} (\mu D) + \frac{\partial}{\partial y} (\nu D) \right] = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v = -g \frac{d\eta}{dn} +$$

$$\left[\frac{d}{dx} (\mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu \frac{\partial u}{\partial y}) \right] - t^x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - f u = -g \frac{d\eta}{dy} +$$

$$\frac{d}{dx} (\mu \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu \frac{\partial v}{\partial y}) - t^y$$

em que η representa a elevação da superfície livre acima do zero hidrográfico, $D=h+\eta$ a altura total da coluna de água e h a profundidade medida em relação ao zero hidrográfico, μ e ν as componentes horizontais de velocidade nas direções x e y respetivamente, f o parâmetro de Coriolis, função da latitude, μ o coeficiente de viscosidade horizontal e t^x e t^y as tensões de corte devidas ao vento e ao atrito de fundo nas direções x e y , respetivamente.

2.4.1. Batimetria e malha de cálculo

A batimetria é um dos fatores que mais influência a circulação de água e consequentemente as suas propriedades. Os dados batimétricos utilizados neste estudo tiveram como base a carta

nº227 do I.G.C. de Angola de onde foram retiradas as linhas isobáticas. A batimetria utilizada nas simulações foi obtida por interpolação triangular dos dados batimétricos (Figura 4). A malha construída tem um espaçamento que varia entre 50 m e 1 km na direção x e 200 m e 1 km na direção y (Figura 4) de modo a obter a máxima resolução na Baía do Lobito, objeto principal do presente estudo. A informação da linha de costa utilizada foi retirada do Google Earth.

2.4.2. Condições de Fronteira

O modelo hidrodinâmico 2D necessita de dados de maré na fronteira aberta, de dados de vento na superfície livre e das descargas dos rios, dependendo o papel destas últimas na hidrodinâmica do valor do caudal e da geometria na região da embocadura. Nesta aplicação foi considerada só a descarga do rio Catumbela. O seu papel é secundário na hidrodinâmica calculada pelo modelo 2D, mas é importante em termos de transporte de sedimentos e de qualidade da água (estes processos não foram simulados neste trabalho, mas deverão fazer parte de trabalhos subsequentes e por isso o seu efeito está incluído na hidrodinâmica).

Os dados de maré na fronteira aberta foram obtidos a partir dos resultados do modelo FES 2004. Deste modelo foram extraídas 25 componentes harmónicas: SSA, Q1, O1, P1, K1, O01, EPS2, 2N2, MU2, N2, NU2, M2, L2, S2, K2, MO3, M3, SK3, MN4, M4, MS4, MK4, S4, 2MS6 ao longo da fronteira aberta que, por interpolação, foram usadas para reconstruir a maré em todos os pontos de fronteira aberta.

Os dados de vento foram obtidos no site do ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast). Com base nestes campos de vento foram calculados valores médios mensais para todo o domínio (Tabela 2).

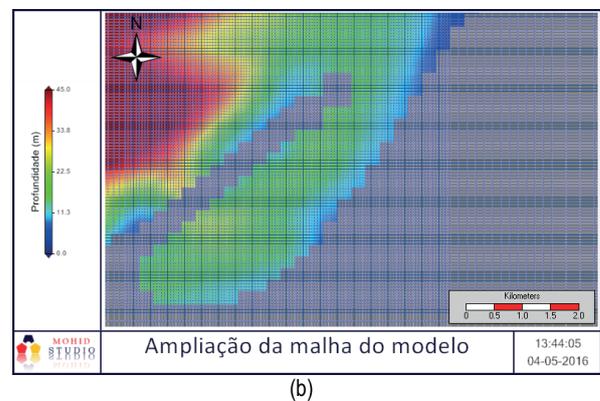
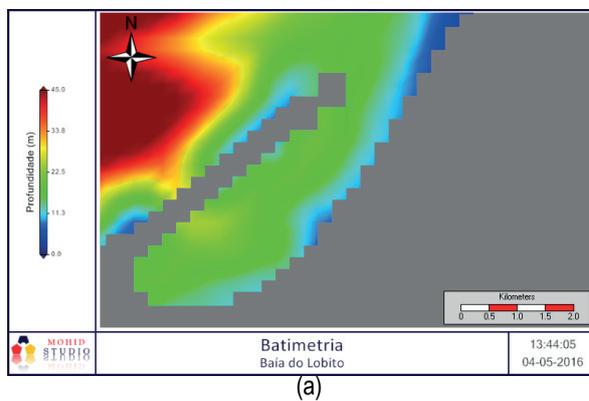


Figura 4. Batimetria da área de estudo da Baía do Lobito (a) e malha de cálculo do modelo regional e do modelo da baía (b).

Tabela 2. Valores médios mensais do vento no domínio do modelo.

Mês	Componente Este - Oeste (m/s)	Componente Sul - Norte (m/s)
Janeiro	2,00	1,12
Fevereiro	1,89	1,38
Março	1,49	1,44
Abril	1,37	1,93
Mai	1,49	2,56
Junho	1,48	1,98

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos. É analisada a consistência dos padrões dos campos de velocidades obtidos e é feita a validação dos níveis de maré por comparação com os níveis obtidos a partir das constituintes harmônicas dos dados do marégrafo.

São apresentados resultados em dois cenários, um considerando exclusivamente o forçamento de maré e outro considerando a maré e o vento. A simulação hidrodinâmica do modelo 2D foi efetuada para um período de 12 meses (2011/01/03 – 2011/12/31). As diferenças devidas ao vento são pequenas por estarem integradas na vertical – o modelo é 2D – e por a baía ser de pequena dimensão e por isso o *fetch* ser pequeno.

3.1. Análise dos níveis de maré

A Figura 5 mostra uma comparação entre os níveis reconstituídos a partir das constituintes harmônicas obtidas por análise harmônica dos dados de campo medidos em 1972/73 e o resultado do modelo. As duas séries temporais são muito

semelhantes, o que mostra que o modelo está a calcular bem a propagação de maré desde a fronteira aberta até a baía. Podemos por isso dizer que a malha é adequada à simulação e que a maré é corretamente imposta na fronteira aberta.

A Tabela 3 mostra as amplitudes e fases das constituintes de maré obtidas a partir dos dados de campo e dos resultados do modelo e as diferenças entre elas. As diferenças entre as amplitudes são da ordem dos mm, o que é consistente com os pequenos desvios observados na Figura 5 entre a série temporal medida e calculada. A diferença de fase entre a componente M2 medida e a calculada são 6 graus, que corresponde a cerca de 12 minutos. As diferenças de fase das componentes de menor amplitude são maiores, mas por via da pequena amplitude introduzem pequenas diferenças no resultado final.

A Figura 6 mostra o nível de maré num ciclo maré-morta, maré viva no interior da baía, mostrando níveis de maré que variam entre 0,5 m e 1,7 m em maré viva varia e entre 0,7 m e 1,55 m em maré morta. Este resultado é uma consequência da pequena amplitude da componente S2 quando comparada com as componentes diurnas (componentes com índice 1 na Tabela 1).

3.2. Campo de velocidades

A Figura 7 mostra os campos de velocidades forçados pela maré respetivamente em enchente (a) e em vazante (b). As intensidades máximas da corrente são da ordem de 5 cm/s e ocorrem na zona da embocadura quer na enchente, quer na vazante. No interior da baía as velocidades são baixas por ser um sistema fechado e no exterior as velocidades são baixas por as profundidades serem elevadas não existindo acidentes topográficos.

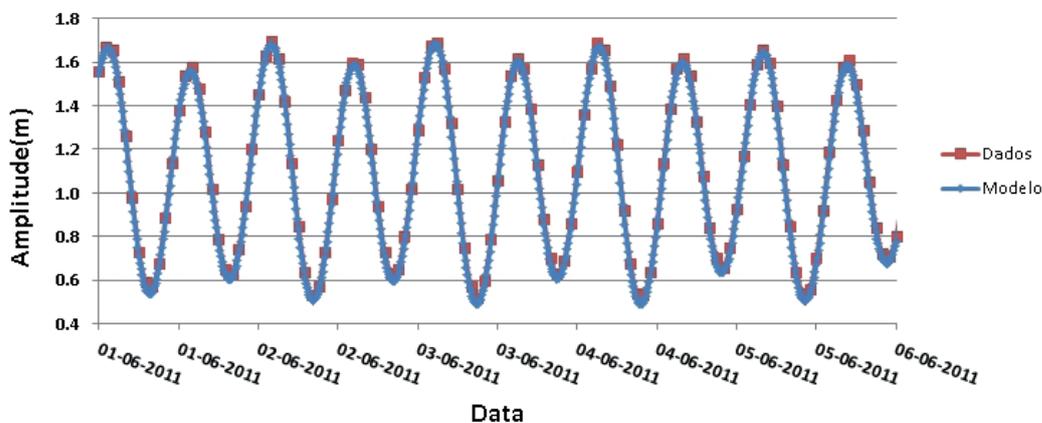


Figura 5. Comparação dos níveis de maré calculados pelo modelo e obtidos a partir das componentes harmônicas medidas no Porto do Lobito.

Tabela 3. Comparação da amplitude e fase das principais constituintes da maré obtidas com os dados e com os resultados do modelo.

Constituinte Harmónica	Frequência (graus/hora)	Fase(°)	Amplitude dados	Amplitude modelo	Diferença de amplitude (m)	Diferença de fase (°)
O1	13,9	12,812	0,0114	0,0122	-0,0008	-11,96
K1	15,0	170,07	0,0657	0,0685	-0,0028	19,98
M2	29,0	78,682	0,4549	0,4551	0,0042	6,018
S2	30,0	63,702	0,1463	0,1421	0,0042	33,92
MS4	58,9	219,982	0,0064	0,0083	-0,0019	24,52

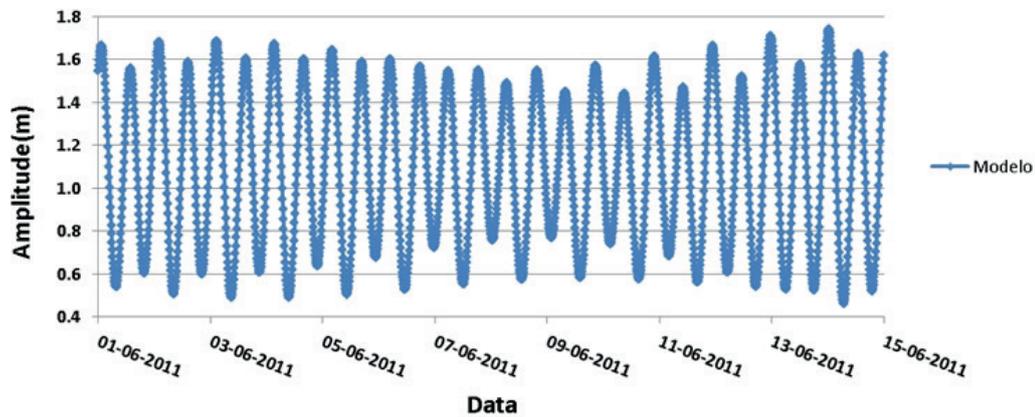


Figura 6. Evolução do nível de maré calculado pelo modelo da Baía do Lobito ao longo de um ciclo de maré viva - maré morta.

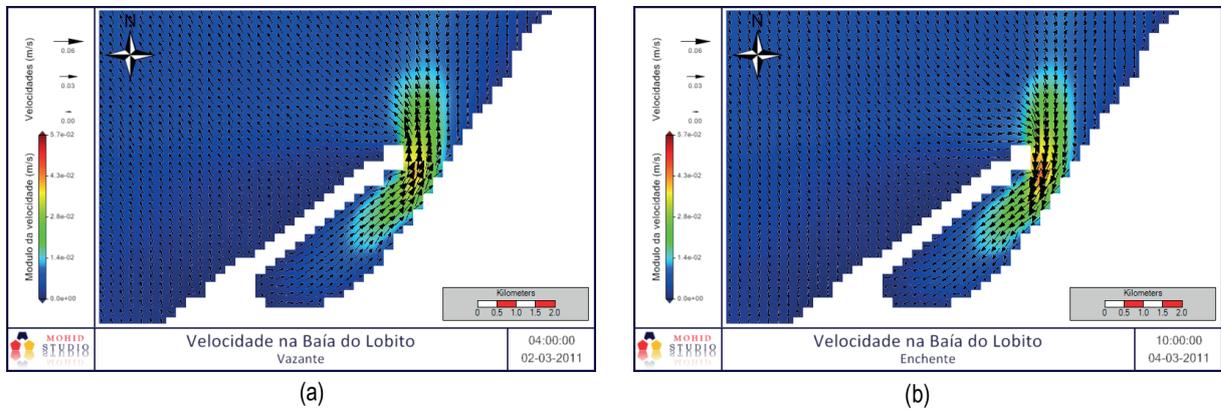


Figura 7. Campo de velocidades na Baía do Lobito em enchente (a) e em vazante (b).

A Figura 8 mostra a circulação residual produzida pela maré e pelo vento em 2D. As velocidades máximas são muito baixas - da ordem de 1 mm/s - o que é consistente com o facto de as velocidades de maré também serem baixas (5 cm/s). O campo de velocidades mostra dois vórtices de maior velocidade na região da embocadura, um do lado de dentro da Baía na metade mais próxima da embocadura e outro no exterior. Ainda no interior da baía é visível um vórtice de menor intensidade que ocupa a metade interior da Baía. O vórtice no exterior é devido ao

jato de vazante que tende a sair alinhado com a restinga e que em seguida é deflectido para a esquerda pelo efeito de coriolis. O primeiro vórtice localizado dentro da baía está associado à curvatura do escoamento de enchente que tem que contornar a ponta da restinga para entrar na baía e ao efeito de coriolis que mantém o escoamento à esquerda, i.e. do lado de terra durante a enchente e do lado da restinga durante a vazante. O segundo vórtice, localizado no interior da baía, está associado à topografia e à deflexão do escoamento que lhe está associada.

A circulação residual fornece informação qualitativa sobre o transporte em escalas de tempo superiores às da maré (dias a meses). O facto de as intensidades do escoamento serem baixas no interior da baía e especialmente de o campo ser dominado por dois vórtices mostra que os produtos descarregados no interior da baía tendem a recircular e por isso tendem a ter tempos de residência elevados. Na metade de jusante da baía os produtos tendem a residir menos tempo porque na zona da embocadura há mistura entre as águas que circulam no vórtice interior e no vórtice exterior. Para melhor compreender a circulação no interior da baía foram calculados os tempos de residência no interior da baía utilizando traçadores lagrangeanos.

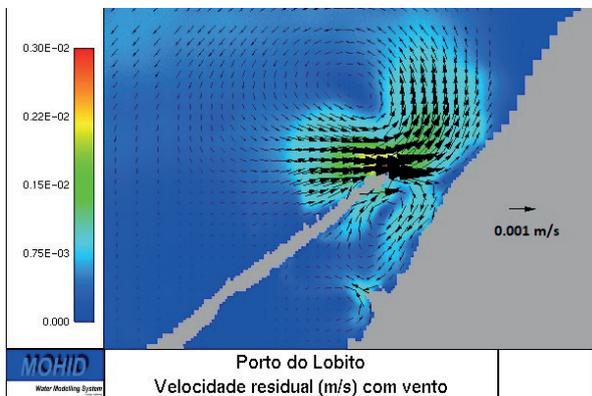


Figura 8. Campos de velocidade residual (em 2D) devida à maré (a) e devida à maré mais o vento (b).

3.3. Tempo de residência

O tempo de residência é definido como o tempo necessário para que um contaminante descarregado no interior de um sistema saia para o exterior. Este tempo é, por conseguinte, equivalente ao tempo de renovação da água do sistema. Experimentalmente

este tempo só pode ser estimado utilizando um traçador. Em estuários a salinidade é um traçador natural (Kenov *et al.*, 2012), mas num sistema como a Baía do Lobito o seu cálculo só pode ser feito numericamente porque os gradientes de salinidade são muito baixos. Neste trabalho foi seguida a metodologia proposta por Braunschweig *et al.* (2003) baseado no uso de traçadores lagrangeanos e incluído no modelo MOHID. De acordo com este método o tempo de residência é definido como o tempo necessário para expulsar 80% dos traçadores colocados no interior do sistema. Cada traçador tem um volume, definido de tal modo que o somatório dos volumes dos traçadores é igual ao volume total do sistema. O módulo lagrangeano do modelo MOHID permite a divisão do domínio em caixas e permite calcular o tempo de residência da água de cada caixa.

Para a aplicação na Baía do Lobito foram definidas três caixas representadas na Figura 9 (a). O volume total dos traçadores emitidos em cada caixa é igual volume da caixa e o volume das três caixas é igual ao volume da baía. A Figura 9 (b) mostra a localização dos traçadores 1 mês depois do início da simulação. A figura mostra que alguns traçadores saíram da baía, mas sobretudo mostra que houve mistura no interior da baía. Os traçadores azuis não são visíveis por questões técnicas. Estes traçadores são representados antes dos verdes e dos vermelhos e por isso ficam “cobertos” na imagem.

Os resultados apresentados foram obtidos com um modelo integrado na vertical e por isso a velocidade dos traçadores é obtida como o somatório da velocidade calculada pelo modelo hidrodinâmico e a componente aleatória não resolvida pelo modelo que foi admitida como sendo da ordem de 10% da velocidade instantânea.

A Figura 10 mostra a evolução temporal da percentagem de traçadores emitidos em cada uma das caixas, que ainda está no interior da baía. A caixa 1 (azul) está localizada no fundo da baía, a caixa 3 (vermelho) na zona da embocadura e a caixa 2

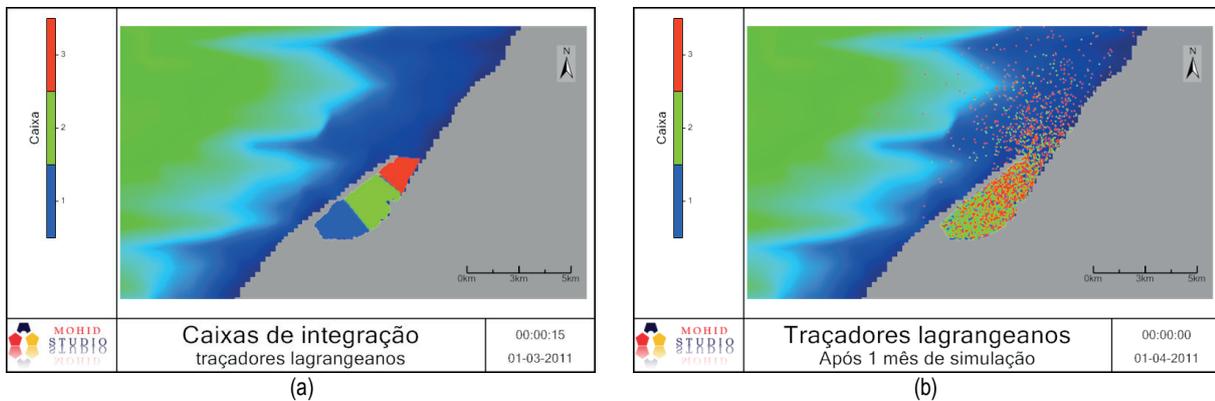


Figura 9. Localização inicial dos traçadores lagrangeanos (a) e depois de 1 mês de simulação (b).

(verde) está localizada entre as outras duas. Consequentemente os traçadores da caixa 3 saem mais rapidamente e os da caixa 1 são os que têm maior tempo de residência. Após um mês de simulação verifica-se que na caixa 1 (linha azul) permanecem cerca de 50% dos traçadores iniciais, na Caixa 2 (linha verde) cerca de 40% e na Caixa 3 (linha vermelha) cerca de 15%, mostrando que só na zona da embocadura é que o tempo de residência seria inferior a 1 mês se a maré fosse o mecanismo dominante de geração de escoamento.

A Figura 11 compara as evoluções temporais das percentagens de traçadores emitidos nas caixas 1 e 3 considerando só maré e (maré+vento). A figura apresenta evoluções muito semelhantes, mostrando que o vento altera pouco os resultados de simulações 2D.

4. CONCLUSÕES

A aplicação do modelo hidrodinâmico bidimensional à Baía do Lobito permitiu simular a propagação da maré e conhecer os

campos de velocidade transiente e residual na baía e região envolvente e estimar os tempos de residência nas diferentes partes da baía. O trabalho permitiu verificar que o forçamento do modelo na fronteira aberta usando resultados do modelo FES2004 é adequado, tendo o modelo reproduzido os níveis de maré reconstituídos a partir das constituintes harmónicas extraídas dos dados maregráficos existentes para o interior da baía. As alturas de maré são inferiores a 1 m, mesmo em maré viva. As componentes mais importantes são as semidiurnas, M2, S2 e N2. A componente diurna mais importante é a K1, com uma amplitude que é cerca de 15% da M2. As correntes de maré são globalmente baixas, atingindo intensidades máximas na zona da embocadura da ordem dos 5 cm/s como consequência da pequena amplitude da maré e sobretudo das pequenas dimensões da baía. Como consequência das baixas intensidades das correntes de maré, também as correntes residuais são de baixa intensidade (da ordem de 1 mm/s). No interior da baía existem dois vórtices residuais cada um deles ocupando sensivelmente metade da Baía. Como consequência, se a maré fosse o principal mecanismo de forçamento do

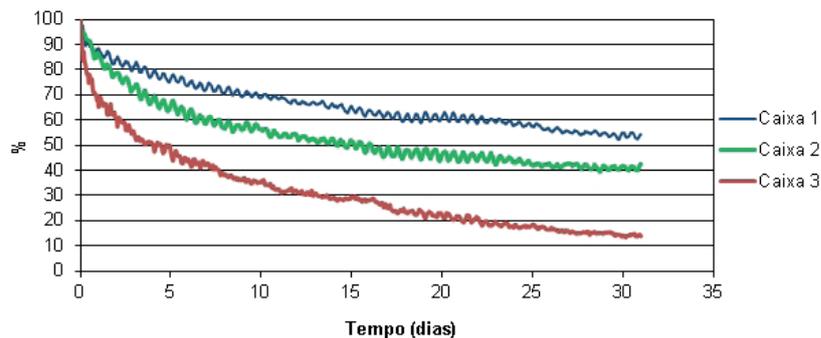


Figura 10. Evolução temporal da percentagem de traçadores emitidos em cada uma das caixas que ainda está no interior da baía - Caixa 1 (fundo da baía), Caixa 2 (zona intermédia da baía) e Caixa 3 (embocadura da baía) - considerando exclusivamente o forçamento de maré.

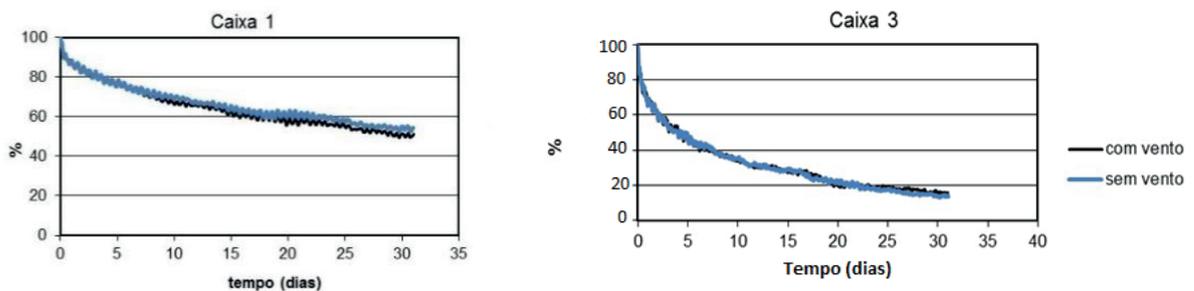


Figura 11. Comparação da evolução temporal da percentagem de traçadores, com e sem vento, em bidimensional, nas caixas 1 e 3. Os resultados mostram que em 2D o vento não altera o escoamento de maré.

escoamento a água tenderia a recircular em duas células e o tempo de residência (ou de renovação) da água seria muito elevado, sendo na região mais interior da baía da ordem dos dois meses.

O vento (nesta simulação 2D) tem globalmente pouca influência nos resultados da hidrodinâmica da baía por o *fetch* ser pequeno e por a profundidade ser elevada. Contudo, o efeito do vento associado a estratificação térmica acentuada pode alterar radicalmente o escoamento superficial e através deste o transporte de materiais flutuantes. O estudo da ação do vento tem por conseguinte que ser levado a cabo com um modelo 3D baroclínico. Esse será o tema da Parte 2 deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Ascione Kenov, I.; Garcia, A.C.; Neves, R. (2012). Residence time of water in the Mondego estuary (Portugal). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 106:13-22. DOI: 10.1016/j.ecss.2012.04.008.
- Braunschweig, F.; Martins, F., P. Leitão; Neves, R. (2003). A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the Tagus Estuary case. *Ocean Dynamics*. 53: 137-145. DOI: 10.1007/s10236-003-0040-0.
- Cancino, L.; Neves, R. (1999). Hydrodynamic and sediment suspension modelling in estuarine systems. Part I: Description of the numerical models. *Journal of Marine Systems*, 22: 105-116. DOI: 10.1016/S0924-7963(99)00035-4.
- Coelho, H.; Neves, R.; Leitão, P.; Martins, H.; Santos, A. (1999). The slope current along the western European margin: A numerical investigation. *Bol. Inst. Esp. Oceanografia* (ISSN: 0074-0195), 15(1-4): 61-72.
- Gomes, N.; Neves, R.; Ascione-Kenov, I.; Campuzano, F.J.; Pinto, L. (2015). Tide and Tidal Currents in the Cape Verde Archipelago. *Revista de Gestão Costeira Integrada/Journal of Integrated Coastal Management* 15(3): 395-408. DOI: DOI:10.5894/rgci483.
- Juliano, M.; Alves, M. (2007). The Atlantic Subtropical Front/Current Systems of Azores and St. Helena, *JPO*, 37, pp 2573 - 2598. DOI: 10.1175/2007JPO3150.1.
- Mateus, M.; Neves R. (2013). In: *Ocean modelling for coastal management - Case studies with MOHID*. Eds. M. Mateus & R. Neves. ISBN 978-989-8481-24-5. Available on-line at <http://www.mohid.com/PublicData/Products/BookPapers/2013OceanModellingMOHID.pdf>
- Malhadas, M.S.; Neves, R.; Leitão, P.C.; Silva, A. (2010). Influence of tide and waves on water renewal in Óbidos Lagoon, Portugal. *Ocean Dynamics* 60:41-55. DOI: 10.1007/s10236-009-0240-3.
- Martins, F.; Leitão, P.; Silva, A.; Neves, R. (2001). 3D modelling in the Sado estuary using a new generic vertical discretization approach. *Oceanologica Acta*. 2001; 24(1):51-62. DOI: 10.1016/S0399-1784(01)00092-5
- Neves, R. (2013). *The Mohid Concept*. In: *Ocean modelling for coastal management - Case studies with MOHID*. Eds. M. Mateus & R. Neves, pp 1-11. ISBN: 978-989-8481-24-5. Available on-line at http://www.mohid.com/PublicData/Products/BookPapers/2013_mohidbook_C01.pdf.
- Salgueiro, D. V.; de Pablo, H.; Neves, R.; Mateus, M. (2015). Modelling the thermal effluent of a near coast power plant (Sines, Portugal). *Journal of Integrated Coastal Management*, 15-4. DOI: 10.5894/rgci577.
- Sangolay, B. (2004). Caracterização dos eventos quentes e de baixa salinidade ao longo da plataforma continental angolana (1982-1999). 117p, Tese de Mestrado em Estudos Marinhos e Costeiros, Faculdade de Ciências do Mar e Ambiente, Universidade do Algarve, Portugal.
- Schneider, R.R.; Müller, P.J.; Ruhland, G.; Meinecke, G.; Schmidt, H.; Wefer, G. (1996). Late Quaternary surface temperatures and productivity in the east-equatorial South Atlantic: response to changes in trade/monsoon wind forcing and surface water advection. In Wefer, G., Berger, W.H., Siedler, G., and Webb, D. (Eds.), *The South Atlantic: Present and Past Circulation*: Berlin (Springer-Verlag), 527-551.
- Stramma, L.; England, M. (1999). On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. *JGR*, Vol. 104, C9, pp 20863 - 20883. DOI: 10.1029/1999JC900139.
- Taboada, J. (1998). Evaluation of the Seasonal Variations in the Residual Circulation in the Ria of Vigo (NW Spain) by Means of a 3D Baroclinic Model. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 47(5): 661-670. DOI: 10.1006/ecss.1998.0385.
- Vaz, N.; Dias, J.; Leitão, P.; Martins, I. (2005). Horizontal patterns of water temperature and salinity in an estuarine tidal channel: Ria de Aveiro. *Ocean Dynamics*. 55. 416-429. DOI: 10.1007/s10236-005-0015-4.
- Vaz, N; Mateus, M.; Plecha, S.; Sousa, M.C.; Leitão, P.C.; Neves, R.; Dias, J.M. (2015). Modeling SST and chlorophyll patterns in a coupled estuary-coastal system of Portugal: The Tagus case study. *JMS*, 147, 123-137. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2014.05.022.