



Implementação de um modelo hidrodinâmico tridimensional a uma área de aquicultura de peixe em Sines, Portugal

Alexandre Miguel Campos Correia

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia do Ambiente

Orientadores: Professor Doutor Marcos Duarte Mateus
Professora Doutora Lúgia Laximi Machado de Amorim Pinto

Júri

Presidente: Professora Doutora Ana Fonseca Galvão
Orientador: Professora Doutora Lúgia Laximi Machado de Amorim Pinto
Vogais: Doutor Paulo Miguel Chambel Filipe Lopes Teles Leitão

Julho de 2019

Agradecimentos

Várias pessoas foram importantes na realização deste trabalho, aqui fica o meu agradecimento.

Aos professores Marcos Mateus e Lúcia Pinto que me deram a oportunidade de realizar esta dissertação e de o fazer no grupo de investigação MARETEC.

À Hilda e ao João sobrinho que me ajudaram na resolução de vários problemas que surgiram e pela boa disposição.

Ao grupo MARETEC do Instituto Superior Técnico, que me aceitou e recebeu e foi essencial na realização deste trabalho.

Ao grupo MARE da Faculdade de Ciências, em especial à Mara que torna qualquer saída de campo mais divertida.

Aos meus pais, Gabriela e José, pelo esforço que fizeram para eu poder estudar e por todo o apoio que me oferecem.

À minha outra metade, Margarida, que me ajuda mais do que possa imaginar.

Aos amigos mais antigos, Francisco, Ricardo, Tiago e João Ambrósio pelos jantares e jogos de voleibol.

Aos amigos que o técnico juntou, Filipa, Ricardo e Marta pelas longas horas a acabar trabalhos.

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto PiscisMod (código de operação: MAR-02.01.01 - FEAMP-0049) que é financiado pelo programa operacional MAR 2020 (www.mar2020.pt)

Resumo

O peixe é uma importante fonte de proteína na dieta humana e o seu consumo mundial tem vindo a aumentar. Desde a década de 1980 que o aumento da oferta de peixe deve-se ao aumento de produção por aquicultura enquanto a produção por captura se mantém constante. A prática de aquicultura em zonas costeiras tem crescido mundialmente e em Portugal. No entanto, esta situação apresenta novos desafios de gestão devido à grande variabilidade espacial e temporal das condições meteorológicas e hidrológicas, bem como o espaço limitado das zonas costeiras. Os modelos numéricos e hidrodinâmicos são importantes ferramentas no auxílio das atividades costeiras e de aquicultura, permitindo a utilização de previsões para uma toma de decisões mais informada e correta.

Nesta dissertação apresenta-se a implementação de um modelo tridimensional hidrodinâmico na zona do porto de Sines, Portugal. É utilizado o sistema de modelação MOHID que utiliza o método dos volumes finitos e uma malha do tipo Arakawa-C para a discretização especial das equações. O modelo de Sines é implementado seguindo uma metodologia de *downscaling* de um modelo operacional da costa Portuguesa e foca-se na zona de aquicultura no porto de Sines, atingindo uma resolução espacial perto de 25 metros. São utilizadas 7 camadas sigma à superfície seguidas de camadas cartesianas.

O modelo foi calibrado tendo em conta vários cenários de porosidade do pontão existente no porto de Sines. Foi validado com séries temporais de temperatura e maré e perfis de temperatura, salinidade, densidade e velocidades recolhidos *in situ*.

Palavras-chave: MOHID, Modelação Oceânica, Downscaling, Gestão de Zonas Costeiras, Aquicultura de Peixe, Pontão Poroso

Abstract

Fish is an important source of protein in the human diet and its consumption has been increasing. Since the decade of 1980 the increase in fish supply is due to the rise of aquaculture production while production from capture remains constant. The aquaculture practice in coastal zones has been increasing globally and in Portugal. However, this situation presents new challenges in management due to the spatial and temporal variability of meteorological and hydrologic conditions, as well as the limited space in coastal zones. Numerical and hydrodynamic models are important tools in the management of coastal activities and aquaculture, allowing a more informed decision making by using predictions on the state of the ocean.

In this dissertation a three-dimensional hydrodynamic model in the area of the port of Sines, Portugal is presented. The MOHID modelling system is used which utilizes a finite volume approach and an Arakawa-C staggered grid for spatial equation discretization. The Sines model is implemented following a downscaling methodology from an operational model for the Portuguese coast. Its focus is on the aquaculture area in the port of Sines reaching a spatial resolution of near 25 meters. 7 sigma layers are used on the surface followed by cartesian layers.

The model was calibrated considering several porosity scenarios for the breakwater in the port of Sines. It was validated with temperature and tide time series and temperature, salinity, density and velocities profiles recorded *in situ*.

Keywords: MOHID, Ocean Modelling, Coastal Zone Management, Fish Aquaculture, Porous Breakwater

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Contexto	1
1.2.	Objetivos.....	3
2.	Estado da Arte	4
2.1.	Caracterização da Zona de Estudo.....	4
2.2.	Aquicultura	7
2.2.1.	Produção em Portugal	7
2.3.	Modelação Hidrodinâmica	8
2.3.1.	Sistema de Modelação MOHID.....	9
3.	Métodos.....	11
3.1.	Descrição do Modelo Numérico MOHID	11
3.1.1.	Equações Resolvidas pelo Modelo	12
3.1.1.1.	Velocidades horizontais	12
3.1.1.2.	Cota da superfície livre e da velocidade vertical	13
3.1.1.3.	Difusão turbulenta.....	13
3.1.1.4.	Propriedades da água.....	13
3.1.2.	Discretização das Equações.....	14
3.2.	Implementação do Modelo	15
3.2.1.	Batimetrias	17
3.2.2.	Condições de Fronteira.....	18
3.2.3.	Descargas e Sumidouro da Central Elétrica.....	20
3.2.4.	Pontão do Porto de Sines	21
3.3.	Campanhas de Amostragem	22
3.4.	Calibração e Validação do Modelo	26
4.	Resultados e Discussão.....	29
4.1.	Validação do Domínio 2	29
4.2.	Calibração do Domínio 5	30

4.2.1.	Campanha 1 – 29/06/2018	30
4.3.	Validação do Domínio 5	37
4.3.1.	Campanha 2 – 25/10/2018	37
4.3.2.	Campanha 3 – 12/03/2019	41
4.3.3.	Campanha 4 – 30/04/2019	44
4.4.	Mapas de Resultados.....	47
4.4.1.	Campanha 1 – 29/06/2018	47
4.4.2.	Campanha 2 – 25/10/2018	51
4.4.3.	Campanha 3 – 12/03/2019	56
4.4.4.	Campanha 4 – 30/04/2019	61
5.	Conclusões.....	64
6.	Bibliografia.....	66
Anexo A	a
Anexo B	b

Índice de Figuras

Figura 1.1. Produção mundial de peixe por captura e por aquicultura, adaptado de FAO, (2018).	1
Figura 2.1. Localização da cidade de Sines em Portugal.....	5
Figura 2.2. Áreas de importância na zona de Sines.....	5
Figura 2.3. Área destinada à prática de aquicultura e zona das instalações da empresa Seaculture no porto de Sines.	6
Figura 2.4. Fotografia das jaulas de aquicultura no porto de Sines.	6
Figura 2.5. Produção de peixe em aquicultura por ano.....	8
Figura 2.6. Produção de moluscos em aquicultura por ano.	8
Figura 3.1. Exemplo de um domínio com 4 camadas sigma e com 4 camadas cartesianas. Adaptado de MARETEC (2012).....	15
Figura 3.2. Dados batimétricos do EMODnet e do Instituto Hidrográfico e as interpolações para as malhas dos domínios do modelo de Sines.	18
Figura 3.3. Células da malha em que foram definidos sumidouros (símbolo verde) e descargas (símbolo azul) no domínio 4 (esquerda) e no domínio 3 (direita).....	20
Figura 3.4. Polígono utilizado para definir o pontão (esquerda) e as células correspondentes (direita). .	22
Figura 3.5. Barco e aparelhos utilizados durante as campanhas ao porto de Sines. A – Barco disponibilizado pela Seaculture – Aquicultura, S.A. para as campanhas. B – Sonda multiparamétrica, modelo YSI-Exo2, logger e computador de campo. C – Sonda CTD, modelo FSI NXIC CTD	24
Figura 3.6. Localização das estações de amostragem utilizadas durante as campanhas.....	25
Figura 3.7. Localização da boia de Sines (bandeira preta e do marégrafo (bandeira azul) do Instituto Hidrográfico em relação ao domínio 2 do modelo.	27
Figura 4.1. Resultados do domínio 2 do modelo e observações da boia e do marégrafo de Sines para temperatura e nível da água.	30
Figura 4.2. Batimetrias utilizadas na calibração do modelo e os cenários correspondentes.	31
Figura 4.3. Campanha 1 – Perfis de velocidade do modelo, cenários 1 e 2, e observações.....	32
Figura 4.4. Campanha 1 – Perfis de temperatura do modelo, cenários 1 e 2, e observações.....	33
Figura 4.5. Campanha 1 – Perfis de velocidade do modelo, cenários 2, 3 e 4, e observações.	34
Figura 4.6. Campanha 1 – Perfis de temperatura do modelo, cenários 2, 3 e 4, e observações.....	35
Figura 4.7. Campanha 1 – Perfis de velocidade do modelo, cenários 4 e 5, e observações.....	36
Figura 4.8. Campanha 1 – Perfis de temperatura do modelo, cenários 4 e 5, e observações.....	36
Figura 4.9. Campanha 2 – Perfis de temperatura do modelo com condições de fronteira oceânicas dos modelos PCOMS e LUSITANIA e observações.	38
Figura 4.10. Campanha 2 – Perfis de velocidade do modelo com condições de fronteira oceânicas dos modelos PCOMS e LUSITANIA e observações.	39

Figura 4.11. Campanha 2 – Perfis de salinidade do modelo com condições de fronteira oceânicas dos modelos PCOMS e LUSITANIA e observações.	39
Figura 4.12. Campanha 2 – Perfis de densidade do modelo com condições de fronteira oceânicas dos modelos PCOMS e LUSITANIA e observações.	40
Figura 4.13. Campanha 3 – Perfis de velocidade do modelo com condições de fronteira oceânicas dos modelos PCOMS e LUSITANIA e observações.	42
Figura 4.14. Campanha 3 – Perfis de temperatura do modelo com condições de fronteira atmosféricas dos modelos MM5 e WRF e observações.	42
Figura 4.15. Campanha 3 – Perfis de salinidade do modelo com condições de fronteira atmosféricas dos modelos MM5 e WRF e observações.	43
Figura 4.16. Campanha 3 – Perfis de densidade do modelo com condições de fronteira atmosféricas dos modelos MM5 e WRF e observações.	43
Figura 4.17. Campanha 4 – Perfis de temperatura do modelo e observações.	45
Figura 4.18. Campanha 4 – Perfis de salinidade do modelo e observações.	46
Figura 4.19. Campanha 4 – Perfis de densidade do modelo e observações.	46
Figura 4.20. Campanha 1 – Resultados do nível da água do modelo ao longo do dia 29/06/2018 e instantes escolhidos para os mapas de resultados.	48
Figura 4.21. Campanha 1 – Mapa de resultados das velocidades para os domínios 4 e 5.	49
Figura 4.22. Campanha 1 – Mapa de resultados da temperatura para os domínios 4 e 5.	50
Figura 4.23. Campanha 2 – Resultados do nível da água do modelo ao longo do dia 25/10/2018 e instantes escolhidos para os mapas de resultados.	52
Figura 4.24. Campanha 2 – Mapa de resultados das velocidades para os domínios 4 e 5, utilizando condições de fronteira oceânicas do modelo PCOMS.	53
Figura 4.25. Campanha 2 – Mapa de resultados das velocidades para os domínios 4 e 5, utilizando condições de fronteira oceânicas do modelo LUSITANIA.	54
Figura 4.26. Campanha 2 – Mapa de resultados da temperatura para os domínios 4 e 5, utilizando condições de fronteira oceânicas do modelo PCOMS.	55
Figura 4.27. Campanha 2 – Mapa de resultados da temperatura para os domínios 4 e 5, utilizando condições de fronteira oceânicas do modelo LUSITANIA.	55
Figura 4.28. Campanha 3 – Resultados do nível da água do modelo ao longo do dia 12/03/2019 e instantes escolhidos para os mapas de resultados.	57
Figura 4.29. Campanha 3 – Mapa de resultados das velocidades para os domínios 4 e 5, utilizando condições de fronteira atmosférica do modelo MM5.	58
Figura 4.30. Campanha 3 – Mapa de resultados das velocidades para os domínios 4 e 5, utilizando condições de fronteira atmosférica do modelo WRF.	59
Figura 4.31. Campanha 3 – Mapa de resultados da temperatura para os domínios 4 e 5, utilizando condições de fronteira atmosférica do modelo MM5.	60

Figura 4.32. Campanha 3 – Mapa de resultados da temperatura para os domínios 4 e 5, utilizando condições de fronteira atmosférica do modelo WRF.	60
Figura 4.33. Campanha 4 – Resultados do nível da água do modelo ao longo do dia 30/04/2019 e instantes escolhidos para os mapas de resultados.	61
Figura 4.34. Campanha 4 – Mapa de resultados das velocidades para os domínios 4 e 5.	62
Figura 4.35. Campanha 4 – Mapa de resultados da temperatura para os domínios 4 e 5.	63

Índice de Tabelas

Tabela 3.1. Funções gerais dos módulos do sistema de modelação MOHID.	11
Tabela 3.2. Níveis do modelo e as suas resoluções em graus e metros na zona de Sines.....	16
Tabela 3.3. Coordenadas GPS das estações de amostragem utilizadas durante as campanhas e estações em que foram feitas medições em cada campanha.....	25
Tabela 4.1. Diferenças entre os cenários utilizados para a calibração do modelo. CD é o coeficiente de atrito e $12CD14x$ é o valor introduzido no ficheiro de entrada do MOHID.....	31
Tabela 4.2. Campanha 2 – Valores de RMSE e BE das comparações do modelo utilizando condições de fronteira oceânica do modelo PCOMS e LUSITANIA com as observações.	40
Tabela 4.3. Campanha 3 – Valores de RMSE e BE das comparações do modelo utilizando condições de fronteira atmosférica do modelo MM5 e WRF com as observações.	44
Tabela 4.4. Campanha 4 – Valores de RMSE e BE das comparações do modelo utilizando condições de fronteira atmosférica do modelo MM5 e WRF com as observações.	47
Tabela A.1. Camadas utilizadas em cada domínio e as respetivas profundidades. De 1 a 7 são camadas sigma e da 8 à 50 são camadas cartesianas.....	a

Lista de Notações e Acrónimos

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
BE	<i>Bias Error</i>
COARE	<i>Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment</i>
CTD	<i>Conductivity, Temperature and Depth</i>
EDP	Energias De Portugal
EMODnet	<i>European Marine Observation and Data Network</i>
GOTM	<i>General Ocean Turbulence Model</i>
IST	Instituto Superior Técnico
MARETEC	<i>Marine, Environmental and Technology Research Center</i>
MM5	<i>Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model</i>
MOHID	Modelo Hidrodinâmico
PCOMS	<i>Portuguese Coast Operational Modelling System</i>
PSU	<i>Practical Salinity Unit</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
WRF	<i>Weather Research and Forecasting</i>
UNESCO	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
EOS	<i>Equation of State</i>

1. Introdução

1.1. Contexto

O peixe é uma importante fonte de proteína na dieta humana e o seu consumo a nível mundial tem vindo a aumentar (Figura 1.1). Entre 1961 e 2016 observou-se um aumento médio anual mundial de consumo de 3.2% que não é relacionado apenas com o aumento da população que, comparativamente, tem um crescimento médio anual de 1.6% (FAO 2018). Assim, o aumento do consumo de peixe aumentou de 9 kg por pessoa por ano em 1961, para 20.3 kg por pessoa por ano em 2016. Neste ano, o consumo de peixe representou 17% do consumo total de proteína com origem animal (FAO 2018).

A produção de peixe por captura estabilizou no final da década de 1980 e manteve-se constante. Desde então, o aumento da produção de peixe deve-se ao crescimento da aquicultura, como se pode observar na Figura 1.1.

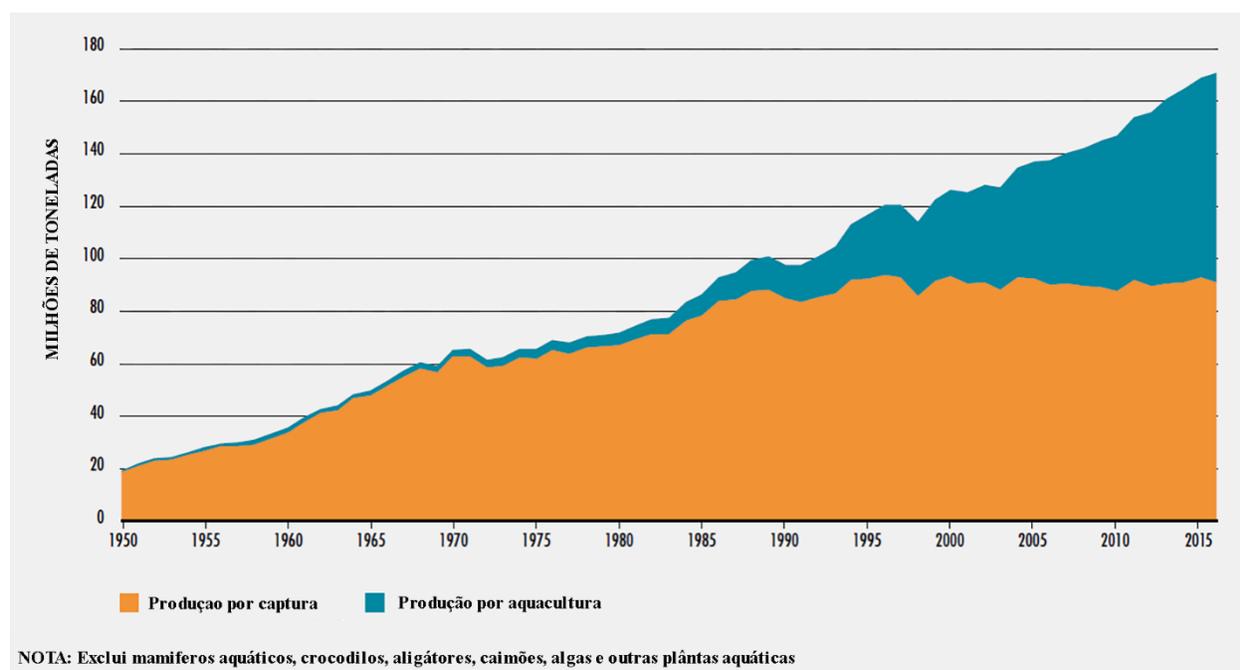


Figura 1.1. Produção mundial de peixe por captura e por aquicultura, adaptado de FAO, (2018).

Quanto às previsões para o futuro, os modelos aplicados por Barange et al. (2014) indicam que as variações na produção global de peixe, positivas ou negativas, devido ao aquecimento global em 2050 serão menores de 10%. A crescente procura de peixe como fonte de proteína, devido principalmente ao aumento da população em África e na Ásia, pode ser correspondida pelos avanços tecnológicos nas tecnologias de aquicultura.

O desenvolvimento da aquicultura em zonas costeiras tem crescido mundialmente e em Portugal verifica-se a mesma tendência. No entanto, as condições meteorológicas e hidrológicas podem apresentar um risco para a produção, sendo necessário determinar os locais mais apropriados para a prática, o que representa um desafio visto a multiplicidade de atividades que competem pelo espaço limitado das zonas costeiras. A prática de aquicultura no mar deixa a produção exposta às condições do meio e aos eventos climatológicos locais. Eventos extremos como *blooms* de algas tóxicas ou tempestades podem colocar em risco toda a produção. Devido a isto, é importante que a prática de aquicultura nas zonas costeiras utilize ferramentas e sistemas de gestão que permita prever estes eventos nocivos e salvaguardar a produção.

As zonas costeiras sempre foram a preferência para povoações humanas devido, em primeiro, aos recursos de subsistência existentes, mas também devido à propensão destas áreas para atividades recreacionais e culturais. São também importantes por oferecerem pontos de acesso ao transporte e troca marítima. Consequentemente, a densidade populacional é maior nestas zonas quando comparadas com os restantes territórios (Small and Nicholls 2003) e é previsto que a migração para as zonas costeiras que se tem sentido nas últimas décadas continue no futuro (Hugo 2011). Este crescimento populacional nas zonas costeiras aumenta, conseqüentemente, o número de pessoas expostas a riscos característicos destes locais, como eventos naturais extremos (Hanson et al. 2010) e cheias devido ao aumento do nível médio do mar (Neumann et al. 2015).

A ocupação humana e desenvolvimento das zonas costeiras geram uma elevada pressão nos recursos naturais e nos ecossistemas (Crossland et al. 2004). Um elevado número de atividades, desde recreacionais até comerciais, competem pelos recursos limitados do oceano levando frequentemente a impactos negativos (Halpern et al. 2008). Para enfrentar estas pressões crescentes, é necessária uma gestão que promova a utilização consciente dos recursos marinhos de forma a cumprir as necessidades atuais sem comprometer as gerações futuras e os ecossistemas locais.

Os oceanos e as zonas costeiras apresentam uma maior variabilidade espacial e temporal quando comparadas a zonas terrestres. Esta diferença torna a gestão destas áreas mais exigente (Carr et al. 2003) sendo necessário uma abordagem dinâmica de gestão para igualar o dinamismo do sistema (Lewison et al. 2015). Um sistema de gestão dinâmico eficiente requer fontes de informação em tempo real (Maxwell et al. 2015). Modelos numéricos são ferramentas importantes no auxílio das atividades costeiras e marinhas devido à sua capacidade de fornecer continuamente estimativas e previsões do estado do oceano. Os resultados dos modelos podem ainda ser combinados com outros dados para aumentar a capacidade de gestão do espaço marinho e costeiro (Fernandes et al. 2016; Neves et al. 2000).

1.2. Objetivos

Esta dissertação foi elaborada dentro do âmbito do projeto PiscisMod. Contribuindo, deste modo, para o desenvolvimento do seu plano de trabalhos. O projeto PiscisMod é financiado pelo programa operacional MAR 2020 (www.mar2020.pt) (código de operação: MAR-02.01.01 - FEAMP-0049), tendo como foco uma unidade de exploração de aquicultura de peixe existente no porto da cidade de Sines (Portugal), gerida pela empresa SeaCulture – Aquicultura, S.A., do grupo Jerónimo Martins Agroalimentar. Este projeto tem como objetivos a criação de uma ferramenta que permita:

1. Adaptar a ração às condições ambientais predominantes ao longo do ano e a eventos pontuais que impliquem variações na temperatura de água, velocidade das correntes, crescimento excessivo de microalgas ou das concentrações de oxigénio dissolvido na água.
2. Avaliar e prever os efeitos da produção na qualidade da água do meio recetor.

Para tal, o projeto está dividido em 5 ações:

Ação 1 – Monitorização ambiental e apoio a medidas de sustentabilidade

Ação 2 – Modelação numérica

Ação 2a – Modelação do ambiente

Ação 2b – Modelação bioenergética dos peixes

Ação 3 – Interações com o meio natural

Ação 4 – Otimização da dieta

Ação 5 – Transferência de conhecimento

Esta dissertação incide sobre a Ação 2a, mais especificamente no desenvolvimento de um modelo hidrodinâmico que produza resultados com precisão suficientes para que se possa, posteriormente, desenvolver a modelação bioenergia dos peixes e a otimização da dieta (ações 2b e 4).

O modelo hidrodinâmico será desenvolvido no formato tridimensional utilizando o sistema de modelação MOHID. O modelo deverá apresentar uma resolução espacial suficientemente elevada para que seja possível representar as jaulas da aquicultura.

2. Estado da Arte

2.1. Caracterização da Zona de Estudo

Sines é uma cidade da região do Alentejo localizada na costa oeste de Portugal (ver Figura 2.1). Tem uma população de mais de 14 000 habitantes (PORDATA 2011) e uma área de 203.30 km². Sines tem uma importante contribuição na produção e armazenamento de energia em Portugal. Existem dois centros de produção de produtos de petróleo e gás, a refinaria da Galp e o complexo petroquímico industrial da Repsol, ambos ligados por tubagens ao terminal petroquímico do porto de Sines (a vermelho na Figura 2.2) (Câmara Municipal de Sines 2019). Na zona mais a sudeste do porto, perto do início da praia de São Torpes, está situada a central termoelétrica de Sines da EDP.

O porto de Sines, localizado a sul da cidade, é o porto de águas profundas mais importante de Portugal. Possui condições geofísicas que permitem aceitar uma grande variedade de navios, é a maior via de entrada de energia no país (petróleo e derivados, carvão e gás natural) e também um importante ponto de entrada de carga contentorizada. O porto consiste em 5 terminais – granéis líquidos, petroquímico, polivalente, gás natural e de contentores – e ainda um porto de recreio e um porto de pesca (Porto de Sines 2019a).

A central termoelétrica de Sines está situada a cerca de 3.5 quilómetros a sudeste da zona de aquicultura e utiliza a água do mar no processo de arrefecimento dos geradores. A recolha e a restituição de água estão protegidas por quebra-mares e encontram-se próximos da praia São Torpes. A água é descarregada por dois canais abertos com 4.5 metros de profundidade que estão a, aproximadamente, 400 metros da recolha. A central utiliza, numa média anual, 40 m³/s de água (EDP 2017). A água descarregada encontra-se a uma temperatura mais elevada do que quando é recolhida e, por isso, do meio recetor.

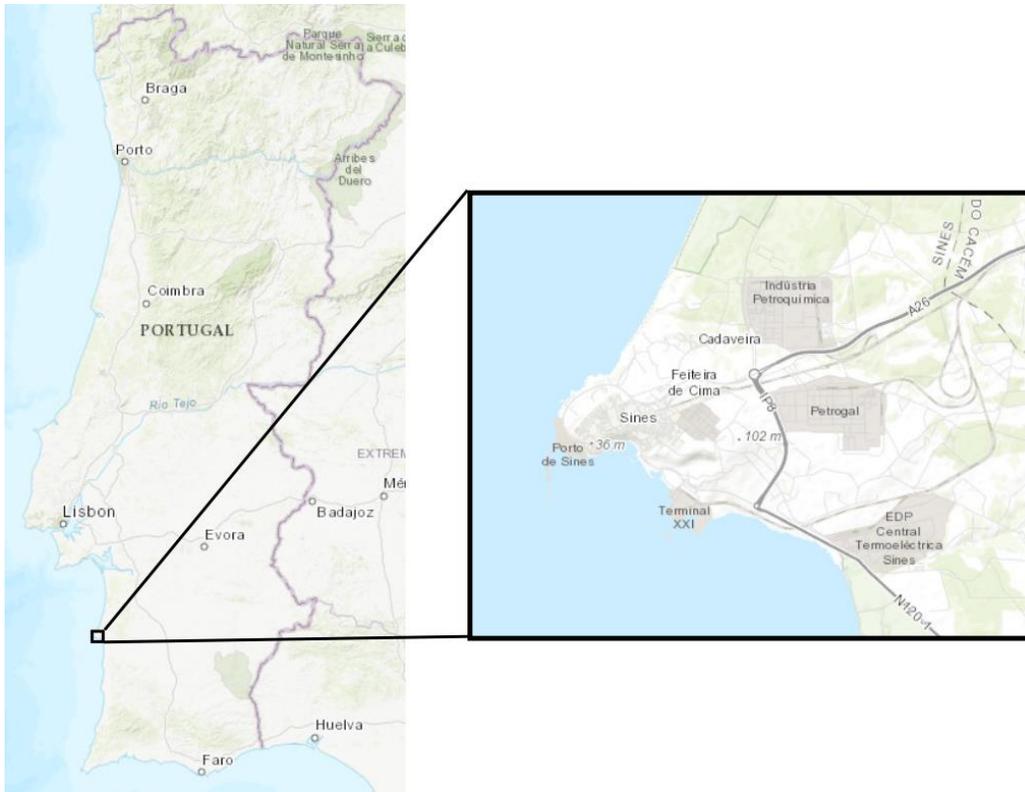


Figura 2.1. Localização da cidade de Sines em Portugal.

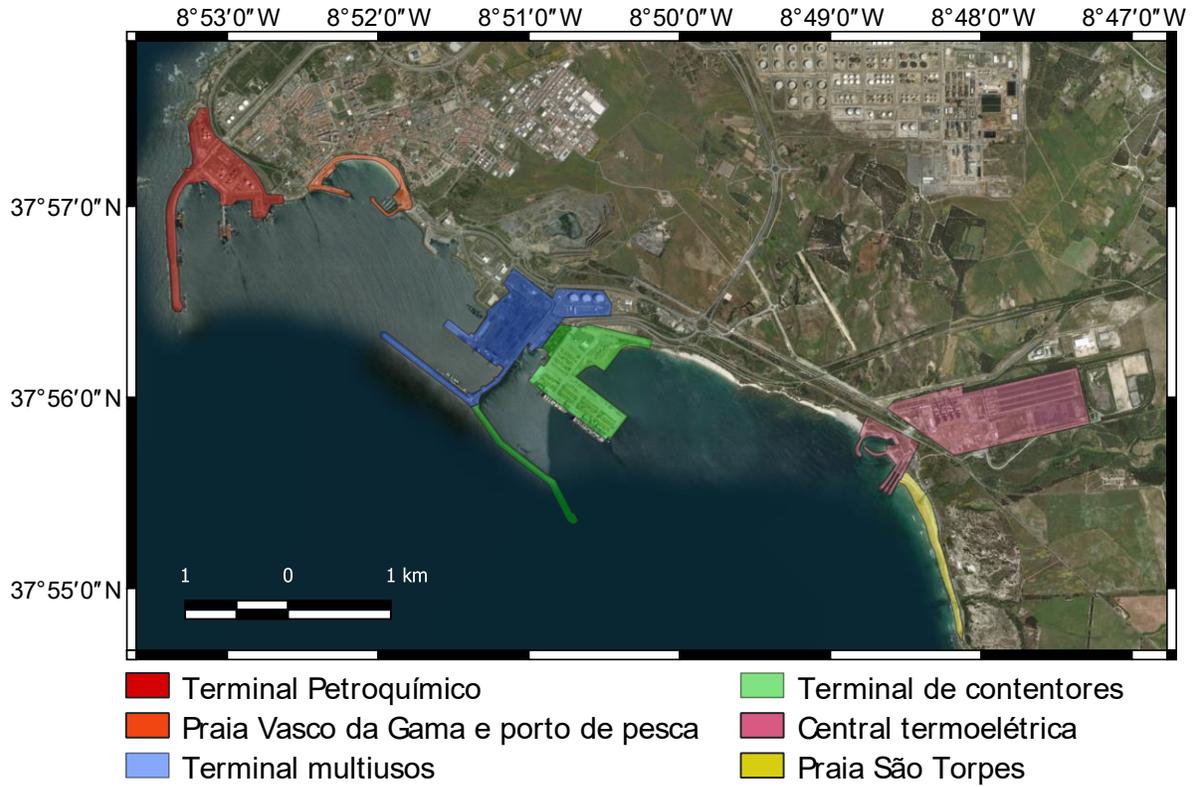


Figura 2.2. Áreas de importância na zona de Sines.

No terminal de contentores e próximo ao quebra-mar existe uma área delimitada para a exploração de aquicultura ao encargo da empresa Seaculture – Aquicultura, S.A. destinada à produção de peixe (Figura 2.3 e Figura 2.4). A exploração consiste, até à data, num conjunto de 16 jaulas com uma capacidade de produção de 500 toneladas por ano de robalo (*Dicentrarchus labrax*). O quebra-mar do terminal de contentores é poroso e permite a passagem de alguma água do exterior do porto para o interior e vice-versa.

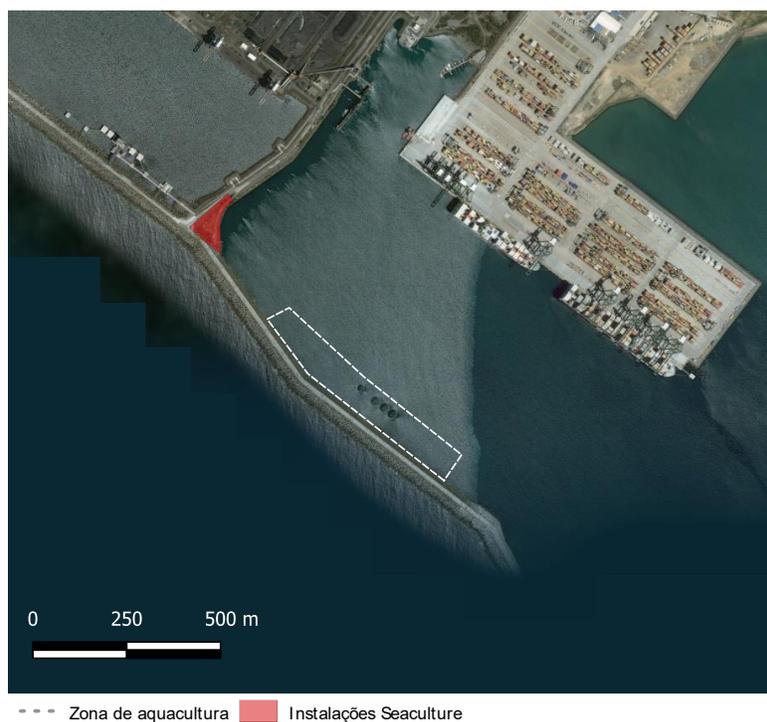


Figura 2.3. Área destinada à prática de aquicultura e zona das instalações da empresa Seaculture no porto de Sines.



Figura 2.4. Fotografia das jaulas de aquicultura no porto de Sines.

2.2. Aquicultura

Segundo a Direção-Geral de Recursos Naturais, Segurança e Serviços Marítimos (DGRM), a aquicultura consiste na criação ou cultura de organismos aquáticos, recorrendo a técnicas concebidas para aumentar a produção desses mesmos organismos além do que as capacidades do meio permitem (APA 2018).

A prática de aquicultura pode ser separada em três regimes de produção:

Regime extensivo – Utiliza exclusivamente as condições naturais disponíveis. A espécie a cultivar é capturada no meio natural ou proveniente de unidades de reprodução. A alimentação é feita em exclusivo utilizando recursos naturais.

Regime semi-intensivo – Recorre-se a reprodução artificial para a obtenção de ovos e juvenis. Durante o crescimento efetuam-se amostragens e calibrações para otimizar o crescimento e aumentar o rendimento. Utiliza-se alimento natural e suplementos alimentares artificiais.

Regime intensivo – Todos os parâmetros de produção encontram-se em permanente observação. São realizadas amostragem e calibrações sucessivas para se aumentar o rendimento, controlando-se a reprodução e o crescimento. Utiliza-se exclusivamente alimento artificial.

2.2.1. Produção em Portugal

Portugal é um país com um elevado consumo de peixe. Dados de 2012 indicam um consumo médio de cerca 56.7 kg por habitante por ano (DGRM 2014), superior ao valor médio mundial de 19.2 kg por habitante por ano para o mesmo ano (FAO 2014). O peixe produzido e pescado em Portugal não é suficiente para dar resposta a esta procura, causando um balanço negativo na balança comercial dos produtos de pesca, que apresenta um saldo deficitário de 1 022.9 milhões de euros (INE 2018).

Em Portugal, e no resto do mundo, existem cada vez mais restrições à pesca extrativa. Devido a uma favorável localização geográfica, Portugal mostra um grande potencial por explorar no que diz respeito à produção aquícola (APA 2018). Desde o início dos anos 90 a produção aquícola em Portugal cresceu de 4 457 toneladas em 1990, para 11 259 toneladas em 2016, representando um valor de 75.2 milhões de euros nesse ano (INE 2018).

Quanto às principais espécies exploradas na aquicultura nacional, no que toca a peixe são: a truta, dourada, robalo e pregado. Quanto às espécies de moluscos, existem explorações importantes de amêijoas, ostra e mexilhão. Existem variações significativas nas espécies exploradas entre 2004 e 2016 (ver Figura 2.5), observa-se o aumento da produção de pregado e uma diminuição significativa na produção de robalo. Nas espécies de moluscos, nota-se um aumento das três espécies ao longo do tempo (Figura 2.6).

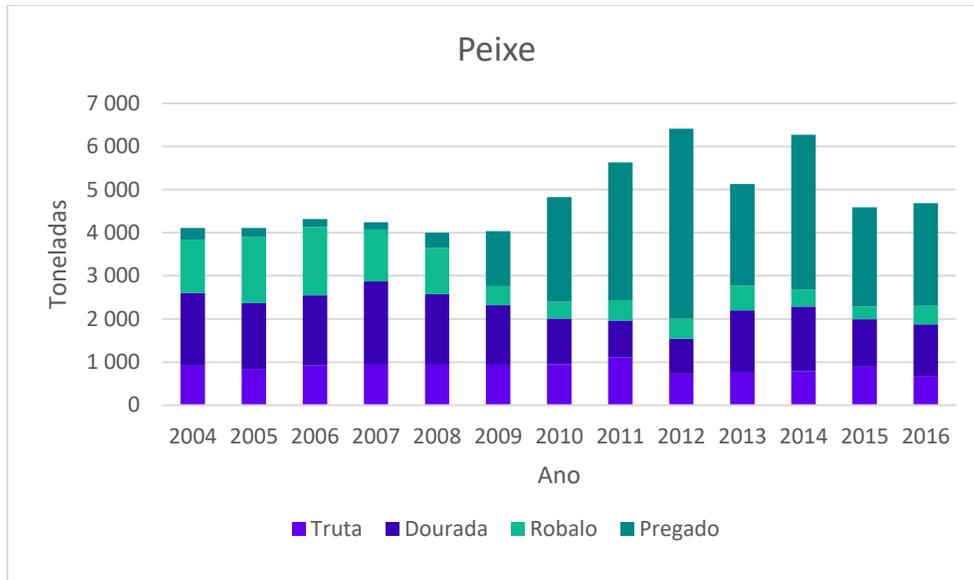


Figura 2.5. Produção de peixe em aquicultura por ano.

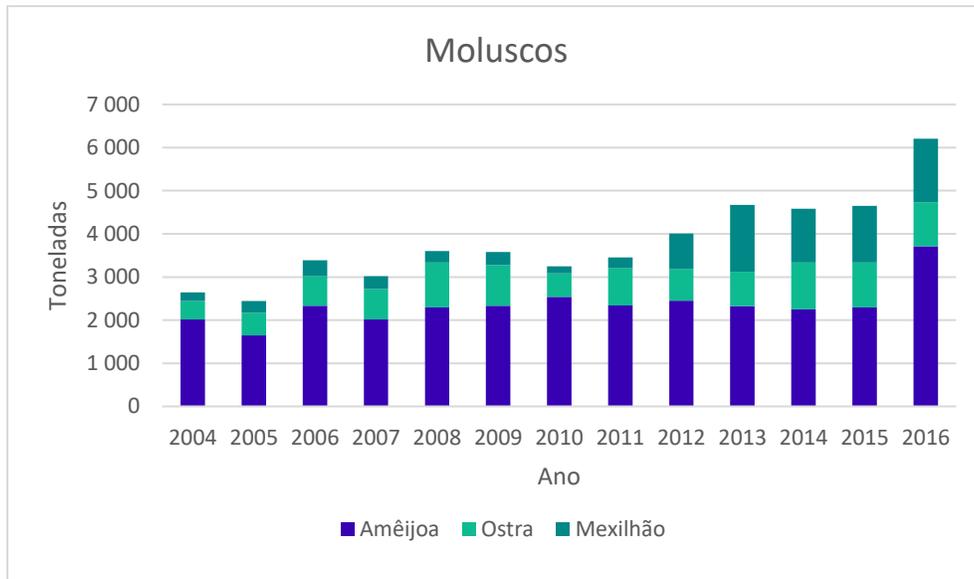


Figura 2.6. Produção de moluscos em aquicultura por ano.

2.3. Modelação Hidrodinâmica

A modelação hidrodinâmica surge com o desenvolvimento da computação nos anos 1960. Nesta década, os primeiros métodos de discretização temporal para escoamentos com pressão hidrostática foram publicados e desenvolvidos para modelos 2D (Heaps 1969; Leendertse 1967). Na década de 1970 verificou-se um aumento no número de aplicações e investigação sobre os métodos numéricos, especialmente nos métodos que permitem minimizar a difusão numérica causada pela resolução dos termos advectivos, como

o mostrado em Leonard (1979). Nos anos 1980, com o aumento da capacidade de computação e o conhecimento na área de modelação da turbulência gerado na década de 1970 (Launder et al. 1975), houve um grande desenvolvimento de modelos tridimensionais (3D), que possibilitam a simulação da circulação oceânica. Durante a década de 1990 vários modelos emergiram e ganharam notoriedade, como o modelo GHER da universidade de Liège, na Bélgica (Beckers 1991), o *Princeton Ocean Model (POM)* da universidade de Princeton, nos Estados Unidos da América (Blumberg and Mellor 1987) e o *Modular Ocean Model (MOM)* (Pacanowski et al. 1991). Desde a segunda metade da década de 1990, com os avanços tecnológicos sentidos, tanto a nível de *software*, como de *hardware*, iniciou-se o acoplamento de módulos criados por vários autores no mesmo modelo, criando um modelo integrado. Um dos primeiros exemplos são os modelos de turbulência, como o GOTM (*General Ocean Turbulence Model*) (Burchard et al. 1999). Também ocorre a integração de vários modelos, uma integração de segundo nível. Como por exemplo, a integração do modelo GOTM a modelos hidrodinâmicos, para resolução da turbulência.

Em paralelo, ocorreu o desenvolvimento de modelos ecológicos. Entre os pioneiros encontram-se o modelo WASP (Di Toro et al. 1983). Estes modelos utilizavam um passo temporal elevado, de um dia, sendo que a variabilidade de fluxos a curto prazo, como a maré, era tido em conta utilizando coeficientes de difusão. Durante os anos 80 e 90, e beneficiando do progresso científico e tecnológico, os modelos ecológicos evoluíram e foram agregados a modelos físicos, gerando os atuais modelos integrados. Atualmente o interesse na área de modelação foca-se sobre a modelação operacional, integrando diferentes disciplinas e assimilando tantos quanto possíveis de dados de campo recolhidos, com um ênfase em especial na deteção remota.

2.3.1. Sistema de Modelação MOHID

O desenvolvimento do MOHID iniciou-se na década de 1980, no Instituto Superior Técnico (Neves 1985) e começou como um modelo hidrodinâmico a duas dimensões, foi sendo desenvolvido de forma a tornar-se num sistema integrado de modelação de marés em estuários. Evoluiu progressivamente, incluindo a capacidade de simulação de ondas (Silva 1991), qualidade da água (Portela 1996), escoamentos a três dimensões (Santos 1995). Deu-se também o desenvolvimento de novos métodos numéricos (Martins et al. 2001) e do aumento das condições de fronteira aceites (Leitão 2002). O MOHID foi reorganizado com a perspectiva de englobar módulos para diversos processos (Braunschweig et al. 2004). Com esta reorganização foi possível a acoplação de módulos para a computação de processos biogeoquímicos, de qualidade da água (Trancoso et al. 2005) e da circulação oceânica (Leitão et al. 2005).

Na modelação de zonas costeiras é usual a utilização de técnicas de *downscaling*. O objetivo das técnicas de *downscaling* é obter-se um modelo com resolução suficiente para representar os processos que se queira analisar e estudar. Parte-se de um modelo já existente com uma escala maior, por exemplo, uma escala regional. Na zona que se quer estudar cria-se um domínio encaixado no domínio do modelo

regional, com uma resolução mais elevada, que utiliza os resultados do modelo regional como condição de fronteira oceânica. Seguidamente, e se necessário, criam-se os subdomínios necessários até se atingir a resolução espacial desejada.

Nos últimos anos, as técnicas de *downscaling* têm sido aplicadas com sucesso no sistema MOHID, nas zonas costeiras para a simulação da hidrodinâmica e da qualidade da água, principalmente para a resolução de problemas de gestão à escala local (Ascione Kenov et al. 2012; Leitão et al. 2005). No entanto, a aplicação destas técnicas apresenta um desafio na medida em que requer condições de fronteira atmosférica e oceânicas confiáveis e consistentes.

Uma área da modelação importante, principalmente para a resolução de problemas de gestão é a modelação operacional, que consiste na produção e disponibilização de resultados de previsão de uma forma autónoma e automática. Neste tipo de modelação é importante que as previsões estejam disponíveis com tempo suficiente para serem analisadas pelos gerentes e tomadores de decisões da região sob que incide o modelo. Para este fim, é importante que exista uma otimização do tempo de simulação.

3. Métodos

3.1. Descrição do Modelo Numérico MOHID

O modelo numérico utilizado nesta dissertação é o sistema de modelação MOHID de código aberto (www.mohid.com), cujo nome deriva de Modelo Hidrodinâmico. O MOHID foi criado em 1985 e é desenvolvido pelo grupo de investigação MARETEC (*Marine, Environment and Technology Research Center*) (www.maretec.org) do Instituto Superior Técnico. Este modelo está escrito na linguagem FORTRAN 95 e segue uma filosofia de programação orientada por objetos, o que permite a modelação integrada de vários processos físicos e biogeoquímicos em diferentes escalas. O MOHID permite simular vários modelos encaixados em simultâneo em que os submodelos obtêm condições de fronteira dos modelos anteriores.

O MOHID está dividido em módulos, sendo cada um responsável pela gestão da informação associada a um determinado processo, podendo este ser físico, químico, biológico ou uma combinação entre eles possibilitando a simulação dos processos que existem na coluna da água e no sedimento e as interações atmosfera - coluna de água - sedimentos. Esta divisão permite que em cada aplicação do modelo seja possível utilizar apenas os módulos necessários. Na Tabela 3.1 são apresentados os módulos utilizados na aplicação deste trabalho, bem como uma descrição breve das suas funções (MOHID 2009).

Tabela 3.1. Funções gerais dos módulos do sistema de modelação MOHID.

Nome do Módulo	Funções
Hydrodynamic	Calcula o nível de água, os fluxos de água e o campo de velocidades através das equações de continuidade e de momento
WaterProperties	Calcula o transporte e a evolução das propriedades da água
Turbulence	Parametriza as características turbulentas do escoamento
Discharges	Parametriza as descargas da água e de propriedades
InterfaceSedimentWater	Calcula as condições de fronteira entre a coluna de água e o fundo (sedimento). Calcula as tensões de corte a ser usadas pelo módulo <i>Hydrodynamic</i> e <i>Turbulence</i> e calcula os fluxos das propriedades da água na fronteira de fundo
InterfaceWaterAir	Calcula as condições de fronteira na superfície da coluna de água. Calcula tensões de corte, balanços de radiação e fluxos de calor entre a atmosfera e a coluna de água
Atmosphere	Lê e/ou calcula parâmetros meteorológicos para serem utilizados no módulo <i>InterfaceWaterAir</i>

Geometry	Discretização vertical do modelo
Assimilation	Parametrização referente aos esquemas de relaxamento a ser utilizados pelos módulos <i>Hydrodynamic</i> e <i>WaterProperties</i>
Model	Gere a passagem de informação entre os módulos e os domínios do modelo

3.1.1. Equações Resolvidas pelo Modelo

3.1.1.1. Velocidades horizontais

Para o cálculo das velocidades horizontais, o MOHID, em específico o módulo *Hydrodynamic*, resolve as equações de Navier-Stokes, utilizando a aproximação hidrostática e as aproximações de Boussinesq e Reynolds (Franz et al. 2017):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \vec{v}_H dV = - \oint_A \vec{v}_H (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA + \oint_A v_T (\vec{\nabla}(\vec{v}_H) \cdot \vec{n}) dA - \frac{1}{\rho} \oint_A p \cdot \vec{n}_H dA + \int_V 2\vec{\Omega} \times \vec{v}_H dV + \vec{F} \quad (1)$$

V representa o volume de controlo, A a superfície do volume de controlo, $\vec{v}_H = (u, v)$ o vetor de velocidades horizontais, $\vec{v} = (u, v, w)$ o vetor de velocidades, \vec{n} a normal à superfície, \vec{n}_H a normal em relação ao plano horizontal, v_T a viscosidade turbulenta, ρ a densidade da água, p a pressão da água, g a aceleração da gravidade, η o nível da água, $\vec{\Omega}$ o vetor de rotação da terra e \vec{F} as forças externas.

Na equação (1), o primeiro termo representa a advecção, o segundo a difusão, o terceiro as forças devido ao gradiente de pressão, o quarto a força de Coriolis devido à rotação da Terra e o quinto as forças externas.

A pressão da água é calculada com a equação:

$$p = g \int_z^\eta \rho dz + p_{atm} \quad (2)$$

Em que z é a coordenada vertical e p_{atm} é a pressão atmosférica.

A aproximação do equilíbrio hidrostático diz que a pressão num ponto apenas depende do peso aplicado pela coluna de água nesse ponto. É aplicável quando as forças verticais excluindo a força gravítica são

pouco significativas quando comparadas com a força gravítica. A aproximação de Boussinesq diz que as diferenças de densidade são ignoradas exceto quando multiplicadas pela aceleração da gravidade.

3.1.1.2. Cota da superfície livre e da velocidade vertical

O cálculo da cota da superfície livre é efetuado através da resolução da equação da continuidade para um fluido incompressível e admitindo que o meio é 2D, pois a evolução da cota da superfície livre é apenas condicionada pelos fluxos horizontais do escoamento e por eventuais fontes ou sumidouros de água, obtendo-se (Leitão 2002):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV = \oint_A \rho (\vec{v}_H \cdot \vec{n}) dA + Fontes - Sumidouros \quad (3)$$

Na equação (3), a propriedade ρ é conhecida e as velocidades horizontais (\vec{v}_H) foram previamente calculadas. O volume de controlo é desconhecido. Mas, visto a malha horizontal ser fixa, a única incógnita restante é a cota de superfície livre.

Para se calcular a velocidade vertical aplica-se o teorema da divergência e a regra da integração de Leibniz à equação da continuidade para um fluido incompressível (equação (3)). O resultado é a equação (4) (Leitão 2002), onde h é a profundidade.

$$w(z) = \int_{-h}^{\eta} \left(\frac{\partial u(z)}{\partial x} + \frac{\partial v(z)}{\partial y} \right) dz \quad (4)$$

3.1.1.3. Difusão turbulenta

Os processos de difusão turbulenta são separados na componente horizontal e na componente vertical e são calculados na forma de uma viscosidade turbulenta (ν). A viscosidade turbulenta horizontal pode ser definida como constante ou variável em função do gradiente de velocidades utilizando a fórmula de Smagorinsky (Leitão 2002). Para resolver a viscosidade turbulenta vertical é utilizado o modelo GOTM (*General Ocean Turbulence Model*) que se encontra integrado no código do MOHID. A parametrização do modelo k- ϵ utilizada pelo GOTM está de acordo com Canuto et al. (2001).

3.1.1.4. Propriedades da água

A evolução das propriedades da água segue um transporte Euleriano. Cada propriedade (P) é modelada com uma equação de conservação própria, resultante do transporte advectivo e difusivo da mesma

propriedade. A isto acrescenta-se ainda eventuais fontes e sumidouros. Obtém-se a equação (5). Esta equação é utilizada na modelação de qualquer propriedade da água que se queira computar.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V P dV + \oint_A (\vec{n} \cdot \vec{v}) P dA = \oint_A (\vec{n} \cdot \overline{K_p \vec{v}}) P dA + Fontes - Sumidouros \quad (5)$$

Para a computação da densidade o MOHID utiliza a equação de estado da UNESCO (Fofonoff and Millard, 1983). Esta equação calcula a densidade em função da temperatura, salinidade e pressão. Os valores da densidade são utilizados no cálculo da velocidade da água, como se pode observar nas equações (1) e (3).

3.1.2. Discretização das Equações

No modelo MOHID, a discretização espacial das equações é feita utilizando o método dos volumes finitos. A forma discretizada das equações é aplicada a um volume de controle, tornando o método de resolução das equações independente da geometria das células. Para a discretização espacial horizontal é utilizada uma malha do tipo Arakawa-C (Arakawa, 1966) em que as propriedades da água são calculadas no centro das células enquanto as velocidades são calculadas nas faces. Como a resolução das equações é independente da geometria das células, é possível usar uma discretização vertical genérica nos modelos (Martins et al. 1998), permitindo a implementação de diferentes tipos de camadas no mesmo domínio. Neste trabalho foram utilizadas camadas sigma e camadas cartesianas. As camadas sigma adaptam-se à batimetria e à coluna da água, não têm uma altura constante nem pré-definida, mas sim uma percentagem da coluna de água que devem ocupar. As camadas cartesianas são fixas e com uma altura constante e pré-definida. A utilização de camadas sigma na superfície da coluna de água é útil dado à sua capacidade de adaptação conforme a altura da maré. Uma representação de um domínio utilizando camadas sigma e cartesianas é apresentado na Figura 3.1.

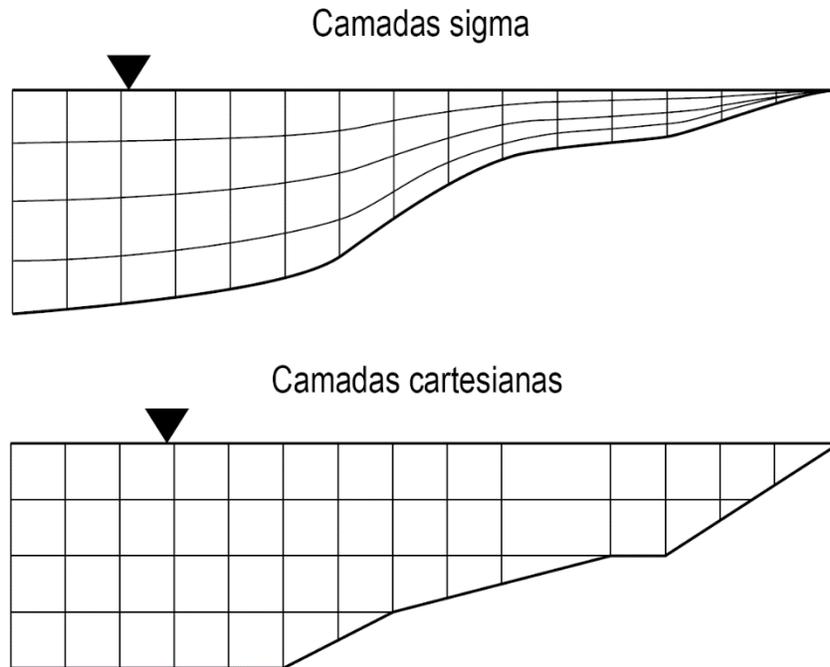


Figura 3.1. Exemplo de um domínio com 4 camadas sigma e com 4 camadas cartesianas. Adaptado de MARETEC (2012)

Para a discretização temporal das equações o MOHID utiliza um algoritmo ADI (*Alternating Direction Implicit*) semi-implícito com dois níveis temporais por iteração, como proposto por Leendertse (1967) e implementado conforme explicado em Martins et al. (1998).

3.2. Implementação do Modelo

O modelo de Sines foi implementado utilizando uma metodologia de *downscaling*. Esta metodologia permite a utilização dos resultados de modelos de escala regional como condições de fronteira para modelos locais (Riflet et al. 2010). Para esta aplicação foi configurado um sistema com 5 domínios encaixados com uma crescente resolução horizontal. Sendo o primeiro domínio uma janela de aquisição de dados do modelo PCOMS (*Portuguese Coast Operational Modeling System*), um modelo regional da costa Portuguesa operado pelo grupo MARETEC (Mateus et al. 2012). Adotou-se um fator de 4 para a redução da escala horizontal de cada domínio encaixado quando comparado com o domínio que lhe precede. (Tabela 3.2).

Tabela 3.2. Níveis do modelo e as suas resoluções em graus e metros na zona de Sines.

	Resolução em graus (°)	Resolução em metros (m)
Domínio 1 (PCOMS)	0.060000	6000.0
Domínio 2	0.015000	1500.0
Domínio 3	0.003750	375.0
Domínio 4	0.000938	93.8
Domínio 5	0.000234	23.4

Todos os domínios são do tipo 3D, e seguem uma abordagem de discretização vertical genérica com a implementação de 7 camadas sigma na superfície da coluna de água até à profundidade de 8.68 m seguido de um número variável de camadas cartesianas que depende da profundidade máxima atingida em cada domínio. Esta discretização vertical foi adotada do modelo PCOMS, removendo-se apenas as camadas mais profundas que deixam de estar preenchidas por água. O número de camadas utilizadas em cada domínio e as suas profundidades são apresentadas na Tabela A.1 do Anexo A.

A turbulência horizontal foi definida como constante, atribuindo os seguintes valores de viscosidade horizontal aos domínios: 40.0, 12.5, 3.123 e 0.8 m²/s para os domínios 2, 3, 4 e 5 respetivamente. A turbulência vertical foi calculada utilizando o modelo GOTM.

O esquema numérico utilizado para a resolução das equações de advecção foi o método *Total Variation Diminishing* (TVD). Este método consiste num esquema híbrido entre um método *upwind* de primeira ordem e terceira ordem utilizando um fator de ponderação calculado pelo método *SuperBee* (Roe 1986). Para o início de cada simulação foram utilizadas as opções do MOHID que permite a cada subdomínio, no primeiro instante da simulação, iniciar as propriedades da água, as propriedades hidrodinâmicas e o nível da maré a partir de uma extrapolação da informação do domínio que lhe precede.

As simulações do domínio 1 até ao domínio 4 foram feitas *online* (em simultâneo). Durante estas simulações, o domínio 4 escreve uma janela de resultados com um passo temporal de 15 minutos, que serão usados como condição de fronteira para a simulação do domínio 5. Esta configuração permite correr o domínio 5 independentemente dos restantes, podendo-se utilizar dois computadores, um com o domínio 1 ao 4 e outro com o domínio 5, com fim a melhorar o tempo de corrida. Os passos temporais utilizados para a resolução das equações em cada domínio foram de: 60.0, 30.0, 7.5 s para os domínios 2, 3 e 4 respetivamente e 4.0 s para o domínio 5. O tempo médio necessária para uma simulação de um dia,

apenas hidrodinâmica, com esta configuração num computador Windows com um processador Intel® Core™ i7-980 foi de 1 hora e 20 minutos do domínio 1 ao 4 e de 50 minutos para o domínio 5. Resultando em 2 horas e 10 minutos para o sistema inteiro.

3.2.1. Batimetrias

Foram utilizadas duas fontes distintas para a criação dos ficheiros de batimetria MOHID. Para os domínios 2 e 3 foram utilizados dados do portal EMODnet (2016) (*European Marine Observation and Data Network*), especificamente o produto B4 de 2016. Estes dados possuem uma resolução espacial de 0.0021° , correspondendo, na área de estudo, a aproximadamente 200 m. Para os domínios 4 e 5 foi utilizada informação batimétrica fornecida pelo Instituto Hidrográfico (www.hidrografico.pt) da marinha portuguesa com uma resolução de 0.00042° , ou seja, 40 m. Os dados batimétricos estão representados na Figura 3.2.

Estes dados foram interpolados para a malha horizontal correspondente a cada domínio utilizando uma ferramenta do *software* MOHID Studio desenvolvido pela ACTION Modulers (www.actionmodulers.com). A interpolação foi realizada utilizando o método *Linear Inverse Weighted Distances*. Foi ainda utilizada a ferramenta *SmoothBatimNesting*, presente no código do MOHID, para alterar as quatro células localizadas mais próximas da fronteira dos domínios, do 2 ao 5, de forma a aproximar os seus valores à célula que correspondente do domínio em que este está encaixado. Esta operação serve para minimizar as diferenças na passagem das condições de fronteira do domínio superior para o domínio mais refinado. Na Figura 3.2 estão representados os vários domínios de cálculo e as respetivas batimetrias.

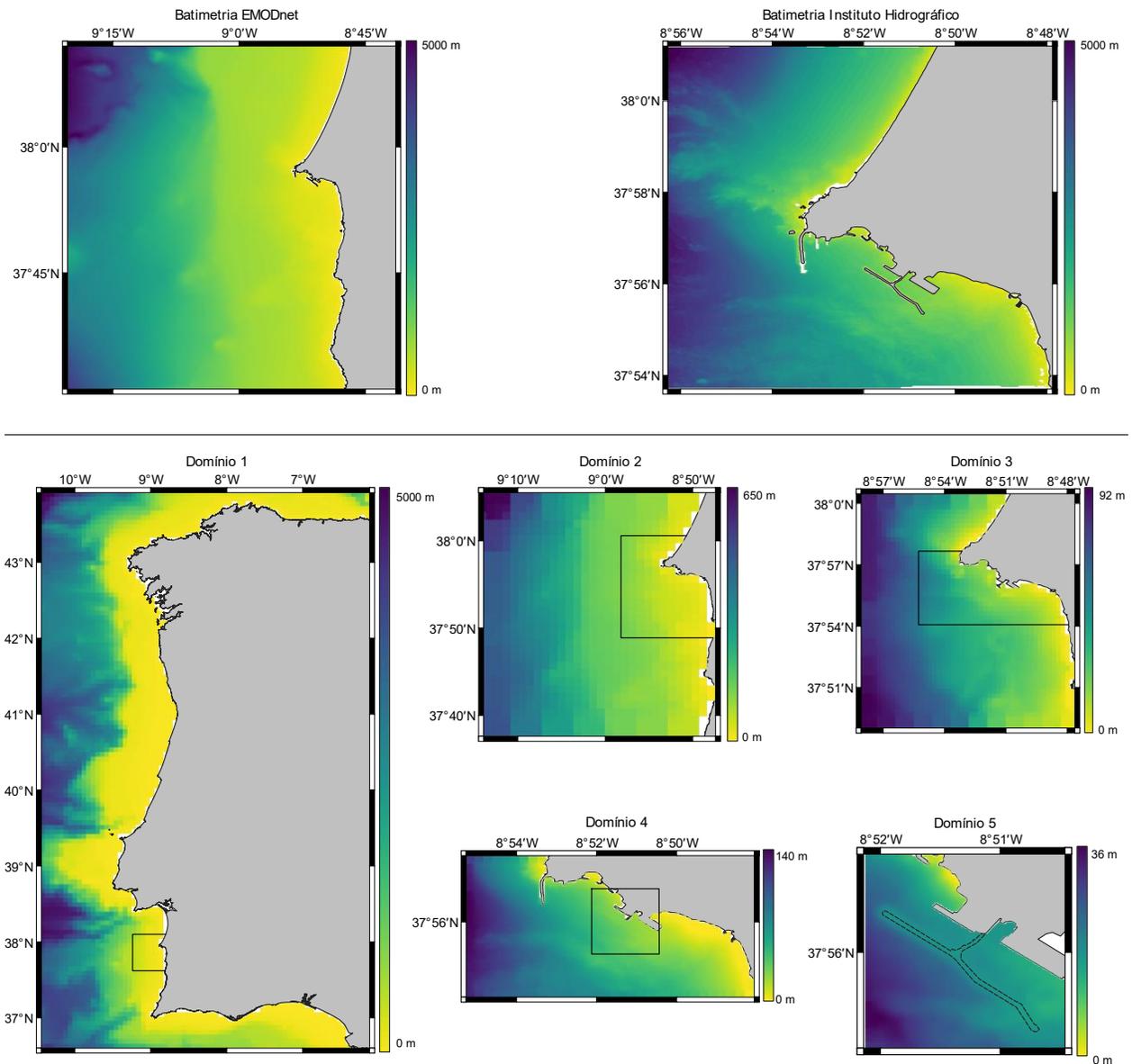


Figura 3.2. Dados batimétricos do EMODnet e do Instituto Hidrográfico e as interpolações para as malhas dos domínios do modelo de Sines.

3.2.2. Condições de Fronteira

No domínio 1, a fronteira aberta horizontal é forçada com os resultados provenientes de uma janela de alta resolução do modelo operacional PCOMS, com resultados de 15 em 15 minutos. O PCOMS fornece resultados de velocidades, nível de água, temperatura e salinidade. Estes resultados são lidos no primeiro domínio e são propagados pela fronteira para o domínio 2 com a utilização de um esquema de relaxamento (Martinsen and Engedahl 1987) e o nível da água é radiado utilizando o método proposto por Flather (1976).

O modelo PCOMS apresenta uma resolução espacial horizontal de 0.06° e uma discretização vertical com 50 camadas, 7 camadas sigma à superfície seguidas de 43 camadas cartesianas. A profundidade máxima do modelo PCOMS é de 5948.6 m. Este modelo utiliza como condições de fronteira oceânica resultados do modelo Mercator-Océan Psy2V4 e resultados do modelo MM5 (*Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model*) operado pelo MARETEC (disponível em: meteo.tecnico.ulisboa.pt) para as condições de fronteira atmosféricas.

Durante a validação do modelo, foi necessário comparar o efeito das condições de fronteiras oceânicas nos resultados finais do modelo de Sines. Criou-se um cenário com a utilização do modelo LUSITANIA (Campuzano et al. 2013) como fonte de condições de fronteira. Em semelhança ao PCOMS, este modelo é operado pelo grupo MARETEC. O modelo LUSITANIA abrange toda a zona económica exclusiva de Portugal, possui uma resolução horizontal de 0.08° , menos detalhado que o PCOMS, uma discretização vertical igual à do PCOMS e resultados de 1 em 1 hora. Este modelo utiliza resultados do modelo MyOcean como condições de fronteira oceânicas e resultados do modelo GFS (*Global Forecasting System*) do NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) para a fronteira atmosférica. Para forçamento da maré utiliza resultados do modelo global FES2012.

Dado que o LUSITANIA e o PCOMS possuem diferentes malhas horizontais, e o modelo de Sines está configurado como *downscaling* do PCOMS, os resultados do LUSITANIA foram interpolados para a malha do modelo PCOMS antes de se realizarem as simulações. Para a interpolação, foi utilizada a ferramenta *ConvertToHDF5* presente no código do MOHID. O método de interpolação utilizado foi a interpolação por triangulação.

Na fronteira vertical com a atmosfera, o modelo computa momentos e fluxos de calor que interagem diretamente com as células de água à superfície através da interface água-ar. Para tal o modelo necessita de informação sobre a atmosfera. Para obter esta informação, o MOHID lê os resultados de modelos atmosféricos previamente simulados. Para o modelo de Sines utilizou-se dois modelos atmosféricos em períodos diferentes. Inicialmente foi utilizado o modelo MM5. Este modelo fornece resultados horários com uma resolução espacial de 9 quilómetros para a temperatura do ar, radiação de baixo comprimento de onda, pressão ao nível médio do mar, radiação solar, intensidade e direção do vento.

Em fevereiro de 2019 ficaram disponíveis resultados do modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*) para Portugal, operado pelo MARETEC, e foram utilizados para substituir a utilização do MM5. O modelo WRF utilizado tem uma escala espacial horizontal de 3 quilómetros, ou seja, o triplo da resolução do modelo MM5. Este modelo fornece resultados horários para as propriedades disponíveis no modelo MM5 e adiciona ainda: precipitação, humidade relativa, albedo e tensões de corte. Com a adição destas propriedades é possível a utilização do algoritmo COARE 3.0 (*Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment*) (Fairall et al. 2003). Este algoritmo calcula as transferências de calor na interface água-ar de forma mais precisa que o algoritmo utilizado com o modelo MM5.

3.2.3. Descargas e Sumidouro da Central Elétrica

A captura e descarga de água pela central termoelétrica de Sines foi definida no domínio 4 por ser o mais refinado em que existe representação desta zona, dado que o domínio 5 engloba apenas o pontão de Sines e uma pequena vizinhança. No entanto, a pluma térmica com origem na descarga de água quente da central termoelétrica de Sines será transportada para o domínio 5 na forma de condições de fronteira. A captura e a descarga de água foram também implementadas no domínio 3 do modelo, de forma a garantir a representação da pluma térmica na eventual situação em que esta ultrapasse a fronteira do nível 4 e, devido às correntes marítimas, volte a entrar no domínio 4.

Em ambos os domínios, a recolha de água foi modelada utilizando um termo de poço na célula da malha horizontal mais próxima do local da recolha na realidade. Foi considerado um caudal médio de 40 m³/s de acordo com dados anuais fornecidos na declaração ambiental da central termoelétrica (EDP, 2017). A descarga de água é modelada por termos de fonte: no domínio 4 foram implementados dois termos de fonte para representar as duas descargas de canal aberto com um caudal de 20 m³/s para cada célula. No domínio 3, apenas foi utilizado um termo de fonte para simular a descarga devido à menor resolução espacial horizontal. Para simular as condições reais, o sumidouro e as descargas foram impostas ao longo da coluna de água (Salgueiro et al. 2015). Foi definida uma função *bypass* no modelo para que a água descarregada tenha um aumento de 10 °C de temperatura em comparação com a água da zona de recolha, mantendo as restantes propriedades iguais. O aumento de temperatura foi definido a partir dos estudos de Salgueiro et al. (2015). A localização da recolha de água e das descargas são apresentadas na Figura 3.3 sobre a malha horizontal do domínio 3 e 4 e imagens de satélite do serviço *Bing aerial* (www.bing.com/maps/aerial).

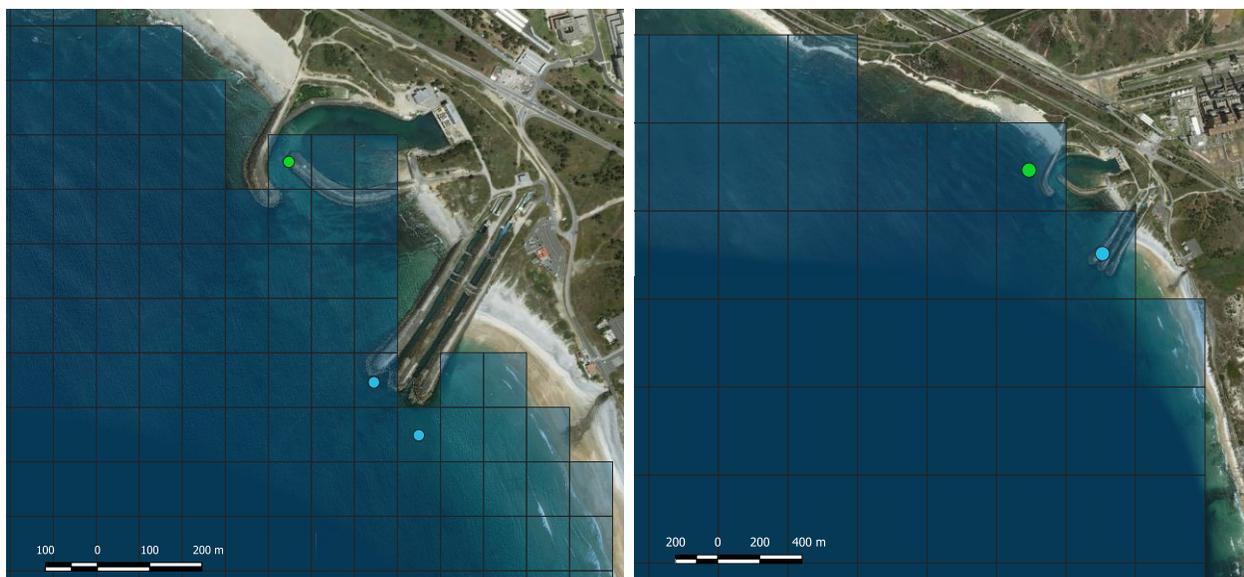


Figura 3.3. Células da malha em que foram definidos sumidouros (símbolo verde) e descargas (símbolo azul) no domínio 4 (esquerda) e no domínio 3 (direita).

3.2.4. Pontão do Porto de Sines

Devido ao pontão de Sines ser poroso e não completamente sólido, existem fluxos de água não negligenciáveis pelos poros de um lado do pontão para o outro. Devido a tal, foi importante não implementar o pontão no modelo como células terra, mas sim como células água que apresentem uma determinada resistência à passagem de água. Para representar o pontão foi utilizado uma opção de cálculo já existente no MOHID que possibilita a criação de um obstáculo com um determinado coeficiente de atrito nas células indicadas pelo utilizador (MOHID 2018). A equação utilizada pelo modelo é a equação de atrito (Eq. (6)) dividida em ambos os membros pelo volume da célula de computação e pela densidade da água (ρVol) de forma a que o resultado seja uma aceleração (Eq. (7)). Esta aceleração é aplicada à massa de água que atravessa o pontão.

$$F = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A \quad (6)$$

$$\frac{F}{\rho Vol} = \frac{1}{2} v^2 C_D A \frac{1}{Vol} \quad (7)$$

onde F é a força de atrito causada pelo obstáculo, A é a superfície do obstáculo, v é a velocidade da água e C_d é o coeficiente de atrito do obstáculo.

O modelo aplica a aceleração calculada pela equação (7) em todas as células indicadas por um ficheiro do tipo “box” (MOHID 2012). Este ficheiro define uma zona, 2D ou 3D, que, neste caso, representa o pontão. O ficheiro “box” foi criado no *software* MOHID Studio a partir de um ficheiro de polígonos com informação retirada do serviço OpenStreetMapData (2018). O polígono utilizado para gerar o ficheiro “box” e o ficheiro “box” são apresentados na Figura 3.4 sobre a batimetria do domínio 5 do modelo de Sines.

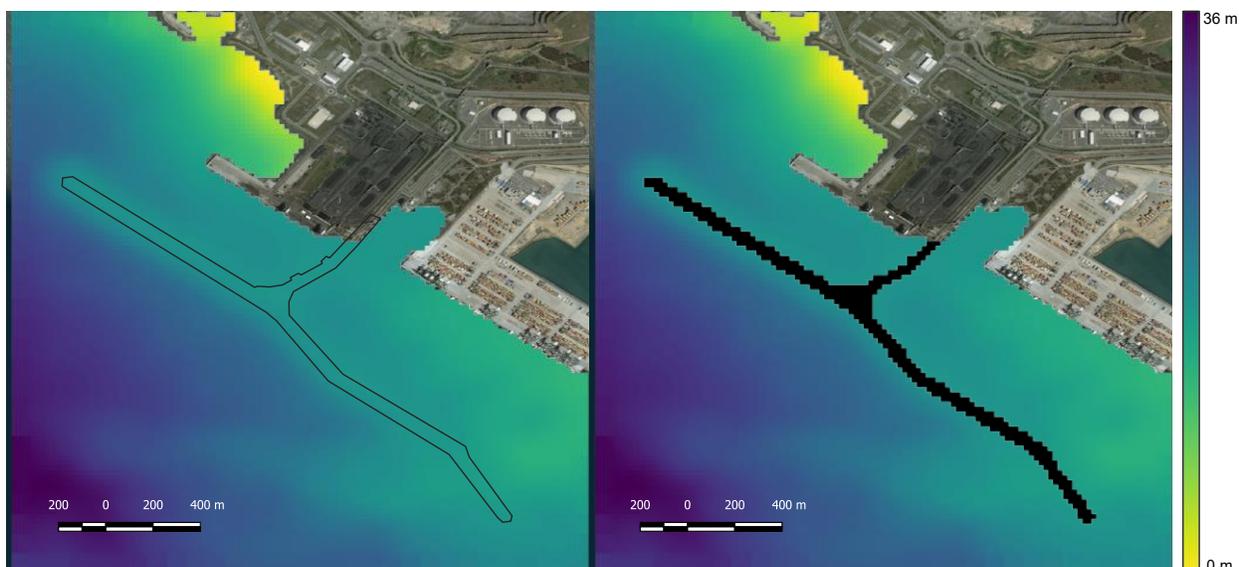


Figura 3.4. Polígono utilizado para definir o pontão (esquerda) e as células correspondentes (direita).

O valor a introduzir no ficheiro de entrada do modelo não é o coeficiente de atrito (C_d), mas sim toda a parte do membro da direita da equação (7) com exceção da velocidade da água (v), ou seja, $\frac{1}{2} C_d \frac{A}{Vol}$. Visto que se considera que o paredão não varia em largura verticalmente e as velocidades verticais serem menores que as horizontais, considerou-se a superfície do obstáculo (A) como uma das faces horizontais. Decompondo-se a área e o volume fica-se com: $\frac{1}{2} C_d \frac{\Delta x \Delta z}{\Delta x^2 \Delta z}$. Simplificando obtém-se $\frac{1}{2} C_d \frac{1}{\Delta x}$, que apresenta unidades de m^{-1} .

A direção da força de atrito em cada célula é definida como o inverso do vetor da velocidade nessa mesma célula.

3.3. Campanhas de Amostragem

No âmbito do projeto PiscisMod, até à data, foram realizadas 4 campanhas no porto de Sines. Estas campanhas têm o objetivo de recolher dados que permitam a validação do modelo hidrodinâmico e que permitam avaliar o impacto da atividade de aquicultura no ecossistema. As campanhas foram realizadas por membros do MARETEC e do MARE (Centro de Ciências do Mar e do Ambiente da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa) (www.mare-centre.pt) com o apoio da Seaculture – Aquicultura, S.A, que forneceu as suas instalações, um barco (A na Figura 3.5) e recursos humanos.

Durante as campanhas, foram recolhidas amostras de água e dados de velocidade, temperatura da água, salinidade e densidade. A velocidade foi registada utilizando um correntómetro acústico Aanderaa, modelo DCS4100. Com uma sonda CTD da *Falmouth Scientific, Inc.*, modelo FSI NXIC CTD (C na Figura 3.5),

registaram-se perfis de temperatura, salinidade e densidade. Utilizou-se ainda uma sonda multiparamétrica, modelo YSI-Exo2 (B na Figura 3.5), para se registar, em paralelo com a sonda CTD, perfis de temperatura e salinidade. As estações de amostragem foram selecionadas dentro do porto de Sines junto das jaulas de aquicultura e na vizinhança. A localização das estações estão apresentados na Figura 3.6 e as suas coordenadas geográficas na Tabela 3.3. A recolha de dados foi feita de barco em todas as estações exceto na estação S1 que fica situada numa plataforma de acesso.

A campanha 1 foi realizada dia 29/06/2018 e foram recolhidos perfis de temperatura, salinidade, densidade nas estações S1, S2, S3 e S4 e dados das velocidades nas estações S1 e S4. Na campanha 2, dia 25/10/2018, planeou-se fazer amostragem nas estações S1, S2, S3 e S4. Mas devido a condições inesperadas apenas foi possível amostrar completamente a estação S1 e parcialmente a estação S3. A campanha 3 realizou-se no dia 12/03/2019 e a campanha 4 no dia 30/04/2019. Em ambas foi feita amostragem nas estações S1, S2A, S3 e S5.



Figura 3.5. Barco e aparelhos utilizados durante as campanhas ao porto de Sines. A – Barco disponibilizado pela Seaculture – Aquicultura, S.A. para as campanhas. B – Sonda multiparamétrica, modelo YSI-Exo2, logger e computador de campo. C – Sonda CTD, modelo FSI NXIC CTD

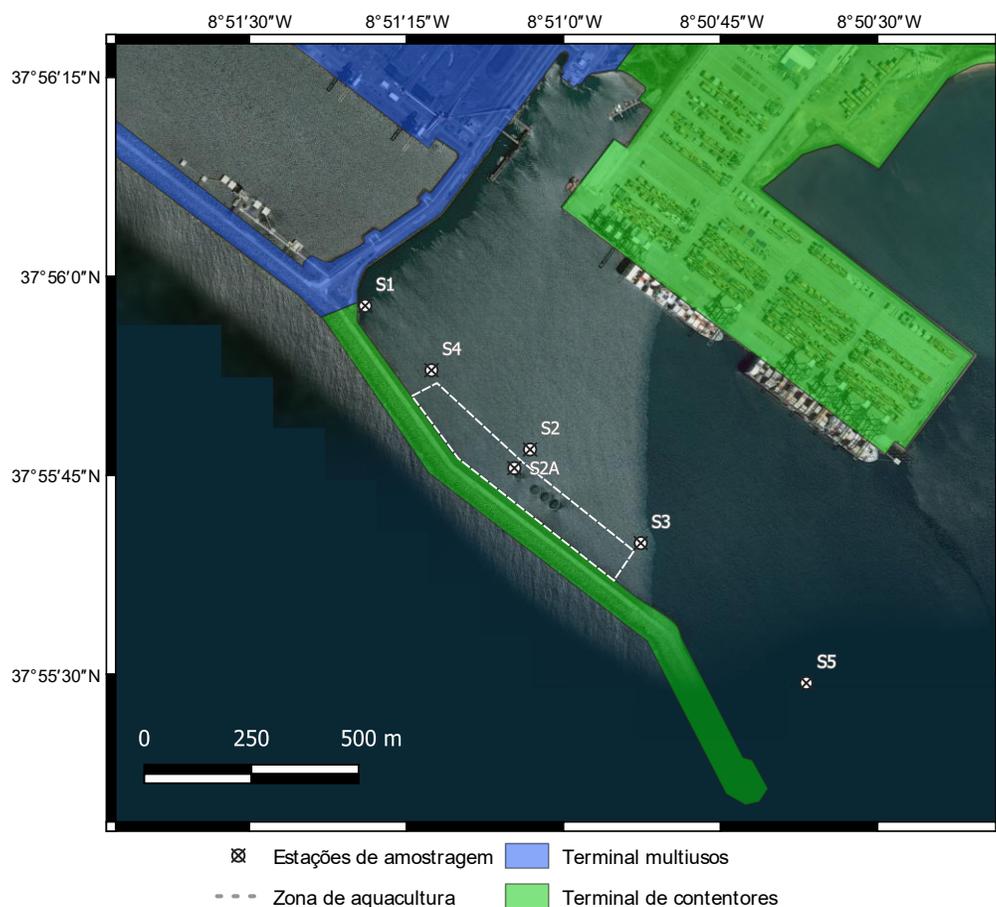


Figura 3.6. Localização das estações de amostragem utilizadas durante as campanhas.

Tabela 3.3. Coordenadas GPS das estações de amostragem utilizadas durante as campanhas e estações em que foram feitas medições em cada campanha.

Estação	Latitude (°)	Longitude (°)	Campanha 1 (29/06/2018)	Campanha 2 (25/10/2018)	Campanha 3 (12/03/2019)	Campanha 4 (30/04/2019)
S1	37.93272	-8.855261	X	X	X	X
S2	37.92971	-8.850886	X			
S2A	37.92932	-8.851303			X	X
S3	37.92775	-8.847949	X	X	X	X
S4	37.93137	-8.853503	X			
S5	37.92482	-8.843557			X	X

3.4. Calibração e Validação do Modelo

O modelo de Sines, em específico o domínio 5, foi calibrado utilizando dados recolhidos durante a campanha 1 e validado utilizando dados das campanhas 2, 3 e 4.

A calibração do modelo consistiu em testar várias hipóteses sobre a porosidade ou solidez do pontão do porto de Sines. Foi feita definindo-se vários cenários de simulação e alterando sempre apenas um parâmetro. Comparando os cenários entre si e com os dados da campanha 1 escolhe-se o que melhor representa a realidade. Como o pontão apenas está representado no domínio 5, a alteração entre os cenários é aplicada apenas neste domínio.

As simulações para a calibração foram iniciadas 6 dias antes do dia da campanha de forma a que as condições hidrodinâmicas, as propriedades da água e o efeito da pluma térmica da central termoelétrica estivessem estabilizadas no dia da campanha.

A validação do modelo de Sines foi feita em dois níveis e foram utilizados dois conjuntos de dados distintos. O domínio 2 do modelo foi validado utilizando dados de temperatura registados por uma boia ancorada, pertencente ao Instituto Hidrográfico, localizada perto da costa de Sines (37°56.89'N, 8°53.27'W) e dados da altura da maré recolhidos por um marégrafo, também do Instituto Hidrográfico, localizado dentro do porto de Sines (37°55.3'N, 8°55,7'W). Os dados da boia foram retirados do site do Instituto Hidrográfico (Instituto Hidrográfico 2019) e os do marégrafo do portal EMODnet Physics (EMODnet 2019). A localização da boia e do marégrafo no contexto do domínio 2 é apresentado na Figura 3.7.

Para a validação do domínio 5 foram utilizados dados *in situ* de velocidades, temperatura, salinidade e densidade recolhidos nas estações apresentadas previamente na Figura 3.6 durante as campanhas do projeto PiscisMod.

Para a validação do domínio 5, com o modelo já calibrado, foram realizadas simulações nos períodos das campanhas 2, 3 e 4 que se compararam com os dados *in situ* de velocidades, temperatura, salinidade e densidade. Igualmente ao procedido durante a calibração, as simulações foram iniciadas 6 dias antes do dia a analisar. Durante estas campanhas, para além da validação fez-se algumas comparações na influência das condições de fronteira oceânicas e atmosféricas nos resultados do modelo. Com as observações da campanha 2 comparou-se a substituição da utilização do modelo PCOMS como condição de fronteira oceânica para o modelo LUSITANIA. Com a campanha 3 fez-se a comparação entre a utilização do modelo MM5 e WRF como condição de fronteira atmosférica de forma a garantir que a troca do modelo MM5 para o WRF é vantajosa.

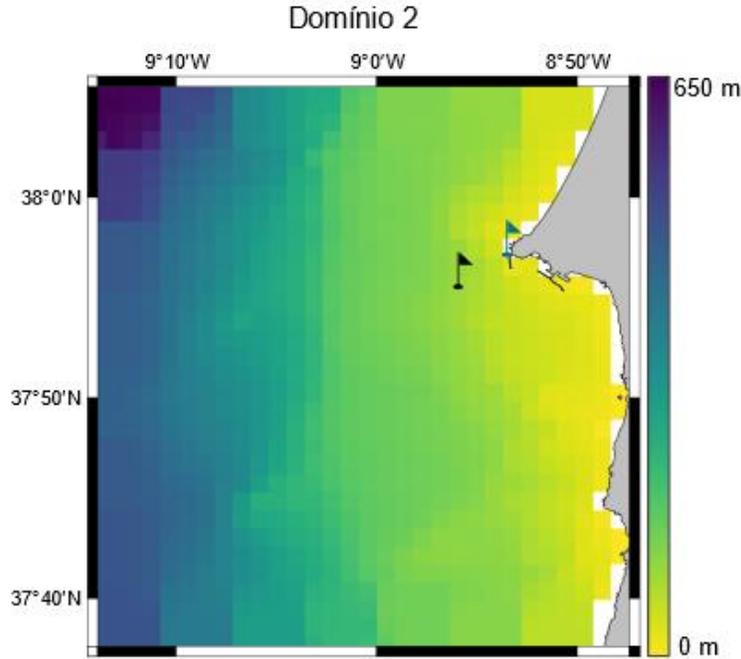


Figura 3.7. Localização da boia de Sines (bandeira preta e do marégrafo (bandeira azul) do Instituto Hidrográfico em relação ao domínio 2 do modelo.

Para se validar o modelo analisou-se a concordância entre os resultados obtidos pelo modelo e as observações. Para esta análise foram utilizados alguns indicadores estatísticos, nomeadamente a raiz do erro quadrático médio (RMSE de *Root Mean Square Error*), Eq. (8), o enviesamento (BE de *Bias Error*), Eq. (9), e o coeficiente de correlação de Pearson (r), Eq. (10).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{mod} - \theta_{obs})^2}{n}} \quad (8)$$

$$BE = E(\theta_{mod}) - E(\theta_{obs}) \quad (9)$$

$$r = \frac{cov(\theta_{mod}, \theta_{obs})}{\sigma_{\theta_{mod}} \sigma_{\theta_{obs}}} \quad (10)$$

Nas equações (8), (9) e (10), θ representa um determinado parâmetro que pode ser calculado pelo modelo (θ_{mod}) ou observado (θ_{obs}). $E(\theta)$ indica o valor esperado (ou valor médio) do parâmetro θ e σ_{θ} o desvio padrão. $cov(\theta_{mod}, \theta_{obs})$ representa a covariância entre θ_{mod} e θ_{obs} . E n é o número total de amostras.

O RMSE mede a distância média, em termos absolutos, dos resultados do modelo com as observações. Assume as mesmas unidades do parâmetro que se está a analisar, é maior ou igual a zero e quanto mais próximo de zero mais o modelo se adequa às observações.

O BE mede a tendência que o modelo tem para subestimar ou sobrestimar um determinado parâmetro. Assume as mesmas unidades da variável a analisar e quanto mais próximo de zero mais o modelo se adequa às observações.

O coeficiente de correlação de Pearson mede o grau e direção da correlação linear entre os resultados do modelo e as observações. É adimensional e varia entre -1 e 1. Um r de -1 corresponde a uma correlação linear negativa e 1 a uma correlação linear positiva. Quanto mais próximo de 1 for o r mais os resultados do modelo se ajustam às observações.

Para o cálculo dos indicadores estatísticos e para a visualização dos dados foram desenvolvidos *scripts* em *Python* 3.6. O cálculo do RMSE e do BE foram programados no código, o coeficiente de correlação de Pearson foi calculado utilizando a função *stats.pearsonr* da biblioteca *scipy* (www.scipy.org). A visualização dos perfis das variáveis resultantes do modelo em comparação com as observações foi programada utilizando a biblioteca *matplotlib* (matplotlib.org). Os resultados do modelo para a densidade utilizados para a validação foram calculados a partir da equação de estado EOS 80, da UNESCO, publicada em (Fofonoff 1985). A equação EOS 80 foi implementada no código do *script* que calcula os indicadores estatísticos e permite computar os resultados de salinidade em função da temperatura, salinidade e pressão da água. A função que calcula os indicadores estatísticos e que resolve a equação de estado EOS 80 são apresentadas no Anexo B.

Foram criados *scripts* em *Python* 3.6 para interpretar e desenhar os resultados do modelo. Foi utilizada a biblioteca *h5py* (www.h5py.org) para ler os ficheiros HDF5 produzidos pelo MOHID e foi utilizada a biblioteca *cartopy* (www.scitools.org.uk/cartopy) em conjunto com a biblioteca *matplotlib* para desenhar os mapas de resultados. As figuras apresentadas no capítulo 4. foram produzidas utilizando este método.

4. Resultados e Discussão

4.1. Validação do Domínio 2

A validação do modelo para o domínio 2 foi feita comparando séries temporais de temperatura e de nível de água resultantes do modelo com observações. Para a temperatura foi utilizada uma amostra com 4998 valores entre 26/12/2015 e 09/06/2017. As séries temporais das observações não são contínuas, como se verifica na Figura 4.1. As lacunas nos dados resultam de períodos de reparações na boia e no marégrafo de Sines, durante os quais não foi realizada recolha de dados. Da comparação de temperatura entre o modelo e as observações obtiveram-se valores de RMSE de 1.15 °C, BE de 0.53 °C e uma correlação de 0.90. O valor de BE indica uma tendência de sobrestimação por parte do modelo e o valor de correlação indicam um bom ajuste entre o modelo e as observações.

Para o nível da água, foi utilizada uma amostra com 6970 valores entre 26/12/2015 e 05/09/2017. Os indicadores estatísticos assumem os valores de: RMSE de 0.01 m, BE de 0.00 m e correlação de 0.99. O valor da correlação indica um bom ajuste da periodicidade da maré, entre o modelo e os dados. No entanto, como visto na Figura 4.1, o modelo apresenta uma amplitude maior que as observações, atingindo valores mais altos durante os períodos de preia-mar e mais baixos durante os períodos de baixa-mar do os valores registados pelo marégrafo. Mas esta diferença é pequena, como visto pelo valor do RMSE.

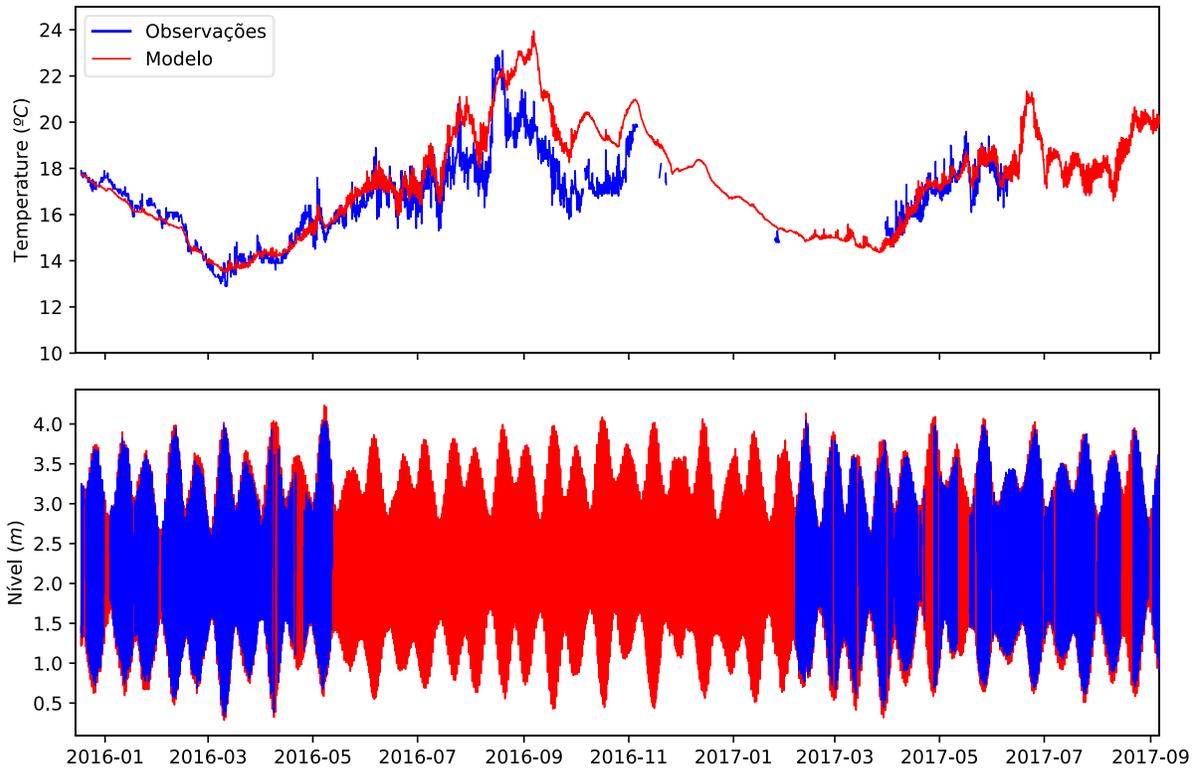


Figura 4.1. Resultados do domínio 2 do modelo e observações da boia e do marégrafo de Sines para temperatura e nível da água.

4.2. Calibração do Domínio 5

4.2.1. Campanha 1 – 29/06/2018

Para a calibração foram definidos 5 cenários distintos. Começou-se por comparar as diferenças entre definir um pontão com uma permeabilidade constante em toda a sua extensão e um pontão com uma zona completamente sólida e impermeável entre os terminais (cenários 1 e 2). De seguida comparou-se a utilização de diferentes coeficientes de atrito (cenários 2, 3 e 4). Finalmente, comparou-se o melhor destes com um cenário em que o pontão é sólido em toda a sua extensão (cenário 5). Os cenários e a diferença entre eles estão apresentados na Tabela 4.1. Para a simulação destes cenários foi necessário a utilização de 3 batimetrias diferentes, estando a diferença entre elas no número de células do pontão que são definidas como terra. As batimetrias utilizadas e os correspondentes cenários são apresentados na Figura 4.2.

Tabela 4.1. Diferenças entre os cenários utilizados para a calibração do modelo. C_D é o coeficiente de atrito e $\frac{1}{2} C_D \frac{1}{\Delta x}$ é o valor introduzido no ficheiro de entrada do MOHID

Cenário	Células do Paredão	$\frac{1}{2} C_D \frac{1}{\Delta x}$	C_D
1	Totalmente água	0.045	2.1
2	Sólido entre terminais	0.045	2.1
3	Sólido entre terminais	0.5	23.4
4	Sólido entre terminais	2.0	93.6
5	Totalmente sólido	-	-

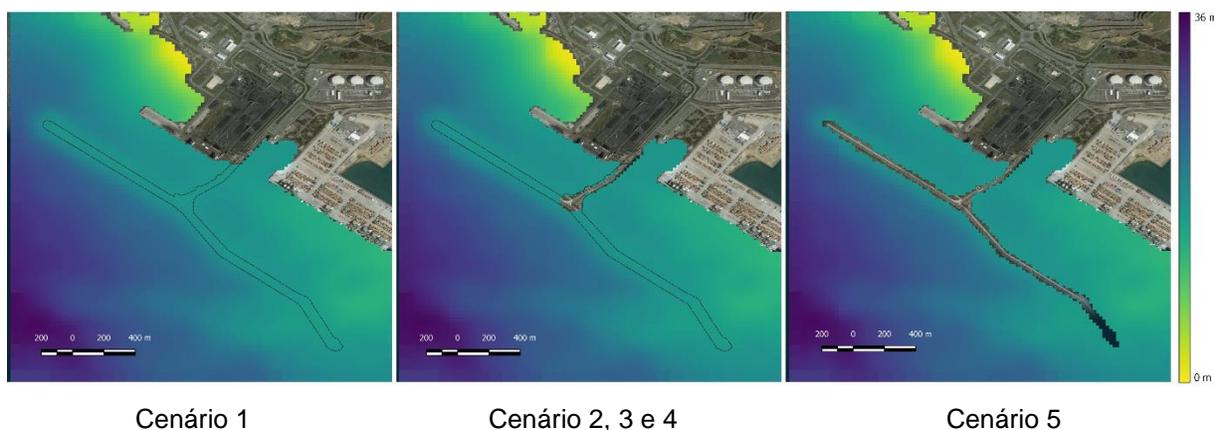


Figura 4.2. Batimetrias utilizadas na calibração do modelo e os cenários correspondentes.

Começou-se pela comparação entre o cenário 1 e 2, inteiramente poroso ou com uma zona sólida entre os terminais, definindo-se as células da zona a se considerar sólida como terra. Utilizou-se um coeficiente de atrito de 2.1 para ambos os cenários.

Analisando a diferença nos resultados dos perfis de velocidade (Figura 4.3), nota-se que ambos os cenários tendem a sobrestimar as velocidades observadas. O cenário 2 apresenta, geralmente, velocidades mais baixas que o cenário 1, e, portanto, mais próximas das observações. Na comparação da temperatura (Figura 4.4), as diferenças entre os cenários são menos significativas. Havendo uma diferença quase impercetível nas estações S2 e S4, uma diferença ligeira na estação S3 a favor do cenário 2 e a diferença mais significativa na estação S1. Na estação S1, os resultados do cenário 2 estão mais próximos das observações até sensivelmente os 7 m a partir de onde o cenário 1 passa a apresentar resultados mais próximos. Apesar disto, o cenário 1 mostra uma distribuição em profundidade mais próxima às observações do que o cenário 2. É expectável a maior diferença entre os cenários ocorrer na estação S1 visto esta ser a estação mais próxima do pontão e especificamente da zona do pontão que se definiu como sólida no cenário 2.

Apesar da comparação da temperatura favorecer o cenário 1, foi escolhido o cenário 2 para a continuação do trabalho, dada a melhoria alcançada nos perfis de velocidade se considerar mais significativa.

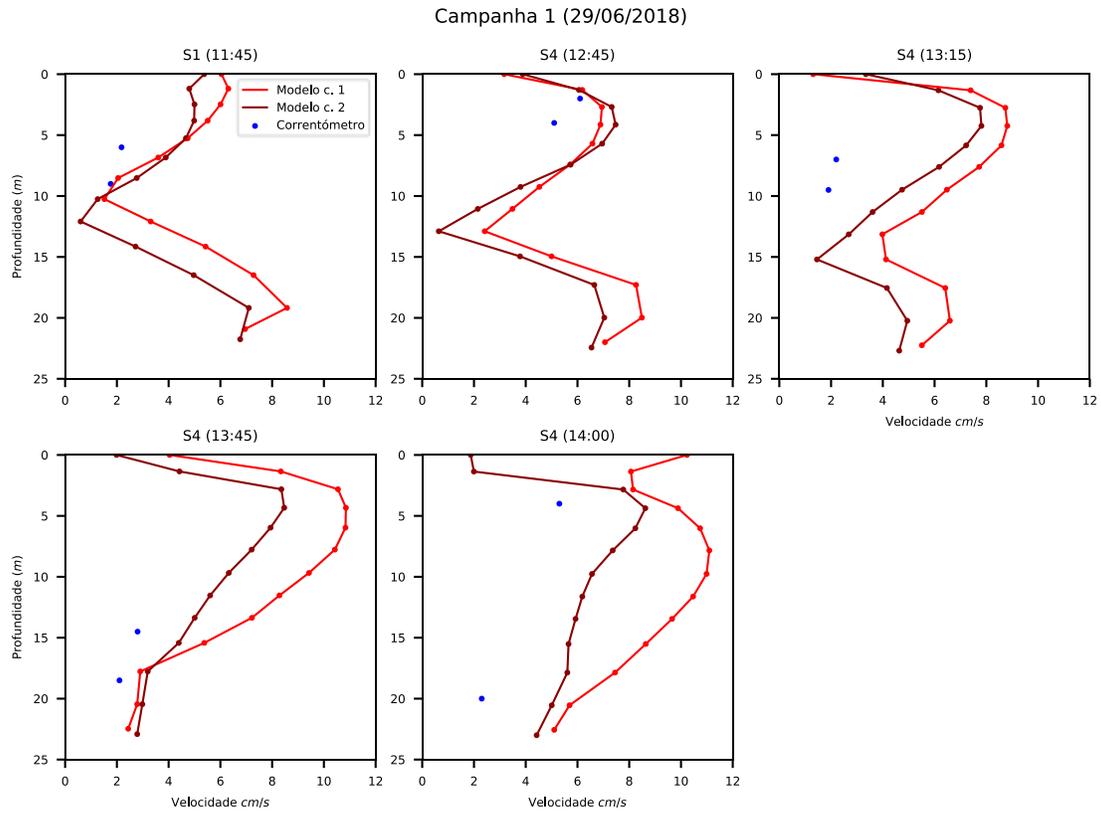


Figura 4.3. Campanha 1 – Perfis de velocidade do modelo, cenários 1 e 2, e observações.

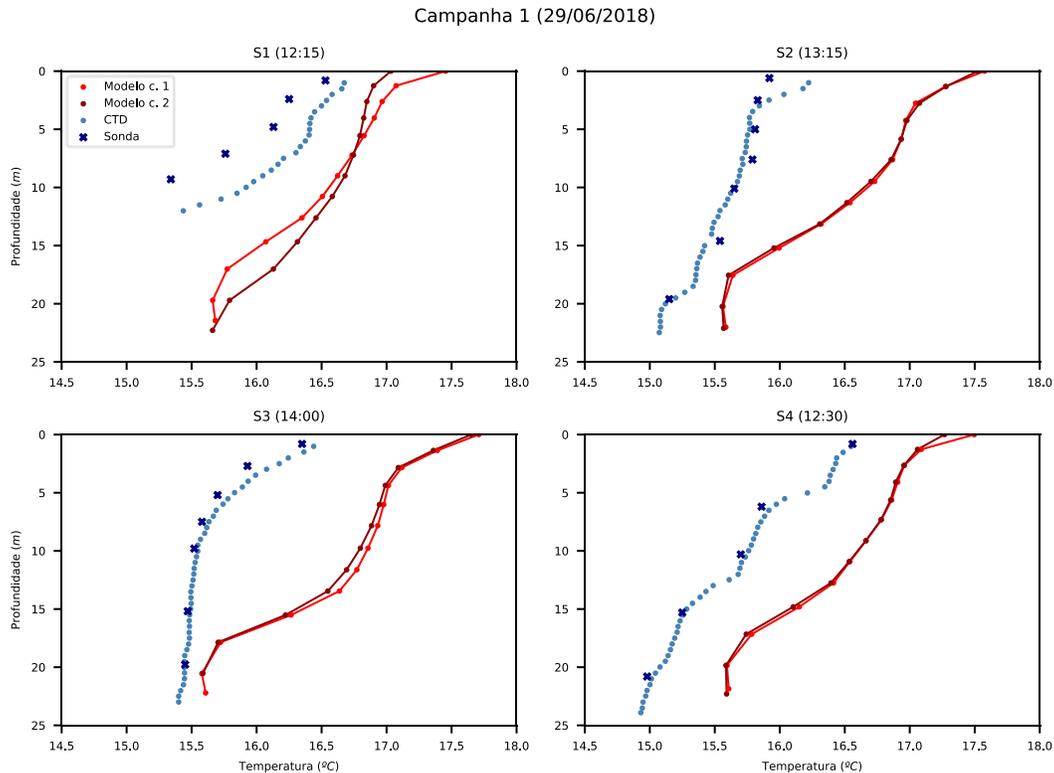


Figura 4.4. Campanha 1 – Perfis de temperatura do modelo, cenários 1 e 2, e observações.

Estando definido o pressuposto de um perfil sólido na zona do pontão entre os terminais, comparou-se de seguida a influência de diferentes coeficientes de atrito nos resultados do modelo. Comparou-se o cenário 2, com um coeficiente de atrito de 2.1, com cenários com coeficientes de atrito de 23.4 e 93.6, respetivamente o cenário 3 e 4.

Analisando a comparação das velocidades (Figura 4.5), nota-se uma aproximação ao intervalo de velocidades observada nos cenários 3 e 4 em comparação com o cenário 2, principalmente na estação S4 às 13:15h e 14:00h. O comportamento do perfil de velocidade tende a manter-se. Porém, nota-se uma inversão nas velocidades à superfície na estação S4 às 13:45h e 14:00h. Na comparação dos perfis de temperatura (Figura 4.6), nota-se um afastamento dos valores dos modelos das observações à medida que o coeficiente de atrito aumenta. Apesar disto, a tendência da temperatura com a profundidade assimila-se mais às observações com o aumento do coeficiente de atrito. Ou seja, mais próximo no cenário 3 que no 2 e mais próximo no cenário 4 que no 3.

Com a análise da comparação das velocidades percebe-se que os cenários 3 e 4 apresentam uma melhoria ao cenário 2. Com as conclusões da comparação dos perfis de temperatura, escolheu-se o cenário 4 para a continuação deste trabalho por ser o que mais realisticamente segue a tendência da temperatura. Nesta situação, é mais importante escolher o cenário que mais realisticamente representa o

comportamento da temperatura do que escolher o cenário que minimiza o erro médio. Isto porque a sobrestimação da temperatura é possivelmente um erro propagado pelas condições da fronteira oceânica.

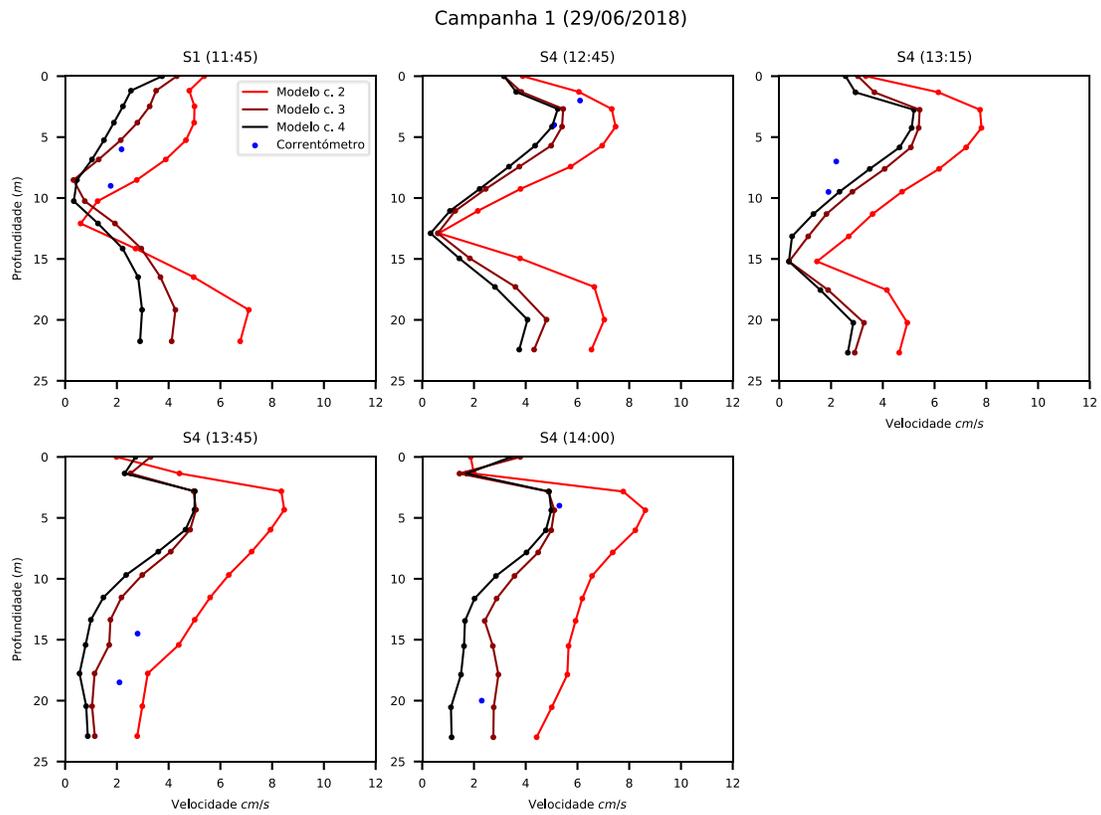


Figura 4.5. Campanha 1 – Perfis de velocidade do modelo, cenários 2, 3 e 4, e observações.

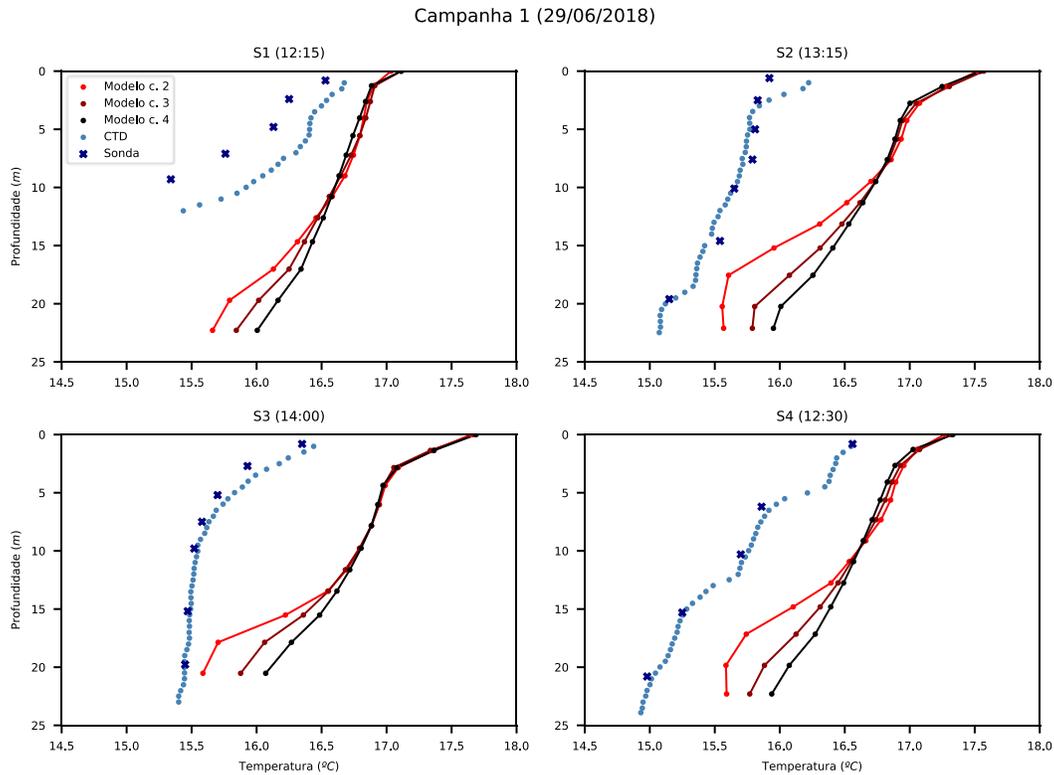


Figura 4.6. Campanha 1 – Perfis de temperatura do modelo, cenários 2, 3 e 4, e observações.

Para finalizar a calibração e para ter a certeza que a definição do pontão como permeável e poroso apresenta melhores resultados do que uma definição com o pontão completamente sólido e impermeável, comparou-se o cenário 4, com um coeficiente de atrito de 93.6 e com a zona sólida entre os terminais, com o cenário 5 em que se definiu o pontão como inteiramente sólido (Tabela 4.1).

Comparando os perfis de velocidade (Figura 4.7), nota-se que, geralmente, os resultados do cenário 4 se aproximam mais à gama de valores observadas durante a campanha, especialmente na estação S4 às 12:45h e às 14:00h. Olhando para os perfis de temperatura (Figura 4.8), o cenário 5 apresenta resultados, na maioria, mais afastados das observações, e esta diferença tende a aumentar com a profundidade. O comportamento da temperatura com a profundidade é mais bem representado pelo cenário 4 do que pelo 5 em todas as estações exceto à S3.

Devido aos melhores resultados com o cenário 4 do que com o 5, utilizaram-se as configurações do cenário 4 para o resto deste trabalho e para a validação apresentada na seguinte secção.

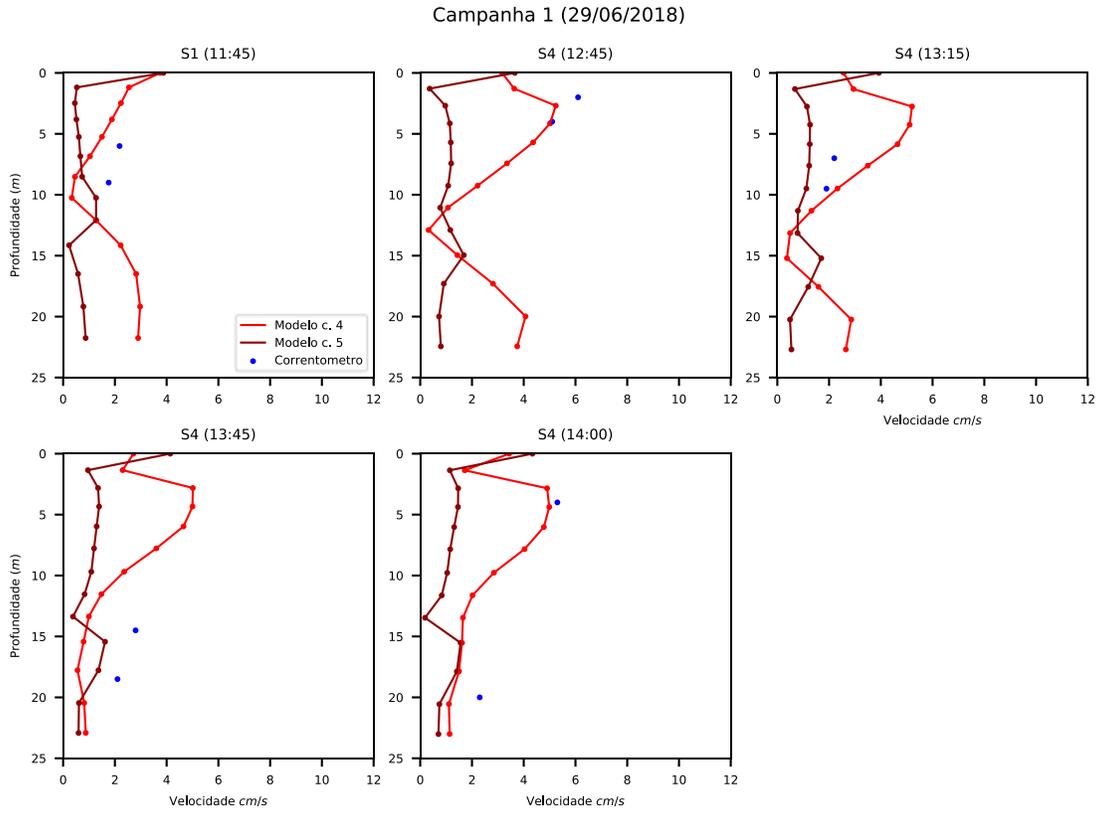


Figura 4.7. Campanha 1 – Perfis de velocidade do modelo, cenários 4 e 5, e observações.

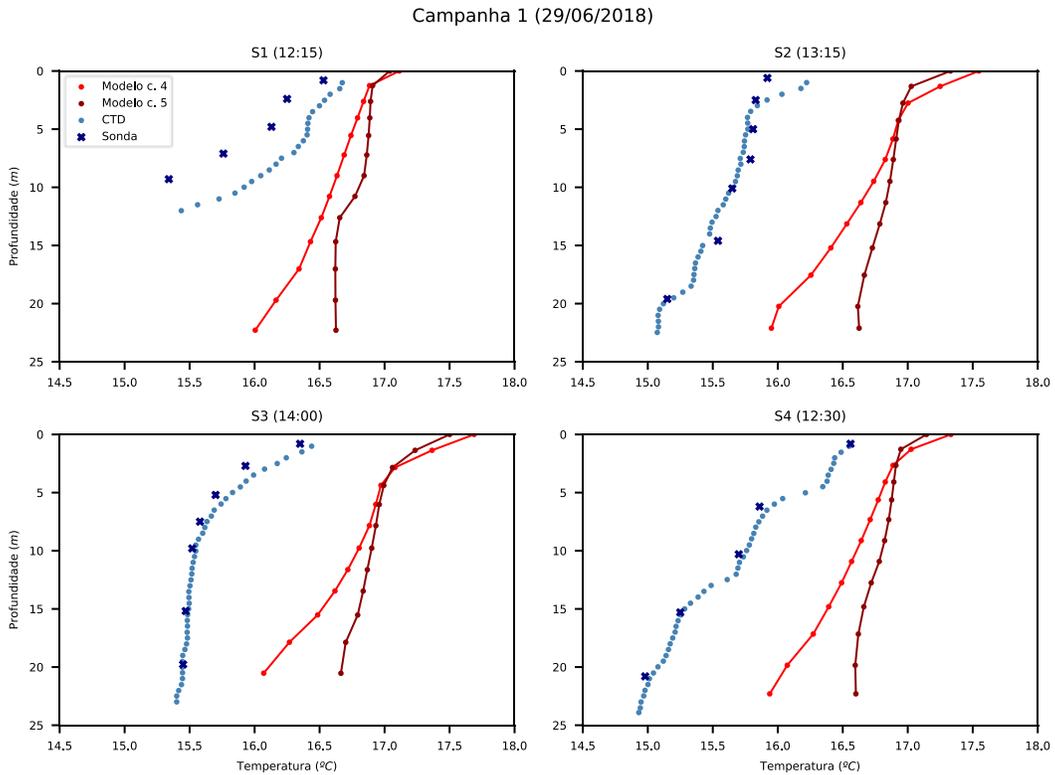


Figura 4.8. Campanha 1 – Perfis de temperatura do modelo, cenários 4 e 5, e observações.

4.3. Validação do Domínio 5

Nesta secção estão apresentadas as comparações entre os resultados do modelo e os perfis medidos *in situ*. Nos perfis estão apresentadas as medições realizadas com o CTD e com a sonda. Os indicadores estatísticos foram calculados apenas com as medições realizadas por CTD por haver mais pontos de medição em comparação com a sonda.

4.3.1. Campanha 2 – 25/10/2018

Na campanha 2 planeou-se realizar amostragem nas estações S1, S2, S3 e S4 no dia 25 de outubro de 2018. Porém, devido a condições inesperadas, apenas foi possível a amostragem completa na estação S1 e uma amostragem parcial na estação S3 (foram apenas registados dados com a sonda paramétrica para os primeiros 5 metros de profundidade). A estação S1 foi amostrada por volta das 13:00h e a estação S3 por volta das 11:45h. As previsões de marés para esta campanha foram de baixa-mar às 08:32h com uma altura de 0.6 metros e preia-mar às 14:44h com uma altura de 3.4 metros (Porto de Sines 2018).

Começando-se por comparar os resultados do modelo para a temperatura com os valores observados, verifica-se uma diferença significativa e maior do que a existente nas comparações da campanha 1 (ver Figura 4.9). Os RMSE assumem valores de 3.67 e 3.87 °C e os BE de 3.65 e 3.85 °C, para as estações S1 e S3, respetivamente. Esta sobrestimação deve-se às condições de fronteira oceânica recebidas do modelo PCOMS. Decidiu-se realizar uma simulação utilizando condições de fronteira de outro modelo, o LUSITANIA (Campuzano et al. 2013), para avaliar a diferença nos resultados do modelo de Sines quando utilizadas as diferentes condições de fronteira.

Os valores de RMSE e BE resultantes da comparação entre as observações e o modelo com condições de fronteira do PCOMS e entre as observações e o modelo com condições de fronteira do LUSITANIA para a temperatura, salinidade e densidade para as estações S1 e S3 estão apresentados na Tabela 4.2. Os resultados de temperatura para a simulação em que o modelo de Sines utiliza condições de fronteira do modelo LUSITANIA, aproximam-se significativamente mais dos valores registados no campo (ver Figura 4.9). Em média os valores estão 2.81 °C mais próximos na estação S1 e 2.71 °C na estação S3.

Para os perfis de velocidade, o erro observado é reduzido e a evolução com a profundidade é bem simulada (ver Figura 4.10), a maior diferença observa-se, na estação S1 às 12:00h. É difícil afirmar que um dos modelos dá origem a melhor resultados que o outro visto a proximidade entre si e a utilização do modelo LUSITANIA resultar em valores mais próximos na estação S1 e a utilização do PCOMS na estação S3.

Para a salinidade, o cenário com o LUSITANIA mostra resultados mais próximos das observações com o CTD do que o cenário com o PCOMS. No entanto, a diferença é muito menos significativa que a observada

na temperatura. No cenário com o PCOMS o modelo de Sines sobrestima os valores de salinidade enquanto que com o LUSITANIA subestima-os. Observando a Figura 4.11 nota-se que a salinidade permanece num valor semelhante desde a superfície da coluna da água até ao fundo. No entanto, há uma incerteza associada aos valores de salinidade registados em campo visto a diferença entre os valores registados pelos dois aparelhos utilizados. Utilizaram-se os dados do CTD por ser o mais coerente e com mais pontos de dados, mas seria necessário um terceiro aparelho para se garantir que são os mais corretos.

Em relação à densidade, existe novamente uma melhor simulação dos dados observados no cenário com o LUSITANIA do que com o PCOMS (Figura 4.12). No entanto, como a densidade é função da temperatura e salinidade, esta diferença é proveniente maioritariamente da diferença de temperaturas entre os cenários do LUSITANIA e do PCOMS. Em ambos os cenários o modelo simula o comportamento da densidade com a profundidade adequadamente.

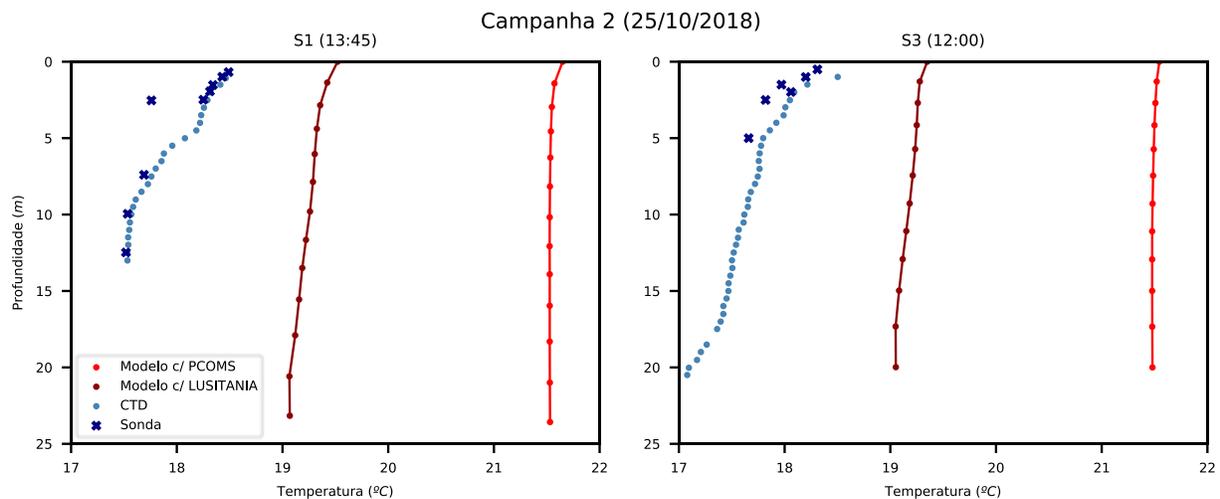


Figura 4.9. Campanha 2 – Perfis de temperatura do modelo com condições de fronteira oceânicas dos modelos PCOMS e LUSITANIA e observações.

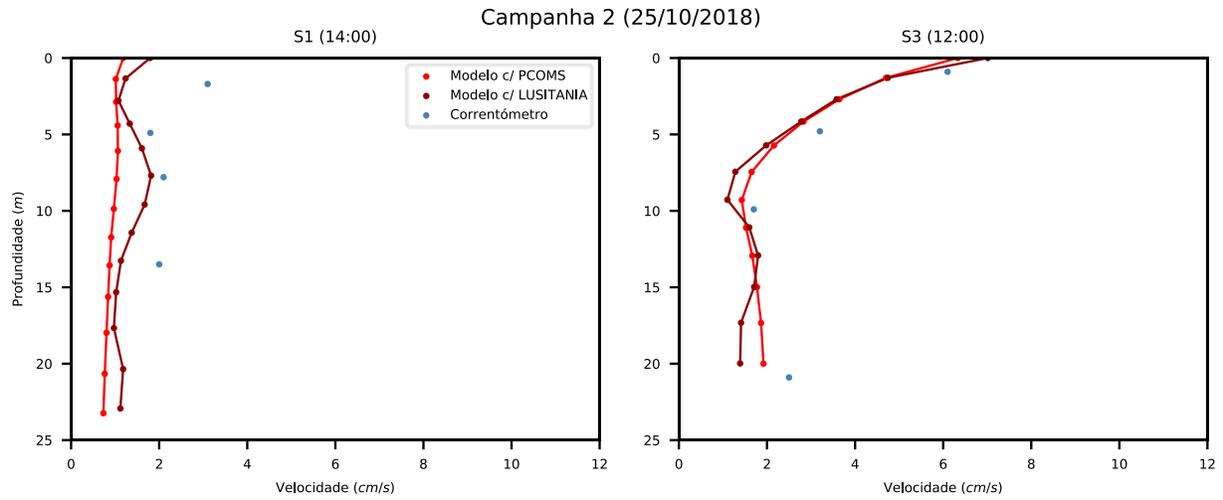


Figura 4.10. Campanha 2 – Perfis de velocidade do modelo com condições de fronteira oceânicas dos modelos PCOMS e LUSITANIA e observações.

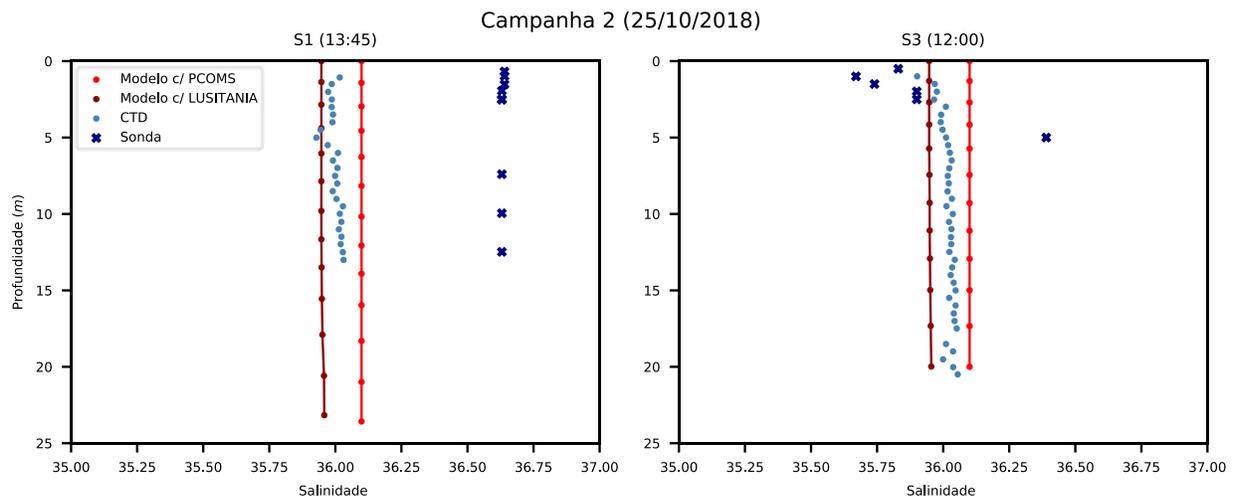


Figura 4.11. Campanha 2 – Perfis de salinidade do modelo com condições de fronteira oceânicas dos modelos PCOMS e LUSITANIA e observações.

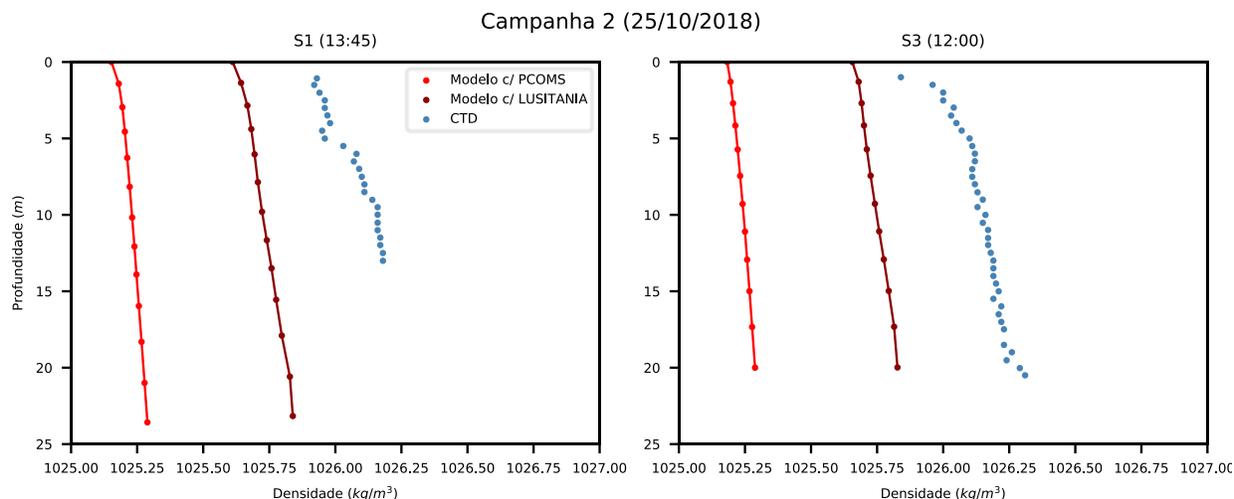


Figura 4.12. Campanha 2 – Perfis de densidade do modelo com condições de fronteira oceânicas dos modelos PCOMS e LUSITANIA e observações.

Tabela 4.2. Campanha 2 – Valores de RMSE e BE das comparações do modelo utilizando condições de fronteira oceânica do modelo PCOMS e LUSITANIA com as observações.

Temperatura				
	RMSE (°C)		BE (°C)	
	PCOMS	LUSITANIA	PCOMS	LUSITANIA
Estação S1	3.67	1.44	3.65	1.42
Estação S3	3.87	1.54	3.85	1.53

Salinidade				
	RMSE		BE	
	PCOMS	LUSITANIA	PCOMS	LUSITANIA
Estação S1	0.10	0.06	0.10	-0.05
Estação S3	0.09	0.07	0.08	-0.07

Densidade				
	RMSE (kg/m³)		BE (kg/m³)	
	PCOMS	LUSITANIA	PCOMS	LUSITANIA
Estação S1	0.86	0.37	-0.85	-0.37
Estação S3	0.90	0.39	-0.90	-0.39

4.3.2. Campanha 3 – 12/03/2019

Para a campanha 3, foram realizadas observações nas estações S1, S2A, S3 e S5 entre as 11:00h e as 14:00h do dia 12 de março de 2019. As previsões de marés para este dia foram de baixa-mar às 11:44h com uma altura de 1.1 m e preia-mar às 18:03h com uma altura de 3.0 m (Porto de Sines 2019b). Para se avaliar a diferença na utilização do modelo atmosférico WRF na precisão do modelo de Sines, compararam-se os resultados de uma simulação utilizando o modelo MM5 como fonte de condições de fronteira atmosférica e outra com o modelo WRF com os valores recolhidos no campo. Os indicadores estatísticos RMSE e BE para cada simulação são apresentados na Tabela 4.3.

Analisando os perfis de velocidade das simulações com as observações (Figura 4.13), os resultados de ambas as simulações estão próximas do intervalo de valores registadas no campo para as estações S1, S2A e S3. A simulação com o modelo WRF apresenta velocidades mais elevadas junto da superfície, a partir dos 10 metros na estação S1 e a partir dos 7 metros na estação S2A.

Comparando os valores de temperatura das simulações com as observações (Figura 4.14), ambas as simulações mostram valores próximos dos dados do CTD, com uma tendência de sobrevalorização. As maiores diferenças entre as simulações estão nos pontos mais próximos da superfície visto a diferença entre elas ser propagada através da interface água-ar. Em geral, a utilização do modelo WRF diminui o erro do modelo com exceção da estação S1, onde se dá um aumento do erro, mas pouco significativo em contraste com a diminuição nas restantes estações.

Para a salinidade, o resultado do cenário com o WRF e o com o MM5 são virtualmente iguais (Figura 4.15). Os indicadores estatísticos mostram uma diferença pequena entre os cenários e os dados de campo, com uma pequena tendência para sobrevalorização. Os perfis de salinidade apresentam uma estratificação quase nula, à semelhança da campanha 2.

Para a densidade, em ambos os cenários os RMSE e BE estão próximos de zero (Figura 4.16). Os RMSE do cenário com o WRF são ligeiramente maiores que o cenário com o MM5 nas estações S1, S2A e S5. Ambas as simulações simulam adequadamente a tendência da densidade com a profundidade. Como os resultados da salinidade em ambos os cenários são idênticos, a diferença no comportamento da densidade em cada simulação é devida principalmente às diferenças na temperatura.

Campanha 3 (12/03/2019)

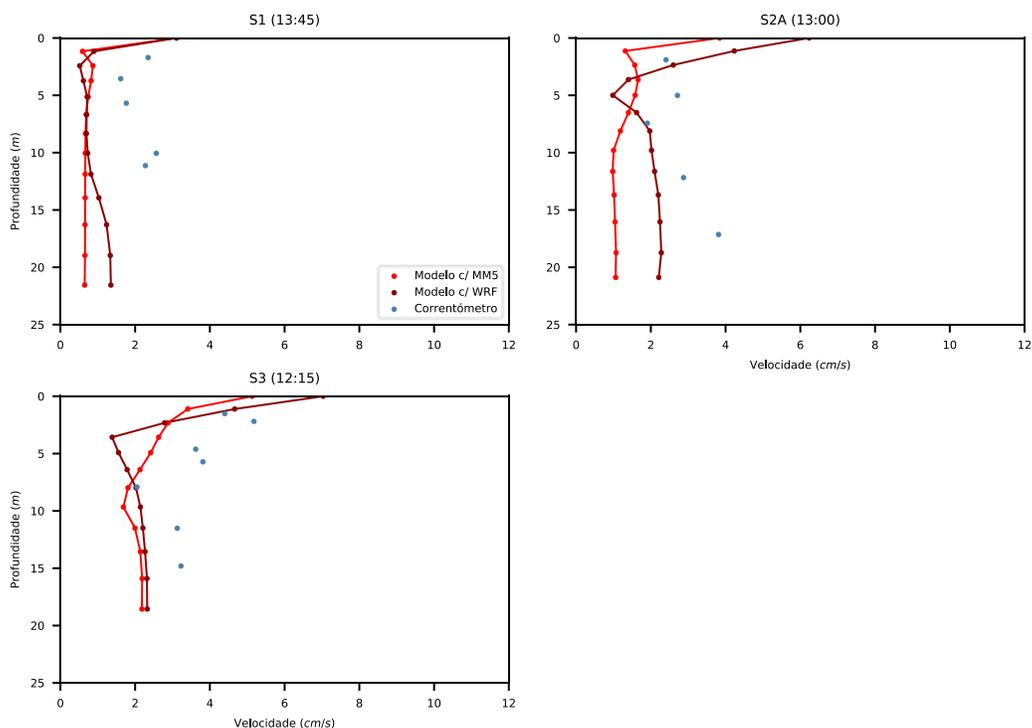


Figura 4.13. Campanha 3 – Perfis de velocidade do modelo com condições de fronteira oceânicas dos modelos PCOMS e LUSITANIA e observações.

Campanha 3 (12/03/2019)

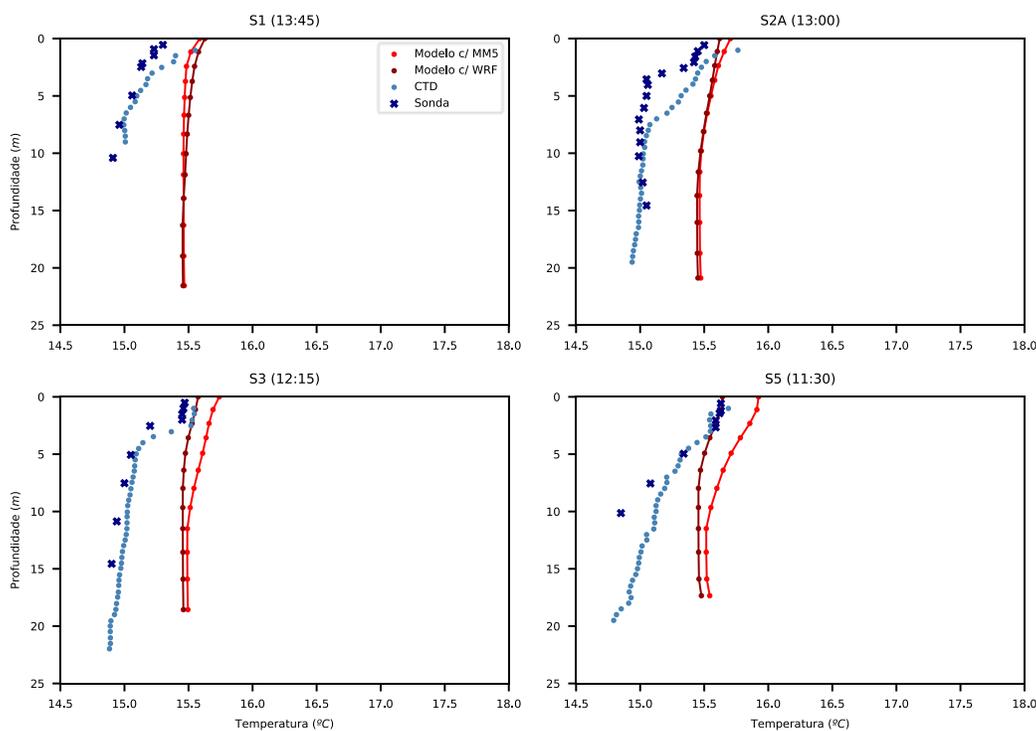


Figura 4.14. Campanha 3 – Perfis de temperatura do modelo com condições de fronteira atmosféricas dos modelos MM5 e WRF e observações.

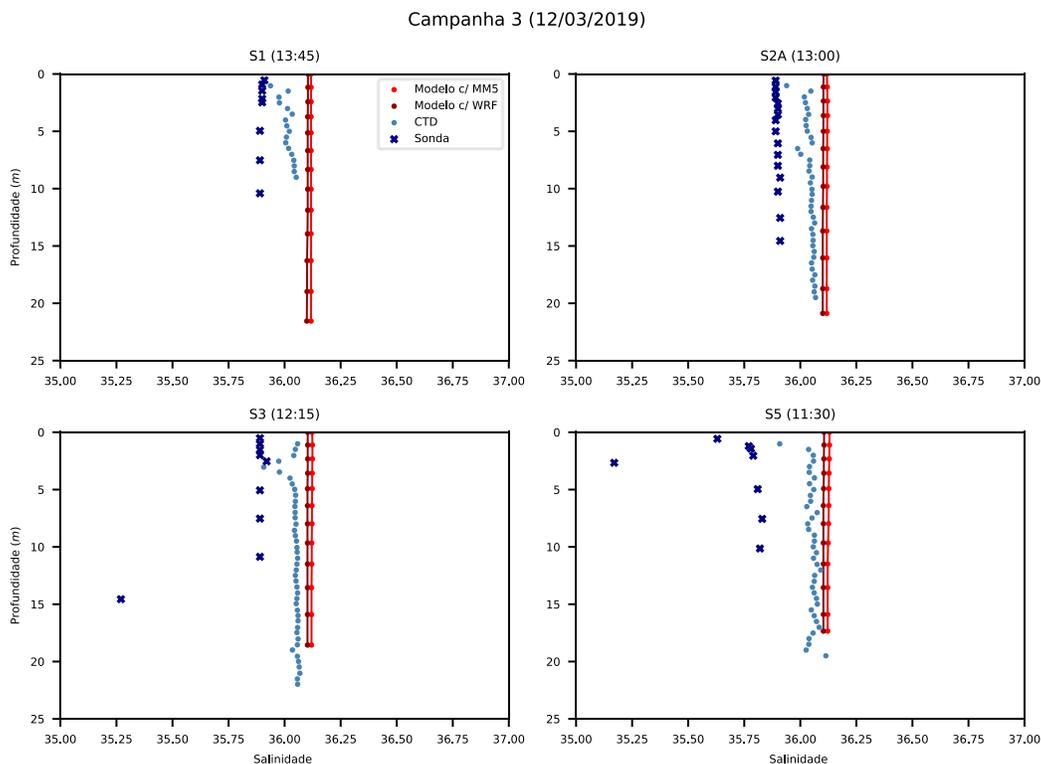


Figura 4.15. Campanha 3 – Perfis de salinidade do modelo com condições de fronteira atmosféricas dos modelos MM5 e WRF e observações.

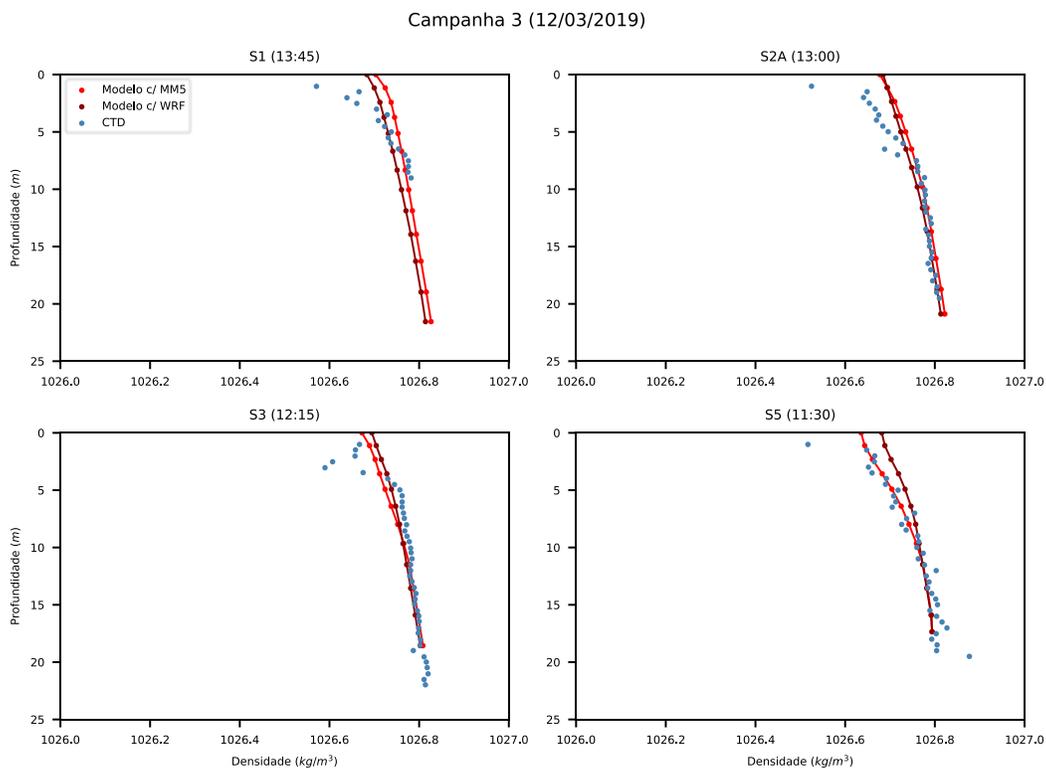


Figura 4.16. Campanha 3 – Perfis de densidade do modelo com condições de fronteira atmosféricas dos modelos MM5 e WRF e observações.

Tabela 4.3. Campanha 3 – Valores de RMSE e BE das comparações do modelo utilizando condições de fronteira atmosférica do modelo MM5 e WRF com as observações.

Temperatura				
	RMSE (°C)		BE (°C)	
	MM5	WRF	MM5	WRF
Estação S1	0.36	0.40	0.33	0.37
Estação S2A	0.40	0.39	0.37	0.35
Estação S3	0.50	0.44	0.48	0.41
Estação S5	0.48	0.39	0.46	0.33
Salinidade				
	RMSE		BE	
	MM5	WRF	MM5	WRF
Estação S1	0.11	0.09	0.11	0.09
Estação S2A	0.08	0.06	0.08	0.06
Estação S3	0.08	0.06	0.08	0.06
Estação S5	0.08	0.05	0.07	0.05
Densidade				
	RMSE (kg/m ³)		BE (kg/m ³)	
	MM5	WRF	MM5	WRF
Estação S1	0.05	0.04	0.03	0.01
Estação S2A	0.04	0.04	0.02	0.01
Estação S3	0.03	0.03	0.00	0.00
Estação S5	0.03	0.04	0.00	0.01

4.3.3. Campanha 4 – 30/04/2019

Para a campanha 4, foram realizadas observações nas estações S1, S2A, S3 e S5 entre as 11:45h e as 14:10h no dia 30 de abril de 2019. As previsões de marés para este dia foram de baixa-mar às 05:48h e 18:01h com uma altura de 1.1 m e preia-mar às 12:02h com uma altura de 2.7 m (Porto de Sines 2019b). Nesta campanha apenas se correu o modelo de Sines utilizando condições de fronteira oceânica do modelo PCOMS e atmosféricas do modelo WRF. Os indicadores estatísticos RMSE e BE resultantes desta comparação estão apresentados na Tabela 4.4.

Na comparação dos perfis de temperatura (Figura 4.17), percebe-se que o perfil do modelo segue a tendência das observações adequadamente. Os erros são relativamente pequenos, sendo o maior valor de

RMSE, 0.67 °C, encontrado na estação S1. O modelo sobrestima os valores da temperatura em todas as situações.

Os perfis de salinidade (Figura 4.18) mostram-se aproximadamente constantes em profundidade quer no modelo, quer nos valores observados, em semelhança às campanhas anteriores. Os valores registados pelos dois instrumentos usados no campo não são coerentes, os valores de salinidade registados pela sonda são aproximadamente 0.5 mais elevados que os registados pelo CTD. Porém, as diferenças do modelo para os valores registados pela sonda não apresentam um erro muito maior do que para o CTD.

Os perfis de densidade (Figura 4.17) resultantes do modelo apresentam um erro pequeno quando comparado com as observações e modelam adequadamente a estratificação observada.

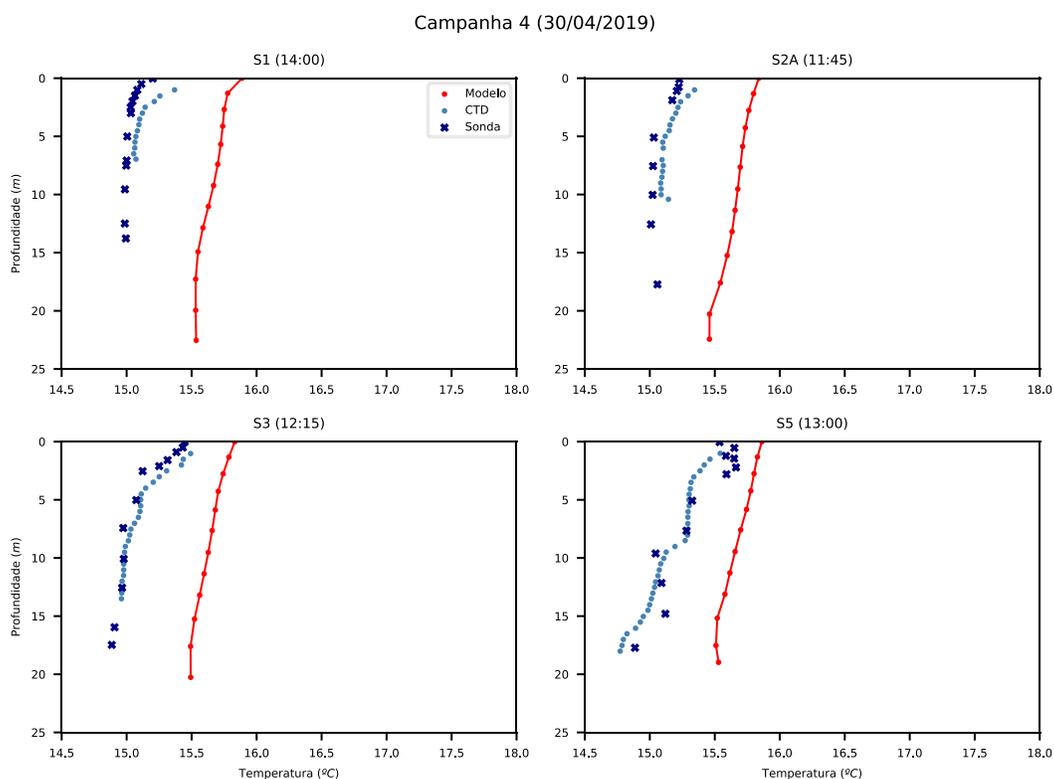


Figura 4.17. Campanha 4 – Perfis de temperatura do modelo e observações.

Campanha 4 (30/04/2019)

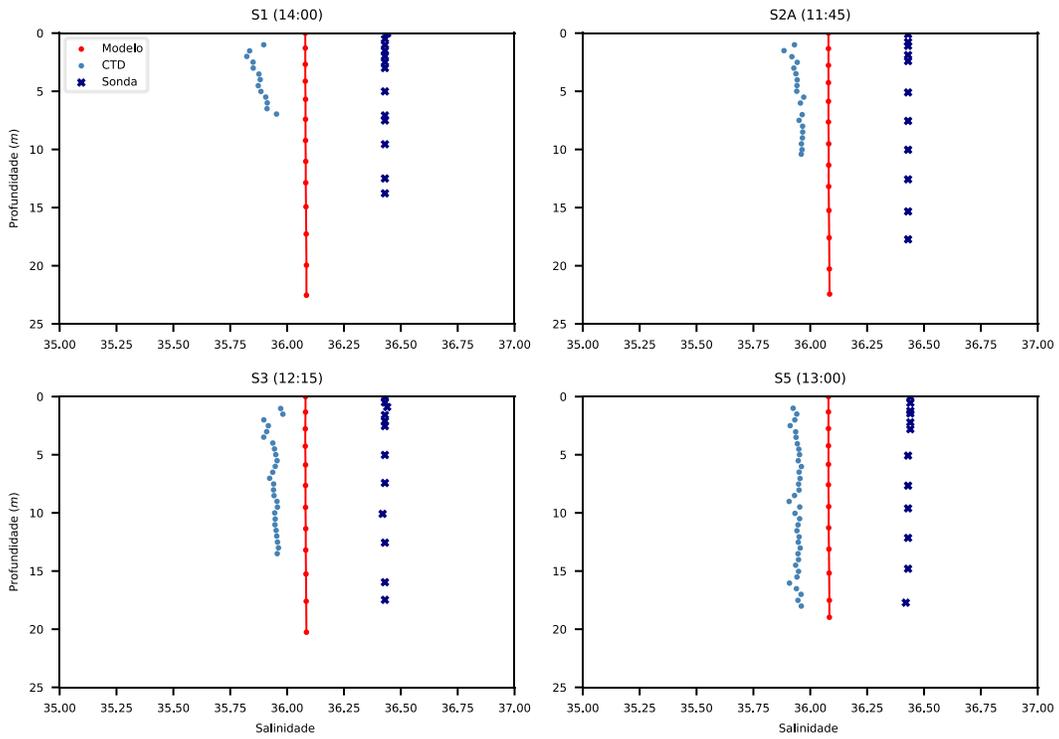


Figura 4.18. Campanha 4 – Perfis de salinidade do modelo e observações.

Campanha 4 (30/04/2019)

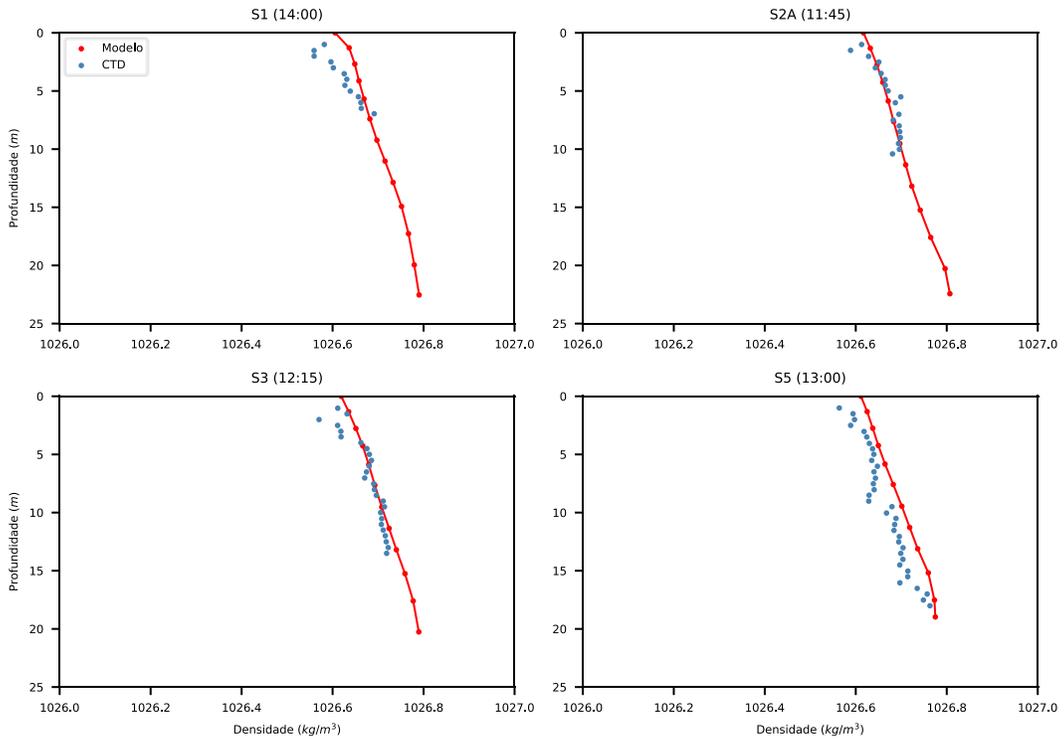


Figura 4.19. Campanha 4 – Perfis de densidade do modelo e observações.

Tabela 4.4. Campanha 4 – Valores de RMSE e BE das comparações do modelo utilizando condições de fronteira atmosférica do modelo MM5 e WRF com as observações.

Temperatura		
	RMSE (°C)	BE (°C)
Estação S1	0.62	0.61
Estação S2A	0.57	0.57
Estação S3	0.57	0.56
Estação S5	0.52	0.51
Salinidade		
	RMSE	BE
Estação S1	0.20	0.20
Estação S2A	0.14	0.13
Estação S3	0.14	0.14
Estação S5	0.14	0.14
Densidade		
	RMSE (kg/m ³)	BE (kg/m ³)
Estação S1	0.04	0.03
Estação S2A	0.02	0.00
Estação S3	0.02	0.01
Estação S5	0.04	0.04

4.4. Mapas de Resultados

Nesta secção estão apresentados mapas de resultados do modelo de temperatura e velocidades para os dias das campanhas realizadas. Para cada dia foram escolhidos 4 instantes, fazendo com que em cada dia se observasse um instante de maré enchente, vazante, preia-mar e baixa-mar.

4.4.1. Campanha 1 – 29/06/2018

São aqui apresentados mapas de resultados à superfície, para o dia da primeira campanha, dia 29 de junho de 2018. Para esta simulação o modelo foi corrido com condições de fronteira oceânicas do modelo PCOMS e condições de fronteira atmosférica do modelo MM5. Os resultados da maré e os instantes temporais escolhidos para as figuras seguintes são apresentados na Figura 4.20.

Analisando a Figura 4.21, observa-se que no domínio 4 atingem-se velocidades de 50 cm/s devido a uma corrente proveniente de oeste, visível às 12:00h e 15:00h. É visível também a proteção que o pontão mais oeste do porto de Sines (perto do terminal petroquímico) fornece das correntes mais fortes vindas de norte e oeste. No domínio 5 as velocidades são mais reduzidas, apenas se atingindo valores superiores a 37 cm/s perto da fronteira às 12:00h e às 15:00h. No interior do porto, no terminal de contentores, as velocidades não ultrapassam os 15 cm/s. A direção das correntes é coincidente com o regime de ventos presente nos resultados do modelo MM5, que apresenta maioritariamente ventos de oeste e noroeste.

Em relação aos resultados da temperatura à superfície (Figura 4.22), perto da descarga da central termoelétrica a água chega a atingir temperaturas de aproximadamente 22 °C mas devido ao regime de correntes nestes dias a pluma térmica move-se principalmente para sul e para este, não parecendo influenciar a zona do porto de Sines. Nota-se uma entrada de massa de água mais quente com as correntes de noroeste.

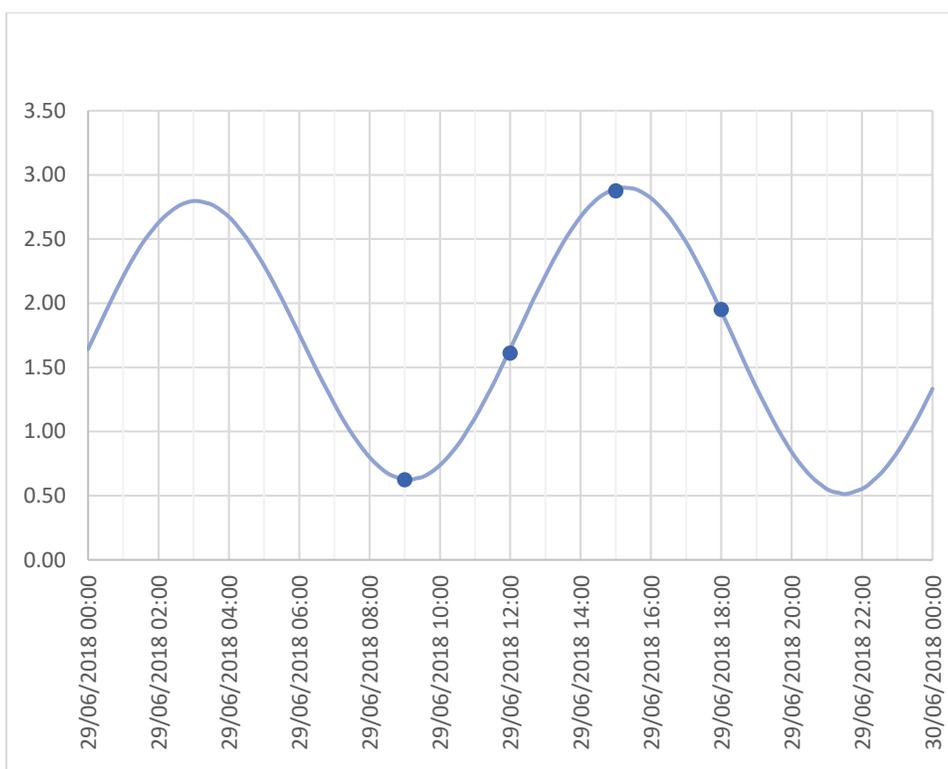


Figura 4.20. Campanha 1 – Resultados do nível da água do modelo ao longo do dia 29/06/2018 e instantes escolhidos para os mapas de resultados.

29/06/2018

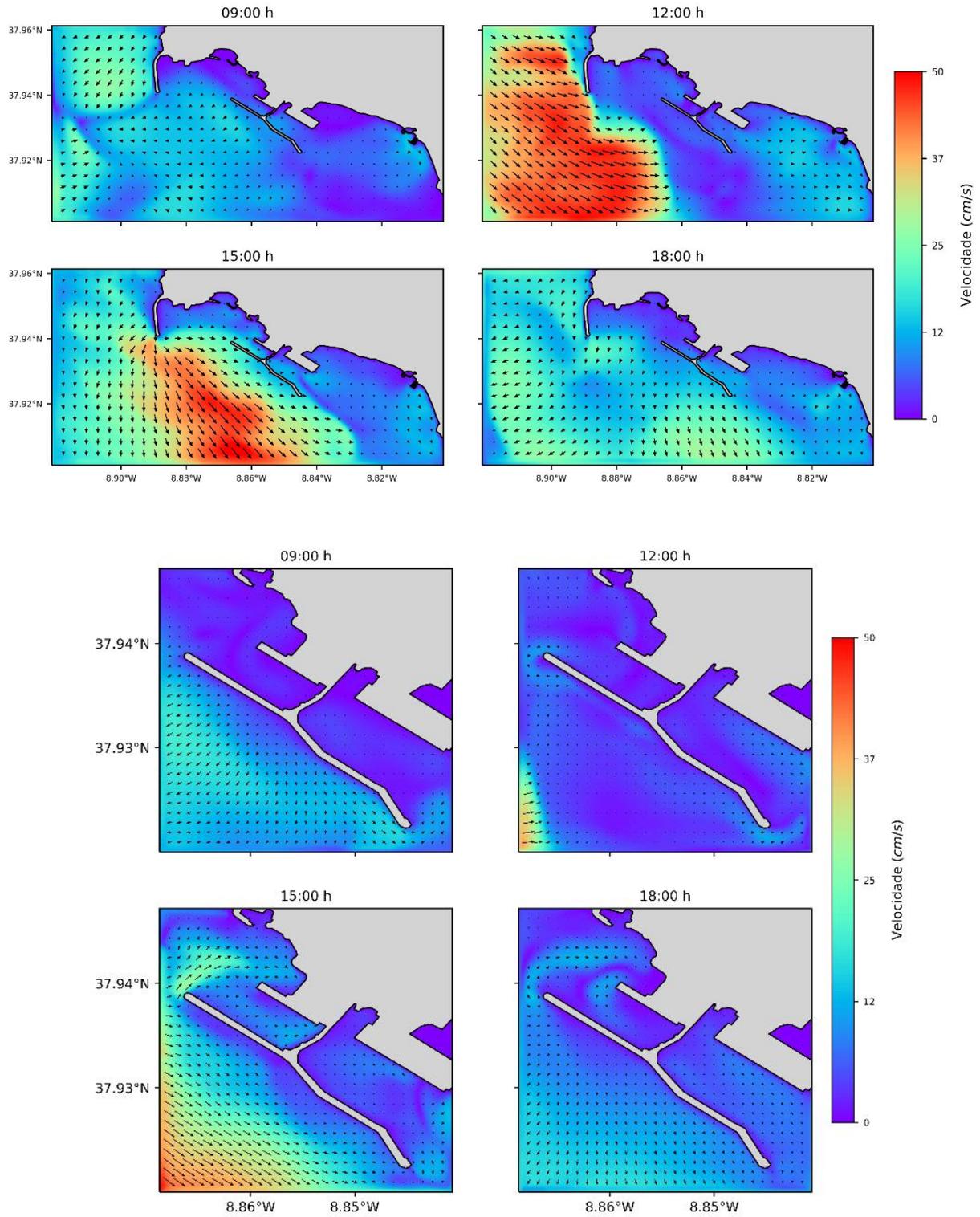


Figura 4.21. Campanha 1 – Mapa de resultados das velocidades para os domínios 4 e 5.

29/06/2018

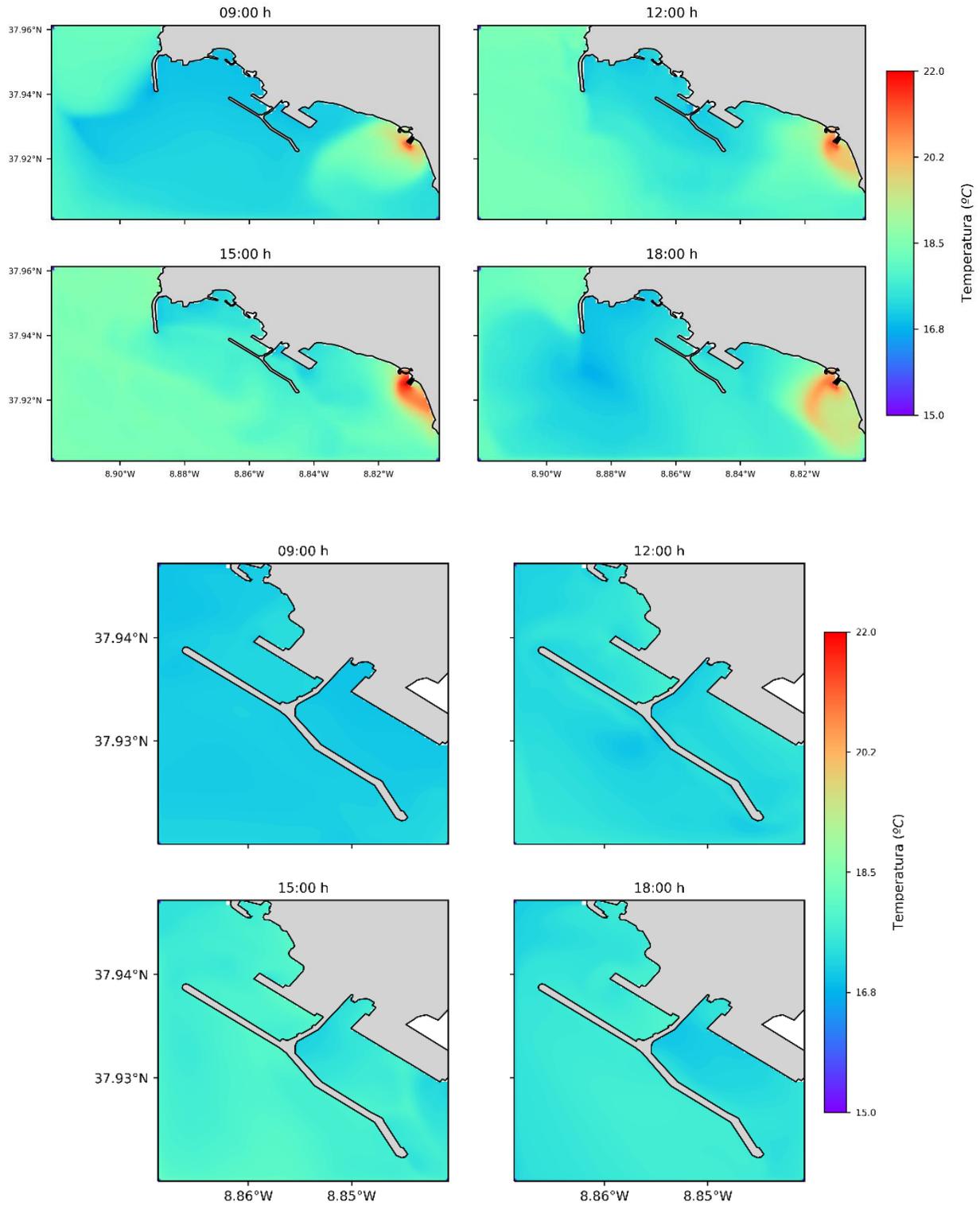


Figura 4.22. Campanha 1 – Mapa de resultados da temperatura para os domínios 4 e 5.

4.4.2. Campanha 2 – 25/10/2018

São aqui apresentados mapas de resultados à superfície, para o dia da segunda campanha, dia 25 de outubro de 2018. São apresentados resultados de duas simulações com uma alteração entre elas. A primeira utiliza condições de fronteira oceânica do modelo PCOMS e a segunda utiliza do modelo LUSITANIA. Ambas utilizam o modelo MM5 como condição de fronteira atmosférica. Os resultados da maré e os instantes temporais apresentados são apresentados na Figura 4.23.

Os resultados dos campos de velocidade mostram predominantemente correntes vindas de sul e sudeste, quer na simulação com o PCOMS (Figura 4.24), quer com o LUSITANIA (Figura 4.25). A diferença entre as simulações é maioritariamente a intensidade das correntes, com condições de fronteira do modelo PCOMS notam-se velocidades mais elevadas do que com o LUSITANIA, especialmente observável às 12:00h e 18:00h. Nesta campanha as velocidades máximas atingidas são menores que as vistas na campanha 1. No domínio 4 atinge-se no máximo velocidades de 30 cm/s e no domínio 5 de 25 cm/s. A direção das correntes está de acordo com o regime de ventos do modelo MM5 em ambos os modelos.

Os mapas de resultados de temperatura mostram diferenças mais significativas entre as simulações. A temperatura varia entre 21 e 25 °C na simulação com o PCOMS (Figura 4.26) e 19 e 23 °C na simulação com o LUSITANIA (Figura 4.27). O comportamento da pluma térmica é idêntico em ambas as simulações devido ao regime de velocidades ser também ele idêntico. Com as correntes de sul e sudeste a pluma aproxima-se mais do porto de Sines do que o que foi observado na campanha 1, principalmente visível às 18:00h. Não são aqui apresentados mapas de resultados de temperatura para o domínio 5 visto a variabilidade térmica à superfície neste domínio ser baixa.

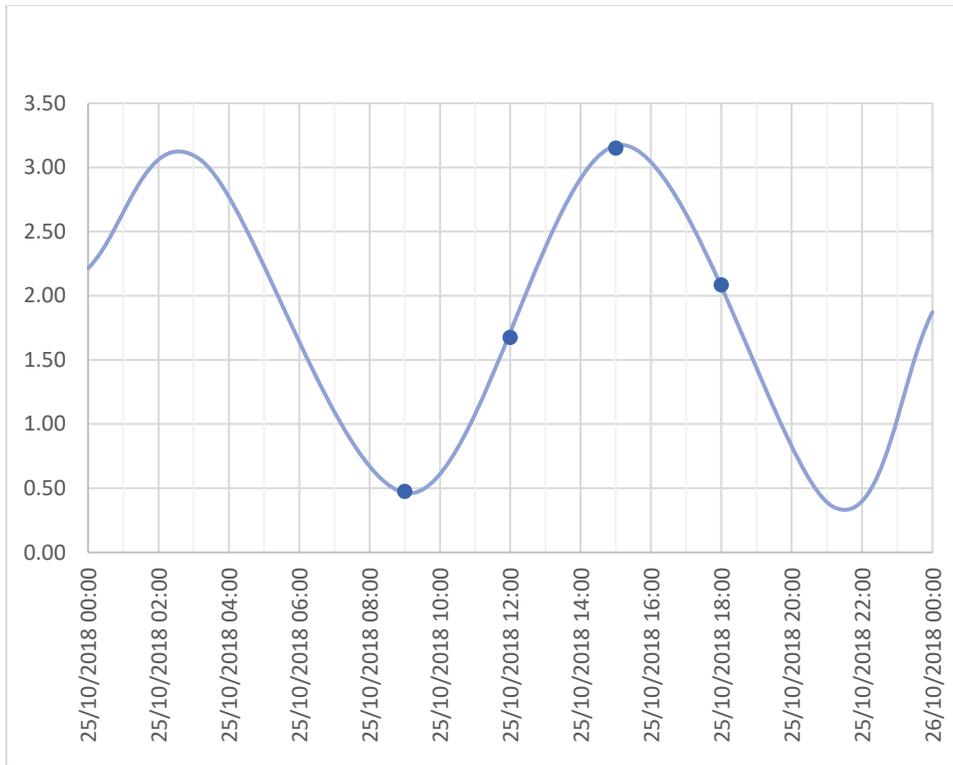


Figura 4.23. Campanha 2 – Resultados do nível da água do modelo ao longo do dia 25/10/2018 e instantes escolhidos para os mapas de resultados.

Modelo c/ PCOMS
25/10/2018

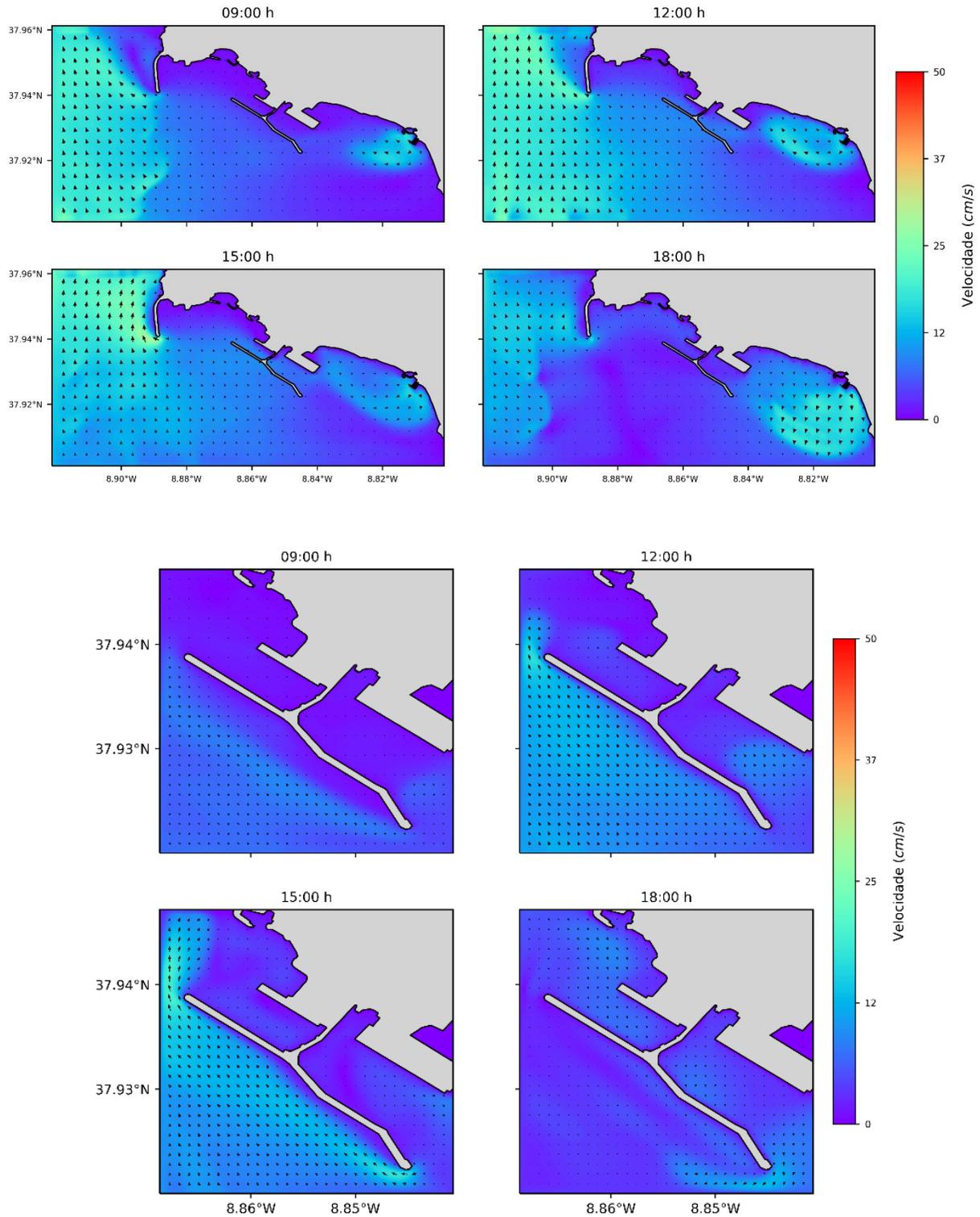


Figura 4.24. Campanha 2 – Mapa de resultados das velocidades para os domínios 4 e 5, utilizando condições de fronteira oceânicas do modelo PCOMS.

Modelo c/ LUSITANIA
25/10/2018

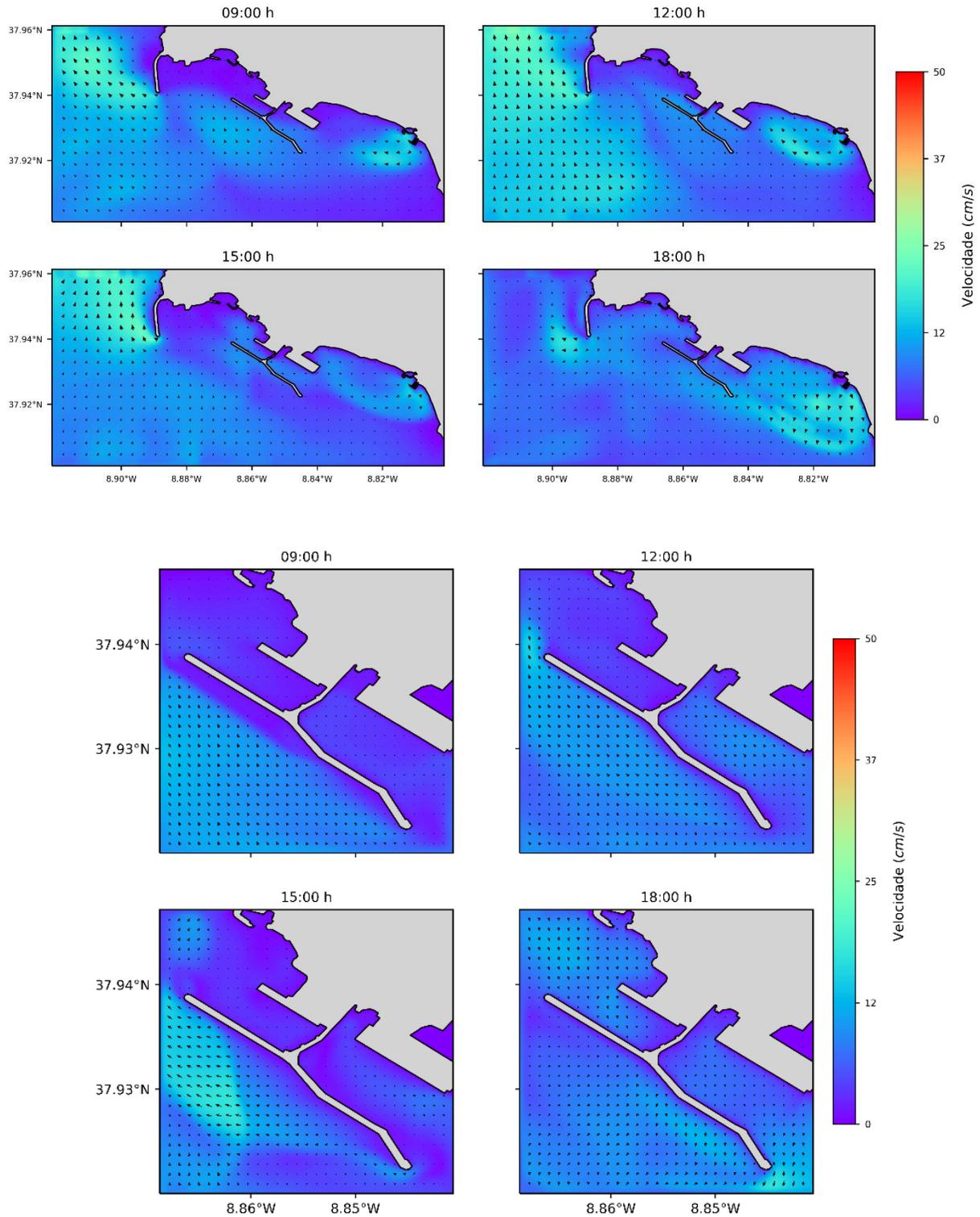


Figura 4.25. Campanha 2 – Mapa de resultados das velocidades para os domínios 4 e 5, utilizando condições de fronteira oceânicas do modelo LUSITANIA.

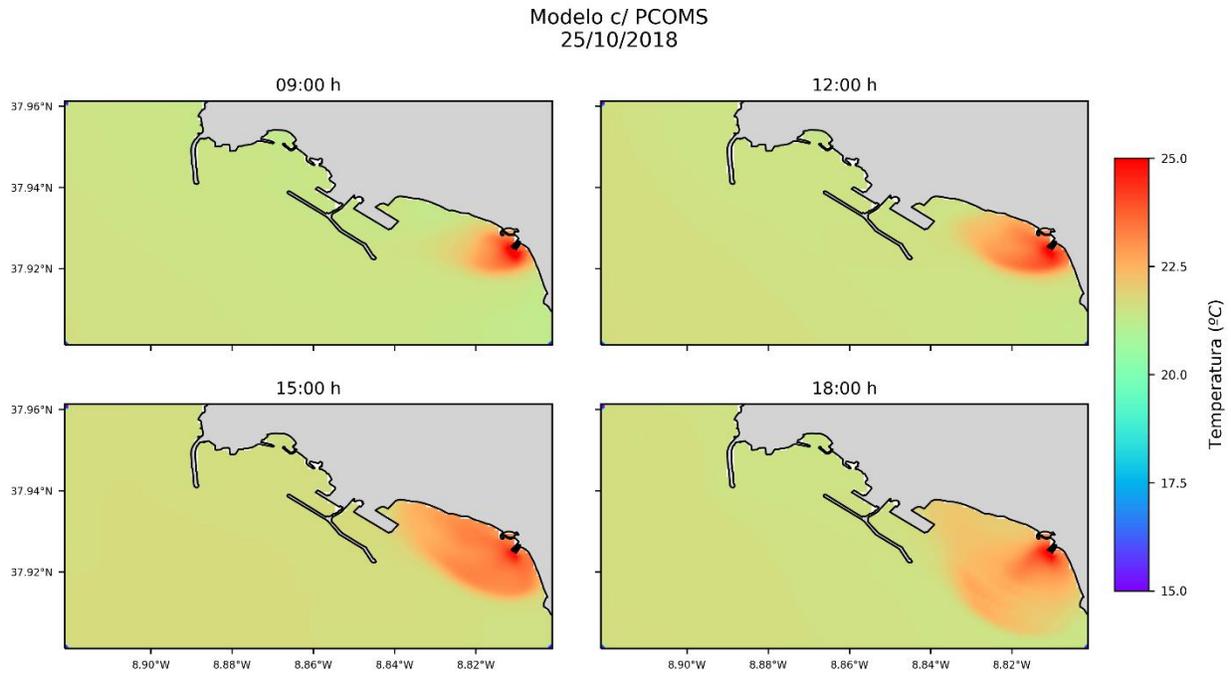


Figura 4.26. Campanha 2 – Mapa de resultados da temperatura para os domínios 4 e 5, utilizando condições de fronteira oceânicas do modelo PCOMS.

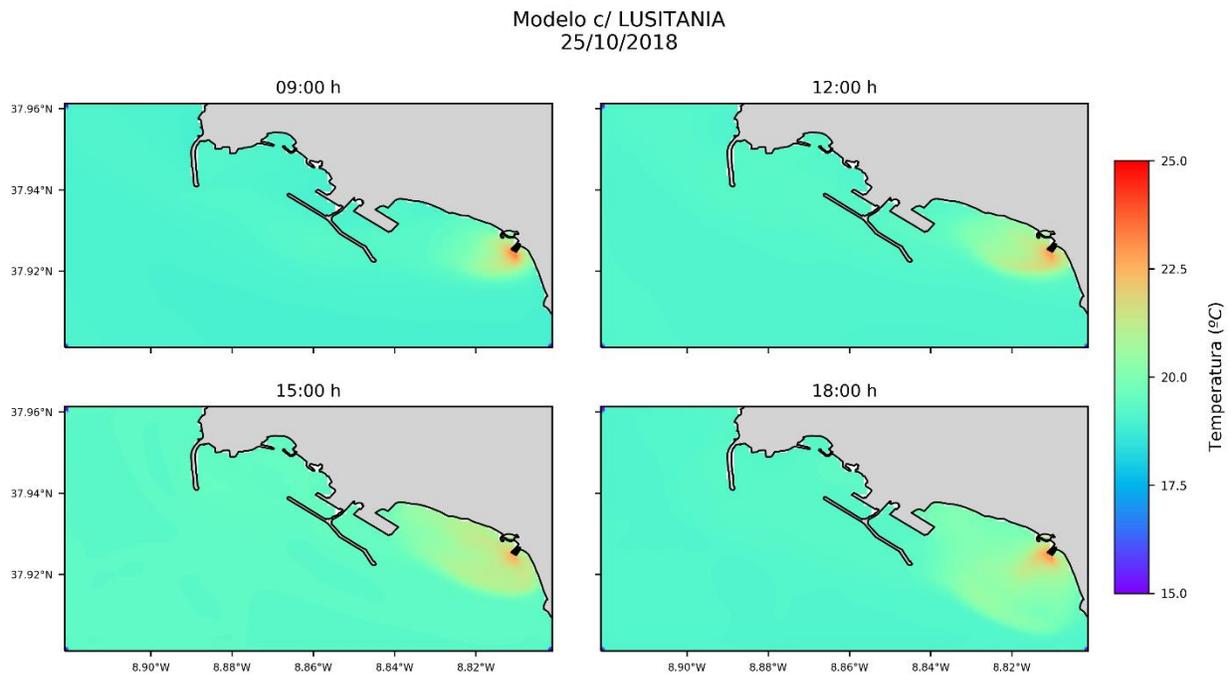


Figura 4.27. Campanha 2 – Mapa de resultados da temperatura para os domínios 4 e 5, utilizando condições de fronteira oceânicas do modelo LUSITANIA.

4.4.3. Campanha 3 – 12/03/2019

São aqui apresentados mapas de resultados à superfície, para o dia 12 de março de 2019. Em semelhança à campanha 2, são apresentados resultados de duas simulações. A primeira utiliza condições de fronteira atmosféricas do modelo MM5 e a segunda utiliza do modelo WRF. Ambas utilizam o modelo PCOMS para as condições da fronteira oceânica. Os resultados da maré e os instantes escolhidos são apresentados na Figura 4.28.

Em relação ao mapa de resultados das velocidades, as correntes neste dia são maioritariamente de norte e noroeste. A direção e intensidade é semelhante na maioria das zonas em ambas as simulações, quer na que utiliza condições de fronteira atmosférica do modelo MM5 (Figura 4.29), quer na que usa do modelo WRF (Figura 4.30). A diferença mais significativa ocorre junto à linha de costa e perto da central termoelétrica de Sines. Na simulação com o WRF as correntes seguem a linha de costa e atingem-se velocidades mais elevadas, enquanto que com o MM5 a velocidade na zona da descarga tem uma orientação de norte para sul. Para além desta diferença, na simulação com o WRF as velocidades tendem a ser mais elevadas mesmo nas zonas afastadas da central termoelétrica.

Em relação aos resultados da temperatura, nas áreas mais afastadas da zona de influencia da pluma térmica da central termoelétrica há pouca variação entre a simulação com o MM5 (Figura 4.31) e a simulação com o WRF (Figura 4.32). No entanto, há diferenças significativas no comportamento da pluma térmica. Às 09:00h a zona de influência da pluma térmica atinge o porto de Sines na simulação com o MM5 enquanto que na com o WRF não. Às 15:00h e às 18:00h a pluma térmica propaga-se para sul na simulação com o MM5 enquanto que na com o WRF propaga-se para sudeste, seguindo a linha da costa. Estas diferenças devem-se às diferenças existentes nos campos de velocidades.

Os resultados das velocidades dos modelos atmosféricos utilizados nestas simulações apresentam direções semelhantes na maioria das situações. Porém, em várias ocasiões as velocidades atmosféricas do modelo WRF apresentam valores mais elevados do que os do MM5. Aliando isto ao facto da utilização do modelo WRF possibilitar a ativação do algoritmo COARE 3.0 é possível explicar as diferenças entre as simulações.

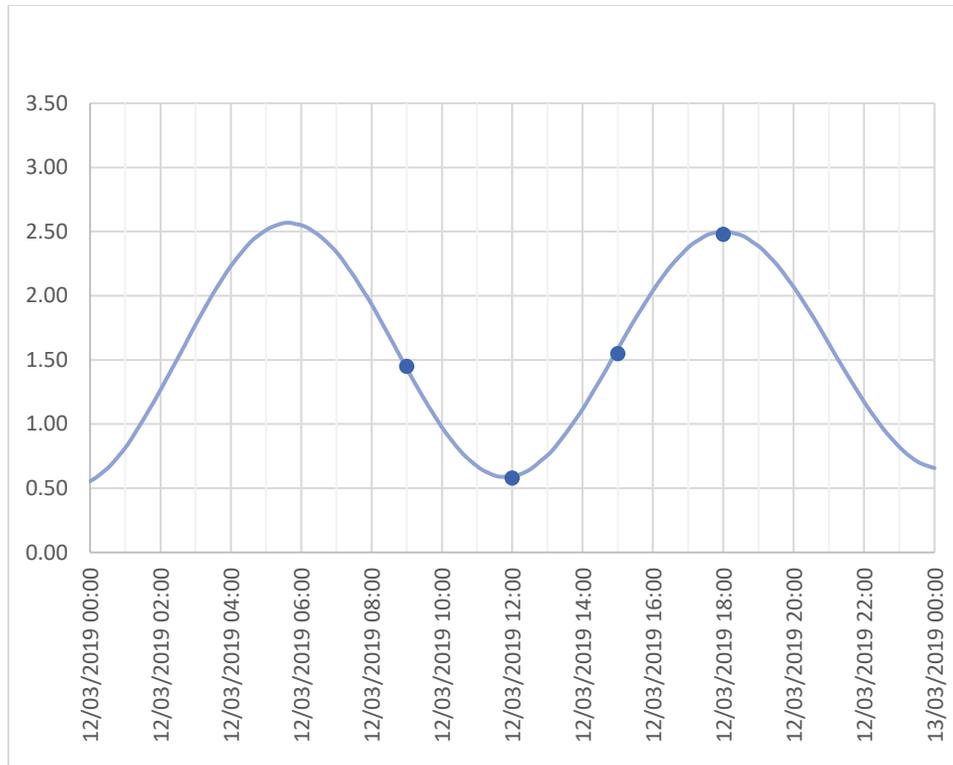


Figura 4.28. Campanha 3 – Resultados do nível da água do modelo ao longo do dia 12/03/2019 e instantes escolhidos para os mapas de resultados.

Modelo c/ MM5
12/03/2019

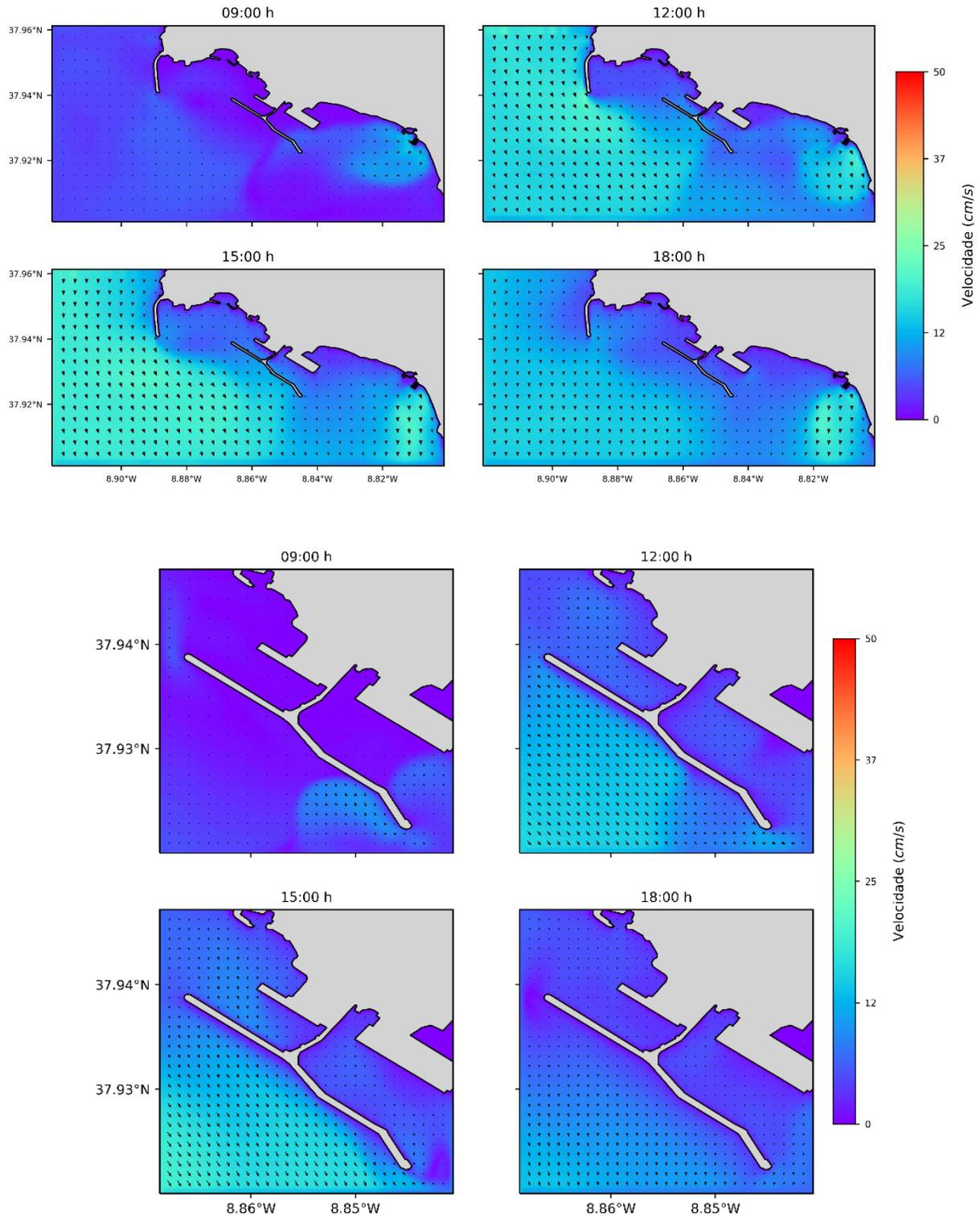


Figura 4.29. Campanha 3 – Mapa de resultados das velocidades para os domínios 4 e 5, utilizando condições de fronteira atmosférica do modelo MM5.

Modelo c/ WRF
12/03/2019

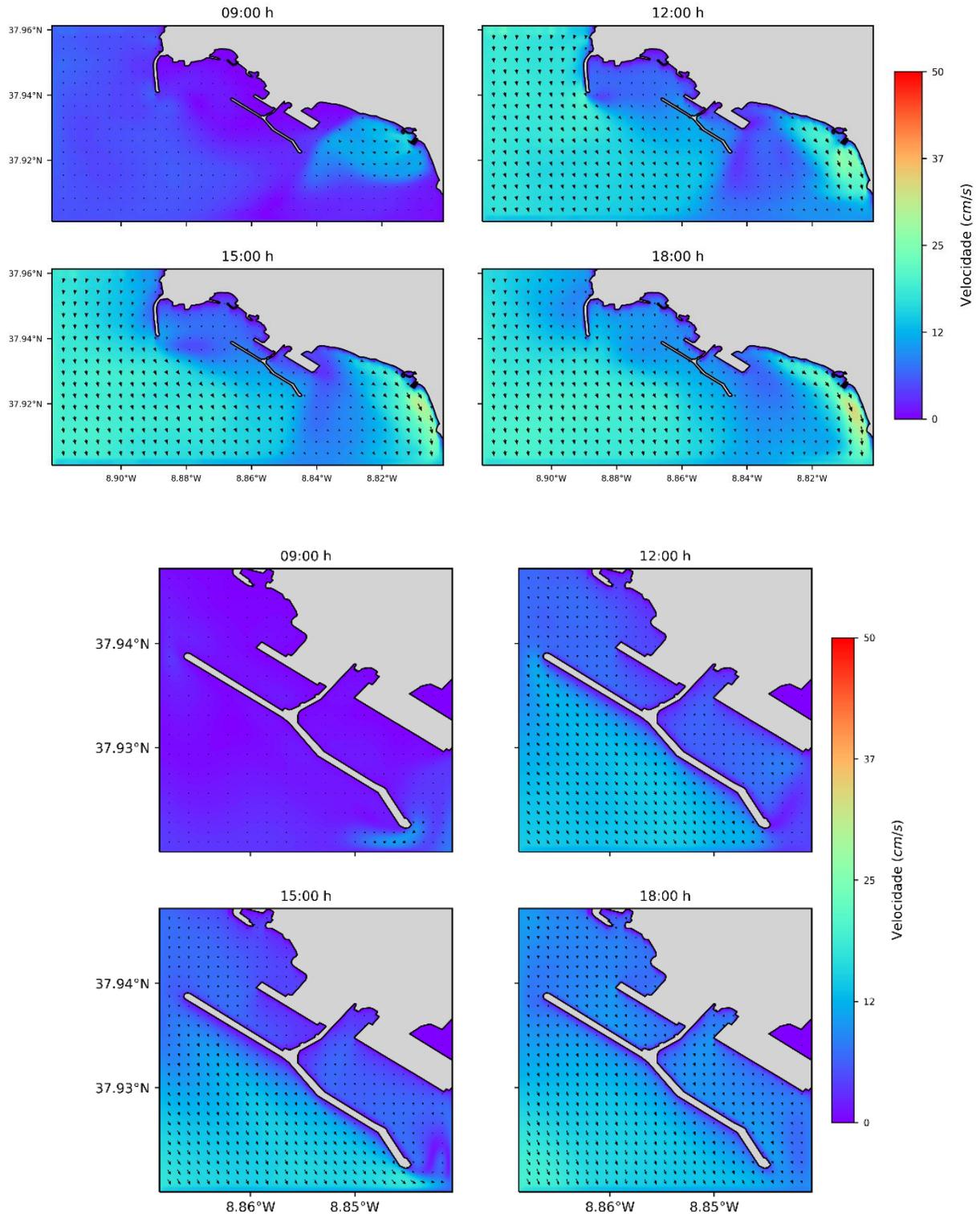


Figura 4.30. Campanha 3 – Mapa de resultados das velocidades para os domínios 4 e 5, utilizando condições de fronteira atmosférica do modelo WRF.

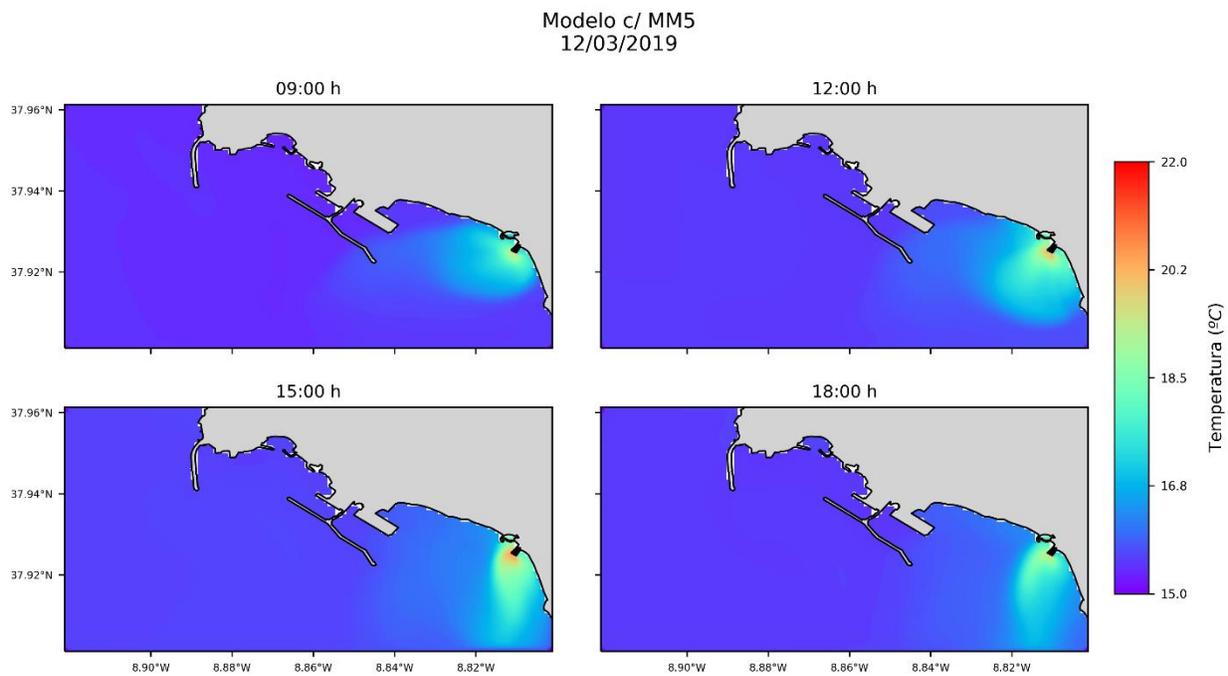


Figura 4.31. Campanha 3 – Mapa de resultados da temperatura para os domínios 4 e 5, utilizando condições de fronteira atmosférica do modelo MM5.

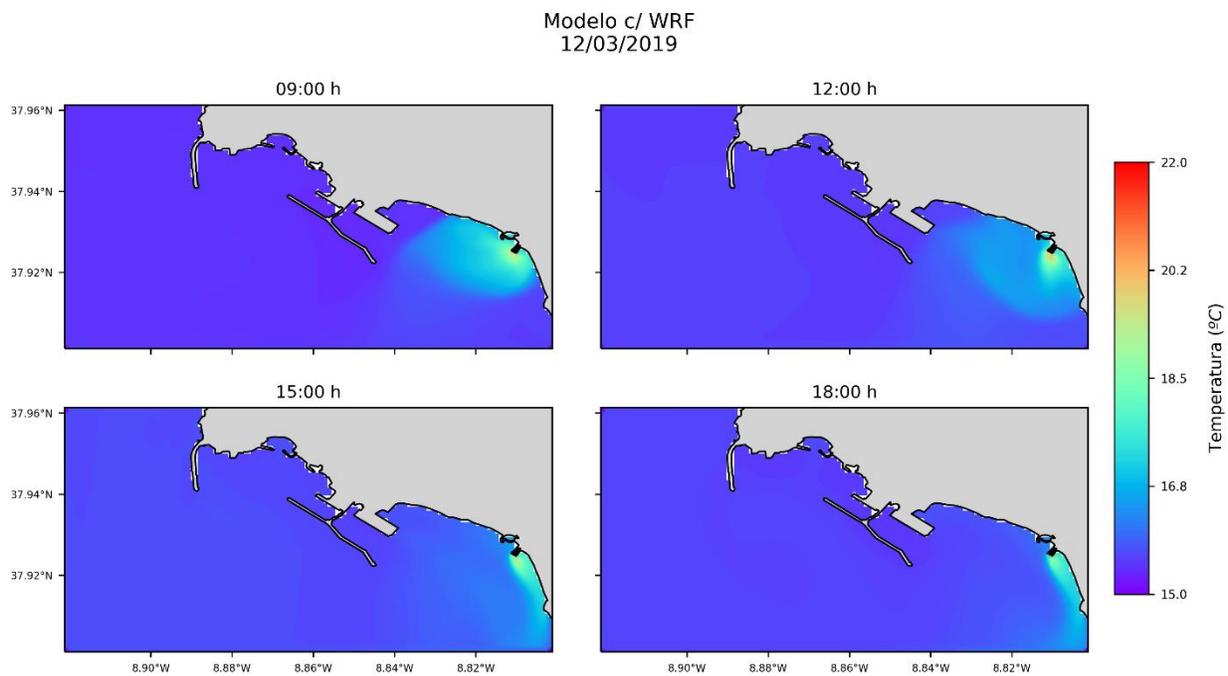


Figura 4.32. Campanha 3 – Mapa de resultados da temperatura para os domínios 4 e 5, utilizando condições de fronteira atmosférica do modelo WRF.

4.4.4. Campanha 4 – 30/04/2019

São aqui apresentados mapas de resultados à superfície, para o dia da quarta campanha, dia 30 de abril de 2019. Os resultados são de uma simulação com o modelo de Sines utilizando condições de fronteira do modelo PCOMS e do modelo WR. Os resultados da maré e os instantes temporais escolhidos são apresentados na Figura 4.33.

Analisando os mapas de resultados das velocidades (Figura 4.34), as correntes neste dia são predominantes de norte com velocidades de até 30 cm/s. À semelhança da campanha 3, perto da linha de costa e da central termoelétrica há uma corrente com velocidades elevadas que segue a linha de costa e transporta a água para sudeste.

Quanto aos resultados da temperatura (Figura 4.35), durante este dia a pluma térmica é rapidamente dispersa e misturada, nunca chegando à zona porto de Sines, devido às velocidades elevadas que a transportem sudeste e para longe da recolha de água da central termoelétrica.

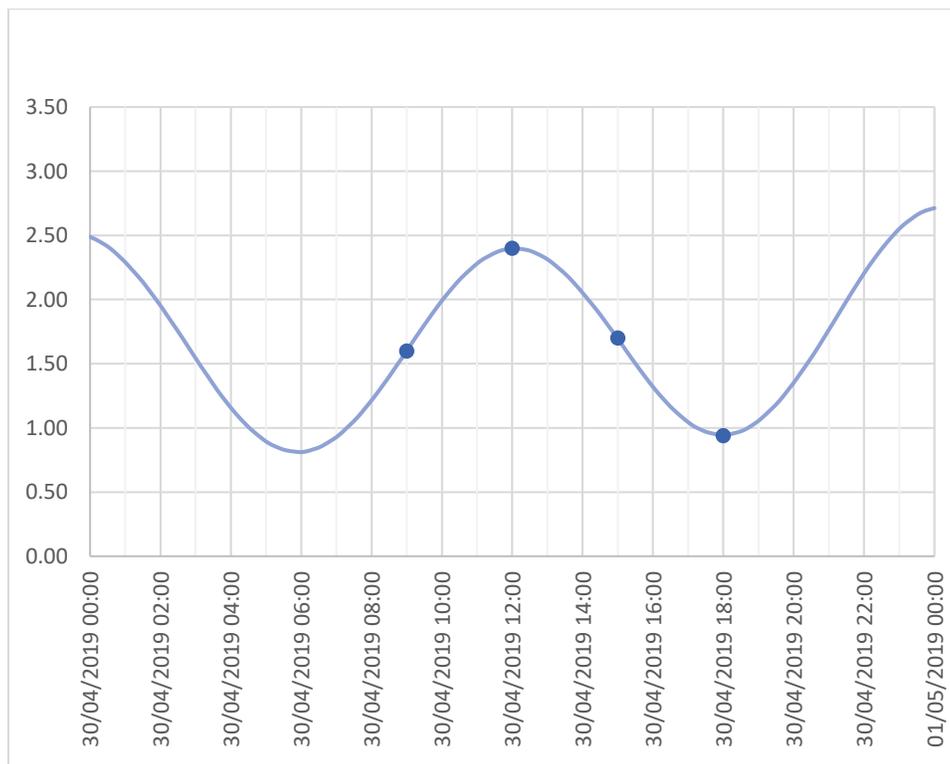


Figura 4.33. Campanha 4 – Resultados do nível da água do modelo ao longo do dia 30/04/2019 e instantes escolhidos para os mapas de resultados.

30/04/2019

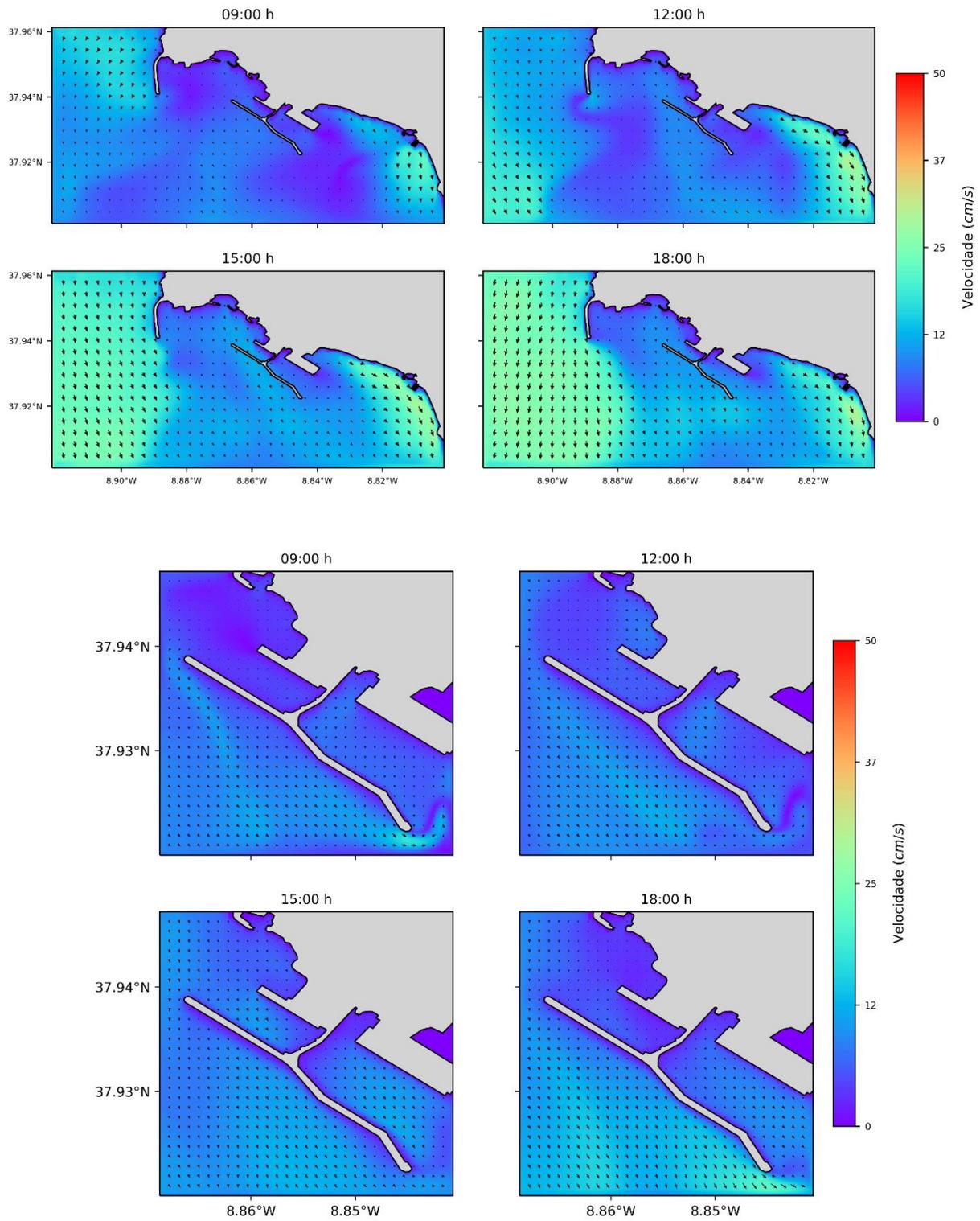


Figura 4.34. Campanha 4 – Mapa de resultados das velocidades para os domínios 4 e 5.

30/04/2019

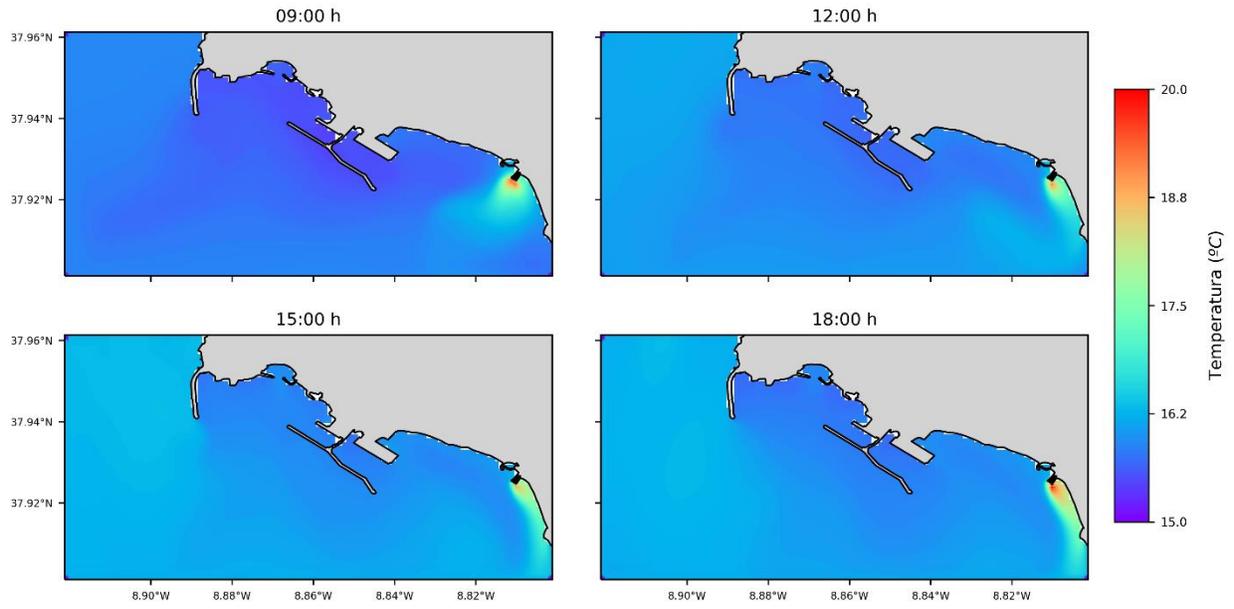


Figura 4.35. Campanha 4 – Mapa de resultados da temperatura para os domínios 4 e 5.

5. Conclusões

Com o trabalho realizado nesta dissertação pretendeu-se implementar e validar um modelo hidrodinâmico no porto de Sines, com uma resolução espacial elevada, utilizando o sistema de modelação MOHID. Este modelo simularia também a descarga da central termoelétrica de Sines e a permeabilidade do pontão presente no terminal de contentores do porto de Sines.

A utilização da metodologia de *downscaling* permitiu a utilização de condições de fronteira de um modelo operacional regional de larga escala, o modelo PCOMS. Esta metodologia permite ainda a implementação de vários domínios encaixados, possibilitando atingir-se uma resolução suficientemente elevada para se representar a dispersão da pluma térmica e para se representar o pontão do terminal de contentores. Em trabalhos futuros, possibilitará também a representação e modelação da atividade dos peixes nas jaulas de aquicultura.

Durante a calibração do modelo concluiu-se que a modelação da permeabilidade do pontão por atribuição de um coeficiente de atrito às células representantes do pontão tem o efeito desejado de redução da passagem de água pelo mesmo e notam-se resultados mais próximos da realidade que no cenário em que o pontão se mostra completamente sólido. No entanto, o modelo pode beneficiar de um estudo mais aprofundado ao pontão visto se estar a definir uma permeabilidade constante em toda a sua extensão quando na realidade podem existir variações na permeabilidade, principalmente verticalmente.

Tendo como base as comparações do modelo e as observações de velocidades, nível do mar, temperatura, salinidade e densidade das campanhas feitas durante o projeto PiscisMod e dos dados do Instituto Hidrográfico, o modelo local produzido revelou a capacidade de simular as condições locais de forma realista.

Durante a validação do modelo nota-se uma desvantagem na metodologia de *downscaling*. O modelo depende das condições de fronteira para poder realizar as suas simulações e estas condicionam fortemente os resultados do modelo. A utilização de condições de fronteira de um modelo significa que qualquer erro existente nesse modelo regional passará para o modelo local e afetará negativamente os resultados, como decorreu durante a campanha 2. A correção deste erro apenas é possível com alterações no modelo que serve como condição de fronteira ou com a substituição das condições de fronteira por outro modelo, que se saiba estar mais correto.

A utilização do modelo atmosférico WRF com o algoritmo COARE 3.0 representou uma aproximação do modelo à realidade na situação em que foi analisada. Este era o resultado esperado visto este modelo

apresentar uma resolução espacial mais elevada e o algoritmo COARE 3.0 calcular as trocas na interface de uma forma mais precisa.

Nos cenários com predominância de ventos de sul, a pluma térmica é transportada nesse sentido, enquanto que nos cenários de ventos de norte a pluma térmica é transportada para norte. Com o transporte da pluma para norte esta pode ficar aprisionada no porto de Sines, aumentando a temperatura da água na zona de aquicultura.

Este trabalho terá continuidade no âmbito do projeto PiscisMod. Futuramente, será implementada e validada a qualidade da água no modelo de Sines com as condições de fronteira existente no PCOMS. Com a modelação hidrodinâmica e da qualidade da água validada será implementada a modelação bioenergética dos peixes utilizando a teoria *Dynamic Energy Budget* (DEB) (Nisbet et al. 2012). Com a integração destes modelos, será possível procurar a otimização da dieta dos peixes tendo em conta a energia que necessitam para o seu crescimento, para as funções orgânicas e para combater as condições do meio envolvente, como a temperatura e a velocidade da água.

O trabalho apresentado nesta dissertação, até à data, deu origem a um *proceeding paper* e uma apresentação, dia 12 de junho de 2019, na *International Conference on Computational Science – 2019*, em Faro, e uma apresentação no dia 16 de Maio de 2019 no IX Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, em Lisboa.

6. Bibliografia

- APA. (2018). “Produção em aquicultura | Relatório do Estado do Ambiente.” <<https://rea.apambiente.pt/content/produção-em-aquicultura>> (Apr. 26, 2019).
- Arakawa, A. (1966). “Computational design for long-term numerical integration of the equations of fluid motion: Two-dimensional incompressible flow. Part 1.” *Journal of Computational Physics*, 1(122), 119–143.
- Ascione Kenov, I., Garcia, A. C., and Neves, R. (2012). “Residence time of water in the Mondego estuary (Portugal).” *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Elsevier Ltd, 106, 13–22.
- Barange, M., Merino, G., Blanchard, J. L., Scholtens, J., Harle, J., Allison, E. H., Allen, J. I., Holt, J., and Jennings, S. (2014). “Impacts of climate change on marine ecosystem production in societies dependent on fisheries.” *Nature Climate Change*, 4(3), 211–216.
- Beckers, J. M. (1991). “Application of the GHER 3D general circulation model to the Western Mediterranean.” *Journal of Marine Systems*, 1(4), 315–332.
- Blumberg, A. F., and Mellor, G. L. (1987). “A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model.” 1–16.
- Braunschweig, F., Leitão, P. C., Fernandes, L., Pina, P., and Neves, R. J. J. (2004). “The object-oriented design of the integrated water modelling system MOHID.” *Computational Methods in Water Resources International Conference, Chapel Hill, North Carolina, USA*, 1079–1090.
- Burchard, H., Bolding, K., and Villarreal, M. R. (1999). “GOTM, a general ocean turbulence model: theory, implementation and test cases.” *Space Applications Institute*.
- Câmara Municipal de Sines. (2019). “Potencialidades.” <<http://www.sines.pt/pages/755>> (Mar. 7, 2019).
- Campuzano, F. J., Juliano, M., Fernandes, R., Pinto, L., and Neves, R. (2013). “Downscaling From the Deep Ocean To the Estuarine Intertidal Areas: an Operational Framework for the Portuguese Exclusive Economic Zone.” *6th SCACR – International Short Course/Conference on Applied Coastal Research Figure*, 1–9.
- Canuto, V. M., Howard, A. M., Cheng, Y., and Dubovikov, M. S. (2001). “Ocean Turbulence. Part I: One-Point Closure Model—Momentum and Heat Vertical Diffusivities.” *Journal of Physical Oceanography*, 31(6), 1413–1426.
- Carr, M. H., Neigel, J. E., Estes, J. A., Andelman, S., Warner, R. R., and Largier, J. L. (2003). “Comparing Marine and Terrestrial Ecosystems: Implications for the Design of Coastal Marine Reserves.” 13(1), 90–107.

- Crossland, C. J., Baird, D., Ducrotoy, J., Lindeboom, H., Buddemeier, R. W., Dennison, W. C., Maxwell, B. A., Smith, S. V, and Swaney, D. P. (2004). "The Coastal Zone – a Domain of Global Interactions." *Coastal Fluxes in the Anthropocene*.
- DGRM. (2014). *Plano Estratégico para a Aquicultura Portuguesa 2014 - 2020*.
- EDP. (2017). *Atualização da Declaração Ambiental 2016 Central Termoelétrica de Sines*.
- EMODnet. (2016). "Bathymetry Portal." <<http://www.emodnet-bathymetry.eu/>> (Jan. 15, 2018).
- EMODnet. (2019). "Physics Portal." <<http://www.emodnet.eu/physics>> (Feb. 2, 2019).
- Fairall, C. W., Bradley, E. F., Hare, J. E., Grachev, A. A., and Edson, J. B. (2003). "Bulk parameterization of air-sea fluxes: Updates and verification for the COARE algorithm." *Journal of Climate*, 16(4), 571–591.
- FAO. (2014). *The State of World Fisheries and Aquaculture - 2014*.
- FAO. (2018). *The State of World Fisheries and Aquaculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Fernandes, R., Braunschweig, F., and Neves, R. (2016). "Combining operational models and data into a dynamic vessel risk." 285–317.
- Flather, R. A. (1976). "A tidal model of the northwest European continental shelf." *Memoires Societe Royale des Sciences de Liege*, 10(6), 141–164.
- Fofonoff, N. P. (1985). "Physical properties of seawater: A new salinity scale and equation of state for seawater." *Journal of Geophysical Research*, 90(C2), 3332–3342.
- Fofonoff, N. P., and Millard Jr, R. C. (1983). "Algorithms for the computation of fundamental properties of seawater." *UNESCO Technical Papers in Marine Sciences*; 44.
- Franz, G., Delpy, T. M., Brito, D., Neves, R., Leitão, P., and Pinto, L. (2017). "Modelling of sediment transport and morphological evolution under the combined action of waves and currents." *Ocean Science*, 13(5), 673–690.
- Halpern, B. S., Walbridge, S., Selkoe, K. A., Kappel, C. V., Micheli, F., D'Agrosa, C., Bruno, J. F., Casey, K. S., Ebert, C., Fox, H. E., Fujita, R., Heinemann, D., Lenihan, H. S., Madin, E. M. P., Perry, M. T., Selig, E. R., Spalding, M., Steneck, R., and Watson, R. (2008). "A Global Map of Human Impact on Marine Ecosystems." 319(February), 948–953.
- Hanson, S., Ranger, N., Nicholls, R., Herweijer, C., Hallegatte, S., Chateau, J., and Corfee-Morlot, J. (2010). "A global ranking of port cities with high exposure to climate extremes." *Climatic Change*, 104(1), 89–111.
- Heaps, N. S. (1969). "A Two-Dimensional Numerical Sea Model." *Philosophical Transactions of the Royal*

- Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 265(1160), 93–137.
- Hugo, G. (2011). “Future demographic change and its interactions with migration and climate change.” *Global Environmental Change*, Elsevier Ltd, 21(SUPPL. 1), S21–S33.
- INE. (2018). *Estatísticas de Pesca - 2017*.
- Instituto Hidrográfico. (2019). “Rede de Boias.” <<http://www.hidrografico.pt/boias>>.
- Launder, B. E., Reece, G. J., and Rodi, W. (1975). “Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure.” *Journal of Fluid Mechanics*, 68(3), 537–566.
- Leendertse, J. J. (1967). “Aspects of a Computational Model for Long- Period Water–Wave Propagation.” *Rand Corporation*, Memorandum(Santa Monica), 165.
- Leitão, P. (2002). “Integração de Escalas e de Processos na Modelação do Ambiente Marinho.” Instituto Superior Técnico.
- Leitão, P., Coelho, H., Santos, A., and Neves, R. (2005). “Modelling the main features of the Algarve coastal circulation during July 2004: A downscaling approach.” *Journal of Atmospheric & Ocean Science*, 10(4), 421–462.
- Leonard, B. P. (1979). “A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation.” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 19(1), 59–98.
- Lewison, R., Hobday, A. J., Maxwell, S., Hazen, E., Hartog, J. R., Daniel, C., Briscoe, D., Fossette, S., Keefe, C. E. O., Barnes, M., Abecassis, M., Bograd, S., Bethoney, N. D., Bailey, H., Wiley, D., Andrews, S., Hazen, L., and Crowder, L. B. (2015). “Dynamic Ocean Management: Identifying the Critical Ingredients of Dynamic Approaches to Ocean Resource Management.” 65(5), 486–498.
- MARETEC. (2012). *Descrição do MOHID*. (E. Editora, ed.), Instituto Superior Técnico.
- Martins, F. A., Neves, R. J., and Leitão, P. C. (1998). “A three-dimensional hydrodynamic model with generic vertical coordinate.” *In Hydro-informatics 98*, (Bryan), 1403–1410.
- Martins, F., Leitão, P. C., Silva, A., and Neves, R. (2001). “3D modelling in the Sado estuary using a new generic vertical discretization approach.” *Oceanologica Acta*, 24, 51–62.
- Martinsen, E. A., and Engedahl, H. (1987). “Implementation and Testing of a Lateral Boundary Scheme as an Open Boundary Condition in a Barotropic Ocean Model.” 11, 603–627.
- Mateus, M., Riflet, G., Chambel, P., Fernandes, L., Fernandes, R., Juliano, M., Campuzano, F., De Pablo, H., and Neves, R. (2012). “An operational model for the West Iberian coast: Products and services.” *Ocean Science*, 8(4), 713–732.
- Maxwell, S. M., Hazen, E. L., Lewison, R. L., Dunn, D. C., Bailey, H., Bograd, S. J., Briscoe, D. K., Fossette, S., Hobday, A. J., Bennett, M., Benson, S., Caldwell, M. R., Costa, D. P., Dewar, H., Eguchi, T.,

- Hazen, L., Kohin, S., Sippel, T., and Crowder, L. B. (2015). "Dynamic ocean management: Defining and conceptualizing real-time management of the ocean." 58, 42–50.
- MOHID. (2009). "Modules." <<http://wiki.mohid.com/index.php?title=Modules>> (Feb. 10, 2019).
- MOHID. (2012). "Boxes." <<http://wiki.mohid.com/index.php?title=Boxes>> (Feb. 13, 2019).
- MOHID. (2018). "Module Hydrodynamic - Hydrodynamic Obstacle." <http://wiki.mohid.com/index.php?title=Module_Hydrodynamic#Hydrodynamic_Obstacle> (Feb. 10, 2019).
- Neumann, B., Vafeidis, A. T., Zimmermann, J., and Nicholls, R. J. (2015). "Future coastal population growth and exposure to sea-level rise and coastal flooding - A global assessment." *PLoS ONE*, 10(3).
- Neves, R. J. J. (1985). "Étude expérimentale et modélisation des circulations transitoire et résiduelle dans l'estuaire du Sado." Univ. Liège.
- Neves, R., Silva, A., Delfino, J., Leitão, P., Leitão, J., Pina, P., Braunschweig, F., Miranda, R., and Coelho, H. (2000). "Coastal management supported by modelling: optimising the level of treatment of urban discharges into coastal waters." *Conference Paper in Environmental Coastal III. Las Palmas, Canary Islands.*, (45), 39.
- Nisbet, R. M., Jusup, M., Klanjscek, T., and Pecquerie, L. (2012). "Integrating dynamic energy budget (DEB) theory with traditional bioenergetic models." *Journal of Experimental Biology*, 215(6), 892–902.
- OpenStreetMapData. (2018). "Land Polygons." <<http://openstreetmapdata.com/data/land-polygons>>.
- Pacanowski, R., Dixon, K., and Rosati, A. (1991). *The GFDL modular ocean model users guide. GFDL Ocean Group Tech. Rep.*
- PORDATA. (2011). "População residente segundo os Censos: total e por sexo." <<https://www.pordata.pt/Municipios/Popula%C3%A7%C3%A3o+residente+segundo+os+Censos+total+e+por+sexo-17>> (Mar. 7, 2019).
- Portela, L. (1996). "Modelação matemática de processos hidrodinâmicos e de qualidade de água no Estuário do Tejo." Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Porto de Sines. (2018). "Tabela de Marés de 2018." <<http://www.portodesines.pt/media/2800/tabela-de-mar%C3%A9s-porto-de-sines-2018.pdf>>.
- Porto de Sines. (2019a). "O Porto." *APS - Administração dos Portos de Sines e do Algarve, S. A.*, <<http://www.portodesines.pt/o-porto/>> (Mar. 7, 2019).
- Porto de Sines. (2019b). "Tabela de Marés de 2019." <http://www.portodesines.pt/media/3113/tabela-de-mar%C3%A9s-sines_2019.pdf>.
- Riflet, G., Reffray, G., Fernandes, R., Chambel, P., Nogueira, J., and Neves, R. (2010). "Downscaling large-

- scale Ocean-basin solutions in coastal tri-dimensional hydrodynamical models." 171(June), 171–200.
- Roe, P. (1986). "Characteristic-Based Schemes for the Euler Equations." *Annual Review of Fluid Mechanics*, 18(1), 337–365.
- Salgueiro, D. V., Pablo, H. de, Neves, R., and Mateus, M. (2015). "Modelling the thermal effluent of a near coast power plant (Sines, Portugal)." *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 15(4), 533–544.
- Santos, A. J. (1995). "Modelo Hidrodinâmico Tridimensional de Circulação Oceânica e Estuarina." Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Silva, A. J. R. (1991). "Modelação Matemática Não Linear de Ondas de Superfície e de Correntes Litorais." Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Small, C., and Nicholls, R. J. (2003). "A Global Analysis of Human Settlement in Coastal Zones." *Journal of Coastal Research*, 19(3), 584–599.
- Di Toro, D. M., Fitzpatrick, J. J., and Thomann, R. V. (1983). *Documentation for water quality analysis simulation program (WASP) and model verification program (MVP)*.
- Trancoso, A. R., Saraiva, S., Fernandes, L., Pina, P., Leitão, P., and Neves, R. (2005). "Modelling macroalgae using a 3D hydrodynamic-ecological model in a shallow, temperate estuary." *Ecological Modelling*, 187(2–3), 232–246.

Anexo A

Tabela A.1. Camadas utilizadas em cada domínio e as respectivas profundidades. De 1 a 7 são camadas sigma e da 8 à 50 são camadas cartesianas.

# Camada	Profundidade de cada camada (m)				
	Domínio 1 (PCOMS)	Domínio 2	Domínio 3	Domínio 4	Domínio 5
1 a 7	8.68	8.68	8.68	8.68	8.68
8	1.78	1.78	1.78	1.78	1.78
9	1.89	1.89	1.89	1.89	1.89
10	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23
11	2.46	2.46	2.46	2.46	2.46
12	2.91	2.91	2.91	2.91	2.91
13	3.29	3.29	3.29	3.29	3.29
14	3.94	3.94	3.94	3.94	3.94
15	4.52	4.52	4.52	4.52	4.52
16	5.46	5.46	5.46	5.46	5.46
17	6.36	6.36	6.36	6.36	6.36
18	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7
19	9.08	9.08	9.08	9.08	9.08
20	11.01	11.01	11.01	11.01	11.01
21	13.08	13.08	13.08	13.08	13.08
22	15.87	15.87	15.87	15.87	15.87
23	18.93	18.93	18.93	18.93	18.93
24	22.95	22.95	22.95	22.95	22.95
25	27.42	27.42	27.42	27.42	27.42
26	33.13	33.13	33.13	33.13	33.13
27	39.57	39.57	39.57	39.57	39.57
28	47.56	47.56	47.56	47.56	47.56
29	56.61	56.61	56.61	56.61	56.61
30	67.56	67.56	67.56	67.56	67.56
31	79.89	79.89	79.89	79.89	79.89
32	94.41	94.41	94.41	94.41	94.41
33	110.55	110.55	110.55	110.55	110.55
34	128.98	128.98	128.98	128.98	128.98
35	149.03	149.03	149.03	149.03	149.03
36	171.17	171.17	171.17	171.17	171.17
37	194.54	194.54	194.54	194.54	194.54
38	219.38	219.38	219.38	219.38	219.38
39	244.68	244.68	244.68	244.68	244.68
40	270.54	270.54	270.54	270.54	270.54
41	295.83	295.83	295.83	295.83	295.83
42	320.69	320.69	320.69	320.69	320.69
43	344.04	344.04	344.04	344.04	344.04
44	366.20	366.20	366.20	366.20	366.20
45	386.22	386.22	386.22	386.22	386.22
46	404.68	404.68	404.68	404.68	404.68
47	420.80	420.80	420.80	420.80	420.80
48	435.34	435.34	435.34	435.34	435.34
49	447.64	447.64	447.64	447.64	447.64
50	458.63	458.63	458.63	458.63	458.63

Anexo B

```
import numpy as np
from scipy import interpolate, stats
from math import sqrt

def statistics_indicators(arr_obs, arr_mod):
    """
    Recives 2 numpy arrays with the property value in the
    first column and the depth in the second column.
    Returns statistical indicators.
    """

    # interpolation of values
    interp_obs = []
    n = 1
    for depth in arr_obs[:,1]:
        while True:
            if depth < arr_mod[-1,1]:
                # if there's obs values in depths deeper than
                # mod values then the mod values are
                # extrapolated instead of interpolated
                value = arr_mod[-2,0] + (depth-arr_mod[-2,1]) * \
                    (arr_mod[-2,0]-arr_mod[n,0])/(arr_mod[n-1,1]-arr_mod[n,1])
                interp_obs.append(value)
                break
            elif arr_mod[n-1,1] >= depth >= arr_mod[n,1]:
                # interpolation, if obs and mod values are at
                # the same depth the interpolation result will
                # be the same so no extra if is needed
                value = arr_mod[n-1,0] + (depth-arr_mod[n-1,1]) * \
                    (arr_mod[n-1,0]-arr_mod[n,0])/(arr_mod[n-1,1]-arr_mod[n,1])
                interp_obs.append(value)
                break
            elif depth < arr_mod[n,1]:
                # increases depth until interpolation or extrapolation is done
                n += 1

    # calculates RMSE, BE and Pearson:
    RMSE = 0
    max_error = 0
    for n in range(0,len(interp_obs)):
        sqr_error = (interp_obs[n]- arr_obs[n,0])**2
```

```

    max_error = sqrt(sqr_error) if sqrt(sqr_error) > max_error else max_error
    RMSE += sqr_error
RMSE = sqrt(RMSE / len(interp_obs))
BE = np.mean(interp_obs) - np.mean(arr_obs[:,0])
pearson, p_value = stats.pearsonr(interp_obs, arr_obs[:,0])

return RMSE, BE, pearson, max_error

```

```
def EOS_80(temperature, salinity, pressure):
```

```

t = temperature
s = salinity
p = pressure

```

```

A = + 999.842594 \
    + 6.793952E-2*t**1 \
    - 9.095290E-3*t**2 \
    + 1.001685E-4*t**3 \
    - 1.120083E-6*t**4 \
    + 6.536332E-9*t**5

```

```

B = + 8.24493E-1 \
    - 4.0899E-3*t**1 \
    + 7.6438E-5*t**2 \
    - 8.2467E-7*t**3 \
    + 5.3875E-9*t**4

```

```

C = - 5.72466E-3 \
    + 1.0227E-4*t**1 \
    - 1.6546E-6*t**2

```

```
D = + 4.8314E-4
```

```

E = + 19652.21 \
    + 148.4206*t**1 \
    - 2.327105*t**2 \
    + 1.360477E-2*t**3 \
    - 5.155288E-5*t**4

```

```

F = + 54.6746 \
    - 0.603459*t**1 \
    + 1.09987E-2*t**2 \
    - 6.1670E-5*t**3

```

```

G = + 7.944E-2 \
    + 1.6483E-2*t**1 \
    - 5.3009E-4*t**2

H = + 3.239908 \
    + 1.43713E-3*t**1 \
    + 1.16092E-4*t**2 \
    - 5.77905E-7*t**3

I = + 2.2838E-3 \
    - 1.0981E-5*t**1 \
    - 1.6078E-6*t**2

J = + 1.91075E-4

M = + 8.50935E-5 \
    - 6.12293E-6*t**1 \
    + 5.2787E-8*t**2

N = - 9.348E-7 \
    + 2.0816E-8*t**1 \
    + 9.1697E-10*t**2

rho_St0 = A + B*s + C*s**(3/2) + D*s**2

V_St0 = 1 / rho_St0

K_Stp = E + F*s + G*s**(3/2) \
    + ( H + I*s + J*s**(3/2) ) * p \
    + ( M + N*s ) * p**2

V_Stp = V_St0 * ( 1 - p/K_Stp )

rho_Stp = 1 / V_Stp

return rho_Stp

```