

Modelação do efeito da pluma térmica da Central Termoelétrica de Sines no ambiente marinho

Dora Patrícia Valente Salgueiro

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia do Ambiente

Orientadores: Professor Doutor Marcos Duarte Mateus / Professor Doutor Ramiro Joaquim de Jesus Neves

Júri

Presidente: Professor Doutor António Jorge Gonçalves de Sousa

Orientador: Professor Doutor Marcos Duarte Mateus

Vogal: Doutor Paulo Miguel Chambel Filipe Lopes Leitão

Vogal: Mestre Hilda de Pablo Leonardo

Junho de 2014

Agradecimentos

Várias pessoas foram importantes para que eu conseguisse realizar este trabalho, e por isso quero deixar aqui o meu enorme agradecimento.

Ao professor Marcos Mateus agradeço a oportunidade de realizar a tese no grupo de investigação MARETEC, o que facilitou em muito o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço ainda toda a ajuda e o tempo disponibilizado no acompanhamento deste trabalho. Pelas sugestões e pelo conhecimento transmitido agradeço também ao professor Ramiro Neves.

À Hilda agradeço a maneira como me integrou no grupo e o imenso apoio que me deu, fundamentais para a execução deste trabalho. Muito obrigada pelas inúmeras horas disponibilizadas e por todo o apoio, palavras de ânimo e incentivo, especialmente nas alturas de maior dificuldade.

Agradeço também a todo o grupo MARETEC a forma como me recebeu. Obrigada pelas horas que disponibilizaram para me ajudarem na minha iniciação ao MOHID, na resolução dos erros e obrigada pelos conselhos e boa disposição.

À minha mãe, Lena, agradeço o esforço enorme que fez para que eu chegasse até aqui e o constante carinho e apoio. À minha irmã, Ana, agradeço também todas as palavras de carinho e apoio. Peço desculpa pela minha ausência e agradeço imenso o vosso apoio que me deu sempre muita força. Ao meu pai, Francisco, onde quer que ele esteja espero que me possa ver e que tenha orgulho em mim. Agradeço ainda aos meus avós, aos meus tios e aos meus primos por todo o apoio.

Aos amigos que fiz na residência agradeço terem facilitado, e muito, a minha adaptação numa cidade onde tudo era novo para mim. Agradeço também aos amigos que fiz no curso, com quem passei bons momentos, algumas diretas e momentos de angústia, que passavam num instante com a vossa boa disposição. Um obrigado especial à Joana, à Cláudia, à Inês, à Maria, à Ana e ao Bruno.

Ao Daniel obrigada pelo apoio incondicional que foi mesmo muito importante nesta fase da minha vida. Obrigada pela compreensão, pela paciência e por toda a ajuda e incentivo. Agradeço ainda a toda a família do Daniel por todo o apoio. Um obrigado especial ao pai e à mãe do Daniel pelos conselhos e pelo carinho.

Resumo

A central termoelétrica de Sines, localizada na costa oeste de Portugal, utiliza em média 40 m³/s de água do oceano Atlântico para o processo de refrigeração, necessário à produção de energia elétrica. Depois de usada nos condensadores, a água de refrigeração é novamente restituída à fonte com uma temperatura de 10°C acima daquela que tinha na captação.

As condições da descarga deste efluente, em canais, originam uma pluma que irá dispersar e misturar-se no meio dependendo das condições desse meio. O aumento de temperatura no meio recetor e o desenvolvimento de massas de água com diferentes densidades poderá ter efeitos físicos, químicos e biológicos podendo afetar a dinâmica do meio. A licença ambiental em vigor para o funcionamento da central define que, a 30 metros medidos a jusante da descarga, o aumento de temperatura no meio não pode ultrapassar os 3°C.

Com este trabalho tem-se como principal objetivo estudar, através de modelação matemática, a hidrodinâmica da pluma térmica originada pela descarga de efluente térmico, sob diferentes condições. Através de um cenário de referência, serão ainda analisados os principais efeitos da água de refrigeração na dinâmica da região. Pretende-se ainda perceber se, nos diferentes cenários, são cumpridos os limites legais impostos ao funcionamento da central. Para tal, recorre-se à modelação do sistema costeiro em análise, usando como ferramenta o modelo numérico MOHID, seguindo a metodologia de modelos encaixados.

Os resultados mostram que os principais efeitos da descarga do efluente térmico são a estratificação térmica do meio, com a formação de uma camada superficial de temperatura superior à temperatura do meio. O vento é o principal elemento a condicionar o transporte e a diluição da pluma térmica. Os cenários de ventos de quadrante sul originam manchas térmicas com áreas maiores e menos diluídas, os cenários de ventos de quadrante norte originam plumas mais alongadas e mais diluídas. Em nenhum dos cenários simulados é cumprido o valor limite de emissão. Na região abrangida pelos 30 metros, definidos na licença ambiental, a temperatura é sempre superior a 3 °C em relação à temperatura do meio.

Palavras-Chave: Hidrodinâmica Costeira; Pluma térmica; Modelação Matemática, MOHID

Abstract

The thermoelectric power plant established at the Sines complex, in the Portuguese west coast, intakes an yearly average of 40 m³/s of ocean water, due to cooling requirements for electricity production. After flowing through a condenser system, this cooling water is discharged on its original environment, the Atlantic Ocean, with a temperature increase of approximately 10°C relative to the intake.

The discharge structure for this effluent, a pair of open channels, creates a thermal plume that mixes and disperses in the receiving environment according to its hydrodynamic conditions. The temperature increase renders the natural environment prone to potential hazardous effects at physical, chemical and biological levels. The environmental license in use for the operation of the power plant imposes that, within a distance of 30 meters downstream of the discharge, the temperature increase must not be greater than 3°C.

The present work aimed at studying, through mathematical modeling, the hydrodynamics of the thermal plume streaming from the power plant at Sines during different hydrodynamic conditions. By employing a baseline scenario without the referred discharge, the main effects of the discharge on the natural hydrodynamics and thermal structure are quantified. The most relevant factors for mixing are identified and the conformity with the legal limits is analyzed. The modelling efforts were conducted using a downscaling methodology for configuring the MOHID numerical model.

The results show that the main effect of discharging the effluent on ocean waters is the thermal stratification, forming a superficial layer of warmer water relatively to the reference temperature of the receiving environment. The scenarios where south wind is present create wider and only slightly mixed thermal plumes, whereas with north wind the plumes are elongated and more mixed. None of the simulated scenarios has shown compliance with legal limits, with temperatures always above the 3°C clearance relative to the natural environment.

Key Words: Coastal Hydrodynamic; Thermal plume; Numerical modelling, MOHID

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo	ii
Abstract.....	iii
Lista de notações e siglas	x
Lista de símbolos.....	xi
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento geral	1
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Estrutura do documento	4
2 Descrição do caso de estudo.....	6
2.1 Central Termoelétrica de Sines	6
2.1.1 Localização.....	6
2.1.2 Funcionamento.....	7
2.2 Caraterização da área de estudo	9
2.2.1 Caracterização da meteorologia.....	10
2.2.2 Caracterização do meio recetor	14
3 Metodologia.....	19
3.1 Modelo matemático MOHID	19
3.1.1 Equações.....	20
3.2 Implementação do modelo	25
3.2.1 Batimetria e geometria vertical.....	26
3.2.2 Condições de fronteira	28
3.2.3 Implementação do circuito de refrigeração da Central- Captação e descarga de água.....	29
3.2.4 Simulações	30
3.3 Validação.....	31
3.4 Cenários	32
4 Resultados	34
4.1 Validação.....	34

4.2	Cenário de referência	39
4.2.1	Janeiro de 2013.....	40
4.2.2	Agosto de 2013.....	42
4.2.3	Outubro de 2013.....	44
4.2.4	Janeiro de 2014	46
4.3	Pluma térmica em perfil.....	48
4.3.1	Janeiro 2013	49
4.3.2	Agosto de 2013.....	52
4.3.3	Outubro de 2013.....	55
4.3.4	Janeiro 2014	58
4.4	Dispersão da pluma térmica.....	60
4.4.1	Janeiro de 2013	61
4.4.2	Agosto de 2013.....	62
4.4.3	Outubro de 2013.....	63
4.4.4	Janeiro de 2014	64
4.5	Influência da maré	66
4.6	Valor limite de emissão	69
5	Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	72
6	Referências Bibliográficas.....	75
	Anexos.....	I
	Anexo I Localização das estações de monitorização	I
	Anexo II Cálculo do índice de upwelling	II
	Anexo III: Validação da temperatura à superfície do modelo operacional PCOMS.....	III
	Anexo IV Camadas implementadas no modelo	IV

Índice de Figuras

Figura 1: <i>Upwelling</i> costeiro (US National Oceanic and Atmospheric Administration 2014)	3
Figura 2: Localização da Central Termoelétrica de Sines.	6
Figura 3: Infraestruturas de captação e rejeição do Sistema de refrigeração da Central Termoelétrica de Sines.....	7

Figura 4: Zona de estudo (à esquerda) e localização das infraestruturas existentes na região de estudo.	9
Figura 5 Valores médios e extremos (máximo e mínimo) de pressão atmosférica (hPa) medidos na estação sinótica de Sines Montes Chaos entre 2008 e 2013. Adaptado de Citizen Weather Observer Program (2014).	10
Figura 6 Valor médio da quantidade total de precipitação (mm) medido na estação meteorológica de Sines entre 1971 e 1990. Adaptado de Instituto de Meteorologia (2004a).	11
Figura 7 Valores médios e extremos mensais da temperatura do ar (°C) registados na estação meteorológica de Sines entre 1971 e 1990 Adaptado de Instituto de meteorologia (2004a).	11
Figura 8 Direção e intensidade do vento para o período de tempo entre 2008 e 2013, registados na estação Sines Montes Chaos. Adaptado de Citizen Weather Observer Program(2014).	12
Figura 9 Frequência dos ventos em % (à esquerda) e velocidades médias do vento em m/s (à direita), registados para cada quadrante entre 2008 e 2013, na estação Monte Chaos Sines. Adaptado de Citizen Weather Observer Program (2014).	12
Figura 10 Direção e intensidade do vento para o período de tempo entre 2008 e 2013, registados na estação Sines Montes Chaos, para as diferentes estações do ano.	13
Figura 11 Temperatura média mensal á superfície da água do mar, medida na boia de Sines no período de 2008 -2013.	14
Figura 12 Média mensal do índice de upwelling calculada para o período de tempo entre 1967 e 2013. Adaptado de Instituto Español de Oceanografía (2014).	15
Figura 13 Variação de temperatura ao longo da coluna na região de Sines.	16
Figura 14 Valores da altura significativa (m) média e dos extremos máximos e mínimo em cada mês, obtidos entre 2008 e 2013 para a boia ondógrafo de Sines.	17
Figura 15 Período das ondas (segundos) médio e os seus valores extremos máximo e mínimo em cada mês, obtidos entre 2008 e 2013 para a boia ondógrafo de Sines	17
Figura 16 Frequência da direção média de propagação registada entre 2008 e 2013 para a boia ondógrafo de Sines.	18
Figura 17 Caracterização da maré na região de Sines, entre abril e maio de 2013. Adaptado de Instituto Hidrográfico (2014b).	18
Figura 18 Domínio com 4 camadas cartesianas (à esquerda) e 4 camadas sigma (à direita).	20
Figura 19 Implementação dos modelos encaixados.	25
Figura 20 Batimetrias (em metros) dos quatro níveis encaixados implementados no modelo.	27
Figura 21 Geometria vertical aplicada na implementação do modelo (MARETEC 2014a).	28
Figura 22 Zona de tomada de água (à esquerda) e zonas de descarga (à direita).	30
Figura 23 Direção e intensidade do vento registados nos dias dos diferentes cenários. Adaptado de Citizen Weather Observer Program (2014).	33
Figura 24 Comparação dos resultados obtidos no modelo, para o nível 3, com as medições efetuadas <i>in situ</i> para os perfis de temperatura.	35

Figura 25 Comparação dos resultados obtidos no modelo, para o nível 4, com os registos da boia localizada no porto de Sines, para a temperatura superficial da água de 2 a 4 de Outubro.	36
Figura 26 Comparação dos resultados obtidos no modelo, para o nível 4, com os registos da boia localizada no porto de Sines, para o nível da água de 2 a 4 de Outubro de 2013.	37
Figura 27 Comparação entre os registos obtidos na monitorização, à região adjacente à descarga, com os resultados obtidos pelo modelo para os perfis de temperatura, no dia 4 de Setembro de 2012.	38
Figura 28 Distribuição de temperatura e do módulo da velocidade à superfície, no cenário de referência, no dia 5 de janeiro de 2013.	40
Figura 29 Perfis de temperatura (°C) no cenário de referência para o dia 5 de janeiro de 2013.	40
Figura 30 Distribuição de temperatura e do módulo da velocidade à superfície, no cenário de referência, no dia 6 de agosto de 2013.	42
Figura 31 Perfis de temperatura (°C) no cenário de referência para o dia 6 de agosto de 2013.	42
Figura 32 Distribuição de temperatura e do módulo da velocidade à superfície, no cenário de referência, no dia 4 de outubro de 2013.	44
Figura 33 Perfis de temperatura (°C) no cenário de referência para o dia 4 de outubro de 2013.	44
Figura 34 Distribuição de temperatura e do módulo da velocidade à superfície, no cenário de referência, no dia 26 de janeiro de 2014.	46
Figura 35 Perfis de temperatura (°C) no cenário de referência para o dia 26 de janeiro de 2014.	46
Figura 36 Distribuição de temperatura e do módulo da velocidade à superfície, no cenário com descarga de efluente térmico, no dia 5 de janeiro de 2013.	49
Figura 37 Perfis de temperatura (°C) no cenário com descarga de efluente térmico para o dia 5 de janeiro de 2013.	50
Figura 38 Distribuição de temperatura e do módulo da velocidade à superfície, no cenário com descarga de efluente térmico, no dia 6 de agosto 2013.	52
Figura 39 Perfis de temperatura (°C) no cenário com descarga de efluente térmico para o dia 6 de agosto de 2013.	52
Figura 40 Distribuição de temperatura e do módulo da velocidade à superfície no dia 4 de outubro de 2013, com descarga de efluente térmico.	55
Figura 41 Perfis de temperatura (°C) no cenário com descarga de efluente térmico para o dia 4 de outubro de 2013.	55
Figura 42 Distribuição de temperatura e do módulo da velocidade à superfície, no cenário com descarga de efluente térmico, no dia 26 de janeiro de 2014.	58
Figura 43 Perfis de temperatura (°C) no cenário com descarga de efluente térmico para o dia 26 de janeiro de 2014.	58
Figura 44 Dispersão à superfície da pluma térmica, para diferentes instantes de maré, em 5 de Janeiro de 2013.	61
Figura 45 Dispersão à superfície da pluma térmica, para diferentes instantes de maré, em 5 de Agosto de 2013.	62

Figura 46 Dispersão à superfície da pluma térmica em 4 de Outubro 2013	63
Figura 47 Dispersão à superfície da pluma térmica em 26 de Janeiro de 2014.....	64
Figura 48 Relação entre o nível de água do mar e a temperatura à superfície, na zona da descarga e numa zona sem influência da pluma térmica, em janeiro de 2013.	67
Figura 49 Relação entre o nível de água do mar e a temperatura à superfície, na zona da descarga e numa zona sem influência da pluma térmica, em agosto de 2013.	67
Figura 50 Relação entre o nível de água do mar e a temperatura à superfície, na zona da descarga e numa zona sem influência da pluma térmica, em outubro de 2013.....	67
Figura 51 Relação entre o nível de água do mar e a temperatura à superfície, na zona da descarga e numa zona sem influência da pluma térmica, em janeiro de 2014.	68
Figura 52 Localização do ponto de referência (R).	69
Figura 53 Séries de temperatura na zona da descarga numa, zona a 50 metros da descarga e série de temperatura 3°C acima da série na zona de referência (Tref + 3°C), em 4 e 5 de Janeiro de 2013.....	70
Figura 54 Séries de temperatura na zona da descarga numa, zona a 50 metros da descarga e série de temperatura 3°C acima da série na zona de referência (Tref + 3°C), em 4 e 5 de Agosto de 2013.	70
Figura 55 Séries de temperatura na zona da descarga numa, zona a 50 metros da descarga e série de temperatura 3°C acima da série na zona de referência (Tref + 3°C), em 3 e 4 de Outubro de 2013.	70
Figura 56 Séries de temperatura na zona da descarga numa, zona a 50 metros da descarga e série de temperatura 3°C acima da série na zona de referência (Tref + 3°C), em 25 e 26 de Janeiro de 2014.....	71
Figura 57 Comparação entre os dados obtidos por deteção remota (à direita) e os resultados obtidos pelo modelo PCOMS (à esquerda) para a temperatura à superfície, no dia 5 de agosto de 2013.....	III
Figura 58: Parâmetros estatísticos usados na validação do PCOMS com os dados obtidos por deteção remota.....	III

Índice de Tabelas

Tabela 1: Monitorização das emissões de efluente térmico e da qualidade da água no meio (Agência Portuguesa do Ambiente 2009).....	8
Tabela 2 Resolução espacial de cada nível do modelo implementado.	26
Tabela 3 Condições do clima e do meio recetor nos dias dos cenários.	32
Tabela 4 Parâmetros estatísticos para validação do nível 3 com os registos das campanhas de monitorização para o perfil de temperatura.....	35
Tabela 5 Parâmetros estatísticos de validação do nível 4 com os dados registados na boia de Sines para a temperatura superficial, entre 2 e 4 de Outubro de 2013.	36
Tabela 6 Parâmetros estatísticos de validação do nível 4 com os registos da Boia de Sines para o nível, entre 2 e 4 de Outubro de 2013.	37

Tabela 7 Parâmetros estatísticos de validação do nível 4 com os registos da monitorização, na zona adjacente à descarga (à esquerda) e numa zona de referência (à direita), para o perfil de temperatura, no dia 4 de Setembro de 2012.	38
Tabela 8 Localização geográfica das estações de monitorização.	I
Tabela 9 Espessura das camadas sigma (% de metros) implementadas no modelo.	IV
Tabela 10 Espessura (em metros) das camadas cartesianas implementada em cada um dos níveis do modelo configurado.	IV

Lista de notações e siglas

ADI	Alternate Direction Implicit
HS	Altura significativa
2D	Bidimensional
D	Dimensão do modelo
EDP	Energias de Portugal
E	Este
<i>EMODnet</i>	European Marine Observation and Data Network
FES	<i>Finite Element Solution</i>
GOTM	General Ocean Turbulence Model
GGV	Gerador de vapor
IST	Instituto Superior Técnico
LA	Licença Ambiental
MARETEC	Marine Environment and Technology Research Center)
FORTRAN	Mathematical formula translation system
MM5	Mesoscale Meteorological Model 5
MOHID	Modelo Hidrodinâmico
NE	Nordeste
NW	Noroeste
N	Norte
W	Oeste
PCOMS	Operational Model for Portuguese Coast
PCOMS	<i>Operational Model for the Portuguese Coast</i>
EMAS	Sistema Comunitário de Ecogestão e Auditoria
SE	Sudeste
SW	Sudoeste
S	Sul
3D	Tridimensional
VLE	Valor limite de emissão
MW	Megawatt

Lista de símbolos

R	Coeficiente de Correlação
C_d	Coeficiente de rugosidade
W_x	Componente este-oeste da velocidade do vento
W_y	Componente norte-sul da velocidade do vento
ρ_s	Densidade da superfície da água
ρ_a	Densidade do ar
σ	Desvio padrão
BE	Enviesamento
\vec{f}_α	Fluxos da propriedade α
F	Fontes
UI	Índice de upwelling
ρ	Massa volúmica da água
η	Nível de água
Z_o	Nível médio da água do mar
\vec{n}	Normal exterior
N	Número total de observações/resultados do modelo
f	Parâmetro de Coriolis
P	Poços
Φ	Potencial gravitacional
p_{atm}	Pressão atmosférica
z	Profundidade
α	Propriedade
RMSE	Raiz do erro quadrático médio
S_a	Salinidade
S	Superfície de fronteira
T	Temperatura
τ	Tensão de corte
\bar{x}	Valor médio
Ω	Velocidade de rotação da terra
u	Velocidade horizontal em x
v	Velocidade horizontal em y
w	Velocidade vertical em z
\vec{V}_H	Velocidades horizontais

v_T	Viscosidade turbulenta
V	Volume de controlo
Z_H	Zero Hidrográfico

1 Introdução

Com a presente dissertação pretende-se avaliar o efeito da pluma térmica originada pela descarga de águas de refrigeração da central termoelétrica de Sines, localizada na costa oeste de Portugal. Para simular a dispersão da pluma térmica no meio recetor recorre-se à modelação do sistema costeiro em análise, utilizando um modelo numérico.

1.1 Enquadramento geral

Em Portugal grande parte da energia elétrica consumida provém de Centrais Termoelétricas, em 2012, 28% do consumo total de energia elétrica em Portugal proveio de centrais termoelétricas a carvão (Rede Elétrica Nacional 2012). Este tipo de produção de energia requer grandes quantidades de água para refrigeração que, depois de utilizada, é descarregada de volta à sua fonte, a temperaturas maiores. A descarga deste efluente térmico no meio origina uma pluma térmica que irá dispersar-se, variando de acordo com as condições da descarga e do próprio meio.

A temperatura tem um papel fundamental nos processos químicos, biológicos e físicos no ambiente marinho, condicionando os ciclos de vida e a distribuição dos organismos marinhos. A densidade é uma das propriedades físicas da água que varia com a temperatura. A água mais quente tem menor densidade e por isso vai dispersando na superfície, causando uma estratificação térmica. A nível biológico o aumento da temperatura no meio pode causar o declínio rápido de algumas espécies (Agarwal 2005). Assim, o aumento de temperatura no meio recetor e o desenvolvimento de massas de água com diferentes densidades poderá ter efeitos físicos, químicos e biológicos podendo afetar a dinâmica do meio e consequentemente perturbar o ambiente natural marinho.

Para perceber se o efluente térmico pode representar um impacto negativo na ecologia do sistema é muito importante começar por fazer uma caracterização dos vários fatores que afetam a sua dispersão e o processo de mistura. Tendo conhecimento sobre o comportamento da pluma térmica no meio é depois mais fácil prever e minimizar os impactos ambientais.

O comportamento do efluente térmico no meio recetor é variável com as características do efluente, com as condições da descarga e com a natureza do meio recetor (Environment Canada 2014). A densidade e velocidades iniciais são as características do efluente térmico que determinam a sua mistura e dispersão inicial. Normalmente o efluente tem maior velocidade que o meio recetor o que promove a mistura turbulenta. Quando a velocidade da pluma iguala a velocidade do meio, a diluição e mistura do efluente ocorre devido à turbulência “natural” do meio. A densidade do efluente térmico é menor que a das águas recetoras o que faz com que a pluma tenda a subir para a superfície. A densidade influencia assim a posição vertical da pluma na coluna de água.

As características do efluente e as condições da descarga determinam se o efluente dispersa como uma camada superficial ou em jato (Langford 1990). O primeiro caso é o que ocorre normalmente quando a descarga é feita através de canais, originando uma pluma. A descarga em jato acontece quando são usados tubos, com um ou mais orifícios, provocando maiores quantidades de movimento, como descrito por exemplo no trabalho de Subtil (2012).

A natureza do meio recetor também tem uma grande importância na dispersão e mistura do efluente térmico. No caso de o meio recetor ser o ambiente marinho costeiro, os principais fatores a influenciar o movimento e mistura da pluma são as condições climáticas, como o vento e a temperatura do ar, o regime de marés, a estratificação ao longo da coluna de água e a batimetria. O regime de marés influencia os campos de velocidade e o nível de água junto à costa, podendo assim condicionar a mistura e diluição iniciais do efluente térmico. A estratificação ao longo da coluna de água está relacionada com a temperatura e salinidade que condicionam a densidade das massas de água, uma coluna de água estratificada dificulta a mistura da pluma térmica (Soares et al. 1999).

O vento é um fator determinante na circulação costeira influenciando a formação de correntes, a formação de ondas e a dinâmica ao longo da coluna de água. À superfície, ao transferir quantidade de movimento para o fluido, através de tensões de corte, o vento provoca o movimento da água originando correntes superficiais. O vento pode atuar diretamente na dinâmica ao longo da coluna de água promovendo a mistura e diminuindo a estratificação. O vento pode ainda dar origem a movimentos verticais na coluna de água devido ao fenómeno de *upwelling*.

A combinação de ventos persistentes do quadrante norte (no caso do hemisfério norte) e o efeito de Coriolis conduzem a movimentos de *upwelling* costeiro das massas de água ao longo da coluna de água (NASA 2014). Quando o vento sopra na superfície do mar, a camada de água superficial inicia o movimento na direção do vento. Contudo, devido à rotação da Terra, a trajetória desta camada superficial sofre um desvio na sua trajetória para a direita no hemisfério norte, ou para a esquerda no hemisfério sul (efeito Coriolis). Assim, de acordo com a teoria de Ekman (1905), no hemisfério norte, quando o vento sopra do quadrante norte, há um transporte de água para o mar aberto. Consequentemente, junto à zona costeira, há um transporte ascendente de águas profundas, mais frias e ricas em nutrientes, para a superfície (Figura 1). As águas mais frias misturam-se com as águas mais quentes à superfície e diminuem a estratificação térmica ao longo da coluna, podendo mesmo levar a uma coluna de água totalmente misturada. Na costa Portuguesa o *upwelling* costeiro é intenso nos meses entre Junho e Setembro, como consequência da intensidade e estabilidade dos ventos de quadrante norte nesta altura do ano (Fiúza et al. 1981).

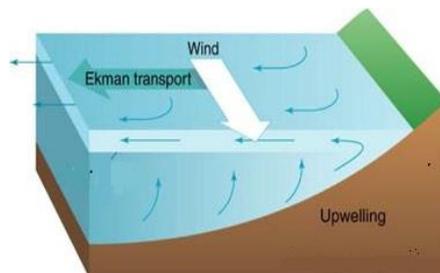


Figura 1: *Upwelling* costeiro (US National Oceanic and Atmospheric Administration 2014)

Os fatores que condicionam a mistura na coluna de água dependem ainda da batimetria uma vez que, em zonas menos profundas, estes fatores terão maior impacto já que podem atuar na totalidade da coluna de água.

Nos estudos de dispersão de poluentes em sistemas aquáticos é comum dividir-se o processo de dispersão em duas fases: campo próximo e campo afastado. A primeira fase ocorre na região próxima da descarga e é a fase que caracteriza a mistura inicial, que depende da maneira como é efetuada a descarga e das características do meio. Na segunda fase o transporte da pluma depende sobretudo da circulação geral da zona e o processo de mistura é condicionado pela turbulência do meio e pelo transporte advectivo (Subtil 2012).

Para estudar a dispersão e mistura de uma pluma térmica, as metodologias mais referidas na presente literatura são fundamentalmente de três tipos diferentes: modelos físicos, campanhas de amostragem e modelação numérica. O primeiro é constituído por trabalhos experimentais com a utilização de modelos físicos, semelhantes geometricamente à zona que se pretende estudar mas a uma escala muito menor, como é o caso estudado por El-Ghorab (2013). As campanhas de amostragem consistem em analisar e tratar dados obtidos com base em medições realizadas *in situ*, como por exemplo os estudos realizados por Jan et al. (2004) e por Hunt et al. (2010). Para além dos métodos enunciados, os modelos matemáticos têm sido cada vez mais uma ferramenta a aplicar neste tipo de estudos. Este método numérico permite, através de considerações matemáticas, a representação dos processos e sistemas físicos que caracterizam o meio. As diferentes metodologias enunciadas não têm de estar necessariamente dissociadas, por exemplo no caso da aplicação de modelos hidrodinâmicos é importante fazer uma validação do modelo com dados obtidos em campo ou em trabalhos experimentais.

Atualmente existem vários modelos que permitem fazer o estudo de descarga e dispersão de efluentes nos sistemas aquáticos. A sua maioria são modelos locais que permitem a simulação da pluma, na sua forma integral, no campo próximo. O exemplo mais visível deste tipo de modelo é a série de software CORMIX, usada pela *Environmental Protection Agency* (USA) nas avaliações de impacto ambiental (USEPA 2014). A desvantagem destes modelos locais é que não permitem a

representação da dispersão no campo afastado. Outro tipo de modelos muito utilizados são os modelos hidrodinâmicos. Estes modelos têm-se revelado uma boa ferramenta para simular a dispersão de efluentes térmicos e avaliar diferentes cenários como mostram por exemplo Bedri et al. (2013) e Abbaspour et al. (2005), permitindo uma representação dos processos que ocorrem no campo próximo e no campo afastado.

As grandes diferenças entre modelos hidrodinâmicos são o tipo de discretização espacial (elementos finitos, diferenças finitas, volumes finitos), as coordenadas verticais, escala e a dimensão matemática do sistema de equações - 2D ou 3D. Os modelos de três dimensões permitem fazer uma representação mais realista do que acontece na zona próxima da descarga, onde é importante reproduzir os processos ao longo da coluna de água, tendo por isso maiores vantagens. Um exemplo de um modelo hidrodinâmico 3D é o TELEMAC, usado por Bedri et al.(2013). Outro modelo hidrodinâmico que pode ser aplicado a este tipo de estudo é o modelo MOHID. Este modelo utiliza o método dos volumes finitos para discretização das equações e permite simulações a três dimensões. O MOHID tem sido aplicado a vários casos de estudo, estando alguns descritos em Mateus and Neves (2013).

1.2 Objetivos

Com este trabalho pretende-se estudar a hidrodinâmica da pluma térmica sob diferentes cenários, quantificando fatores como a influência do vento, a maré e a temperatura do ar nos processos de dispersão e mistura do efluente térmico, resultante do circuito de refrigeração da central termoelétrica. Através de um cenário de referência, serão ainda analisados os principais efeitos da água de refrigeração na dinâmica da região.

Pretende-se ainda perceber se nos diferentes cenários é cumprido o limite de emissão imposto pela licença ambiental concedida à Central, onde está estipulado que a 30 metros, medidos a jusante da descarga, o aumento de temperatura no meio não pode ultrapassar os 3°C (Agência Portuguesa do Ambiente 2009).

Para estudar a pluma térmica é usado, como ferramenta de modelação, o modelo hidrodinâmico MOHID.

1.3 Estrutura do documento

No primeiro capítulo é feito um enquadramento geral do tema abordado, sendo descritos de forma sintetizada a causa, os efeitos e os fatores condicionantes de uma pluma térmica. São descritos alguns métodos que permitem fazer o estudo em questão, dando-se especial ênfase aos modelos numéricos.

O segundo capítulo tem o propósito de dar conhecimento sobre o caso de estudo, onde se descreve o funcionamento geral da central e com mais detalhe o funcionamento do circuito de refrigeração. São ainda caracterizadas as condições climáticas típicas da região e as condições do meio recetor.

A metodologia aplicada neste trabalho é descrita no terceiro capítulo, onde se descreve o modelo numérico usado, o MOHID, a configuração do modelo implementado, bem como a sua validação. Sendo ainda explicados e caracterizados os cenários aplicados neste estudo.

Os resultados obtidos são apresentados no quarto capítulo. Primeiro são mostrados os resultados obtidos com uma simulação do meio sem descarga de efluente térmico, permitindo obter uma situação de referência para todos os cenários. Posteriormente são apresentados os resultados obtidos com a simulação da descarga de efluente no meio, sendo comparados estes resultados com os do cenário de referência analisando assim quais os principais efeitos do efluente no meio recetor. São ainda analisados e discutidos os fatores de influência na dispersão da pluma térmica. Na última secção do capítulo verifica-se se é ou não possível cumprir o VLE imposto na licença ambiental para o funcionamento da central em questão.

Por fim, no capítulo 5, são expostas as principais conclusões obtidas com este trabalho. Abordando-se ainda o trabalho que será realizado no futuro.

2 Descrição do caso de estudo

Neste capítulo é feita uma descrição da central termoelétrica de Sines, fonte do efluente térmico cuja dispersão se pretende estudar, e da zona costeira onde se dá a descarga.

2.1 Central Termoelétrica de Sines

A central termoelétrica de Sines, gerida pelo grupo EDP, é uma Central convencional que usa carvão fóssil importado como combustível (Barbosa 2014). A sua construção insere-se na estratégia de diversificação de fontes de energia primária para a produção de energia elétrica. A necessidade desta estratégia surgiu após as crises petrolíferas de 1973 e 1979, quando se tomou consciência da fragilidade de Portugal perante as flutuações dos preços do petróleo.

2.1.1 Localização

A central localiza-se na costa Alentejana, como se pode observar na Figura 2, na freguesia de São Torpes, concelho de Sines. Situando-se a cerca de 8 km a sudeste da cidade de Sines, junto à praia de São Torpes.

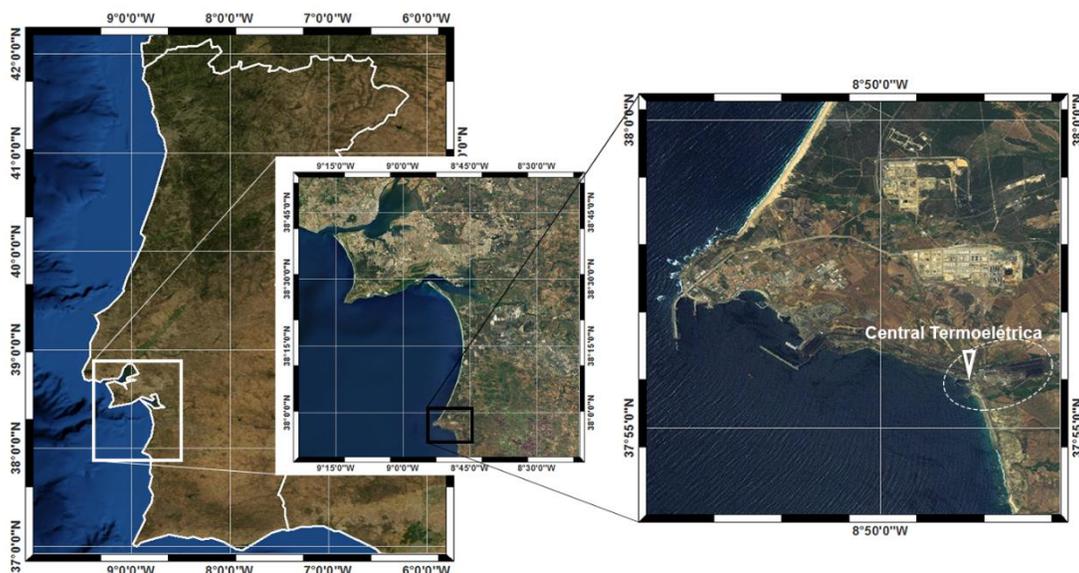


Figura 2: Localização da Central Termoelétrica de Sines.

A localização da central foi baseada na proximidade ao porto de Sines, situado na confluência das rotas internacionais e equipado com terminais petrolífero e mineralero (Barbosa 2014).

2.1.2 Funcionamento

Nesta secção é descrito o funcionamento geral da Central de Sines e mais detalhadamente o sistema de refrigeração. Para fazer esta descrição recorreu-se à última declaração ambiental publicada pela Direcção de Produção Térmica (EDP) (2010), no âmbito do seu registo no Sistema Comunitário de Ecogestão e Auditoria (EMAS).

A Central de Sines é constituída por quatro grupos cada um dos quais constitui uma unidade produtora autónoma (Barbosa 2014). A potência elétrica unitária é de 314 MW permitindo uma potência total instalada de 1256 MW.

Cada grupo é constituído por um gerador de vapor de circulação natural (GGV), um grupo turbo/alternador e um transformador principal. O vapor produzido no GGV contém energia térmica que é transformada em energia mecânica através da expansão do vapor que promove a rotação da turbina. A turbina encontra-se acoplada por um rotor ao alternador que gera energia. A energia elétrica produzida na Central é então lançada na rede de transporte através de linhas de alta tensão, a 150 kV para o 1º grupo e a 400 kV para os restantes grupos.

Depois de passar pela turbina, o vapor de água tem de arrefecer e condensar antes de voltar a ser usado para produzir mais eletricidade. Na Central, este processo de refrigeração é feito recorrendo à água do oceano Atlântico que depois de ser usada para a permuta é restituída à origem. Este mecanismo é denominado por circuito aberto de refrigeração. A Figura 3 mostra a zona de captação de água, a norte, e a zona de descarga a sul.



Figura 3: Infraestruturas de captação e rejeição do Sistema de refrigeração da Central Termoelétrica de Sines.

A captação é feita através de dois molhes, no meio dos quais está localizada uma bacia de decantação. Esta estrutura permite a dissipação da energia das ondas, a sedimentação das matérias

em suspensão e garante a existência de um caudal suficiente de água para as necessidades dos quatro grupos, mesmo na baixa-mar.

Depois de captada, a água passa por grelhas de aspiração e tambores filtrantes à entrada da estação de circulação, antes da bombagem. Antes de ser admitida no circuito de refrigeração principal, a água sofre uma cloração por adição de hipoclorito de sódio, para controlar o crescimento de organismos marinhos. O hipoclorito de sódio é obtido por eletrólise a partir da água do mar.

A água é admitida na eletrobomba (uma por grupo), com um caudal médio de 10 m³/s, que a envia para o condensador. No interior do condensador, a água realiza permuta de temperatura com o vapor proveniente das turbinas.

Depois de realizada a permuta de temperatura, e antes de ser rejeitada, a água passa por uma mini-hídrica que permite gerar energia elétrica, recuperando assim parte da energia necessária à captação da água. A água é restituída ao Oceano Atlântico através de três molhes que formam dois canais. A zona de descarga localiza-se a cerca de 400 metros a sul da zona de captação. Na água descarregada é feita a monitorização do cloro e da temperatura.

A Licença Ambiental (LA) em vigor para a Central é a LA n.º 300/2009, emitida nos termos da legislação relativa à Prevenção e Controlo Integrados da Poluição. Para a captação de água a LA define um caudal máximo de extração igual a 40 m³/s (10 m³/s por unidade produtora). Para a rejeição de água estão estipulados valores limite de emissão, descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Monitorização das emissões de efluente térmico e da qualidade da água no meio (Agência Portuguesa do Ambiente 2009).

	Parâmetro	VLE	Expressão dos resultados	Frequência mínima de monitorização	Tipo
Monitorização à saída dos condensadores	Caudal médio	40	m ³ /s	Contínua	-
	Cloro	0,5	Mg Cl/l	Diária	Amostragem composta (24 horas)
Monitorização no Oceano Atlântico	Temperatura	Aumento de 3 °C no meio (a 30 metros)	°C	De 2 em 2 anos	Termografia aérea

2.2 Caraterização da área de estudo

Os processos de dispersão e mistura da pluma térmica são fortemente condicionados pelas características do meio onde se dá a descarga. Assim uma descrição da zona permite compreender melhor os processos em estudo. Na presente secção será feita uma descrição da região de estudo, das suas características climáticas e das condições do meio recetor.

A área onde se pretende estudar a dispersão da pluma térmica compreende a zona costeira entre Sines e a ilha do Pessegueiro (Figura 4).

Em termos de ambiente construído as infraestruturas mais relevantes na zona de estudo são os molhes do sistema de refrigeração da Central Termoelétrica e o Porto de Sines, que se localiza a cerca de 3 km da Central.

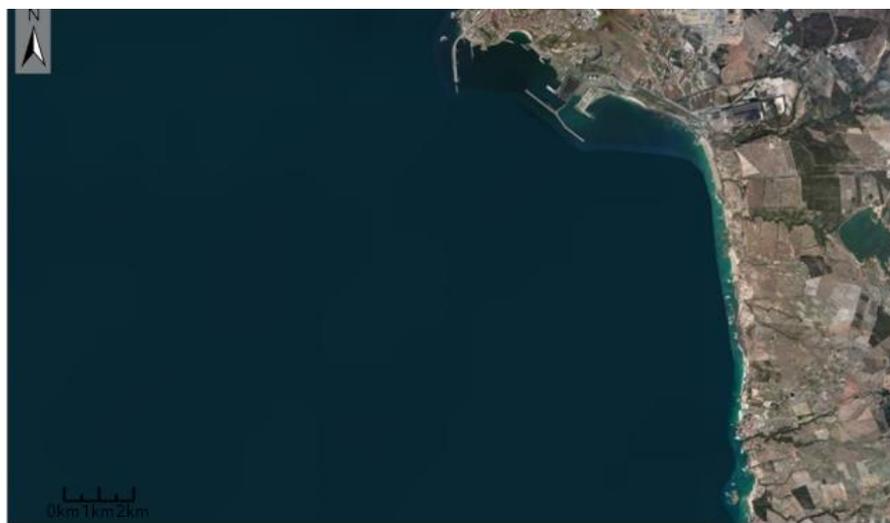


Figura 4: Zona de estudo (à esquerda) e localização das infraestruturas existentes na região de estudo.

O Porto de Sines é um porto de águas profundas que contém diferentes tipos de terminais que possibilitam um movimento de elevadas quantidades de mercadorias. Devido às suas características e à sua localização estratégica (principal porto na fachada Ibérico-Atlântica) constitui o principal ponto de abastecimento energético no país.

Quanto ao ambiente natural, a orla costeira da região de estudo é considerada de grande interesse para conservação da fauna, flora e paisagem. A zona costeira encontra-se classificada como Biótopo Corine (Garcia et al. 2007).

2.2.1 Caracterização da meteorologia

Nesta secção são descritas as características climáticas típicas da região em estudo, analisando os valores típicos de algumas variáveis meteorológicas, como a pressão atmosférica, a precipitação, a temperatura do ar, e o regime de ventos.

A circulação atmosférica de larga escala é um dos principais fatores condicionantes do clima e das correntes oceânicas. De um modo geral, no inverno, Portugal está sob a influência da circulação do anticiclone dos Açores, da circulação do anticiclone continental e dos centros depressionários associados à ondulação da frente polar (zona de separação entre massas de ar polar continental e massas de ar tropical marítimo) que migra para sul nesta altura do ano (Instituto de Meteorologia 2004a). No verão Portugal fica sob influência conjunta da crista NE do anticiclone dos Açores e da depressão térmica que se forma sobre a Península Ibérica, predominando o bom tempo (Instituto de Meteorologia 2004a).

Para caracterizar a pressão atmosférica na região de estudo são usados os dados registados na estação sinótica Sines Montes Chaos, cuja localização está descrita no Anexo I. Os dados são valores médios e extremos mensais de pressão atmosférica medidos entre 2008 e 2013 e encontram-se representados na Figura 5.

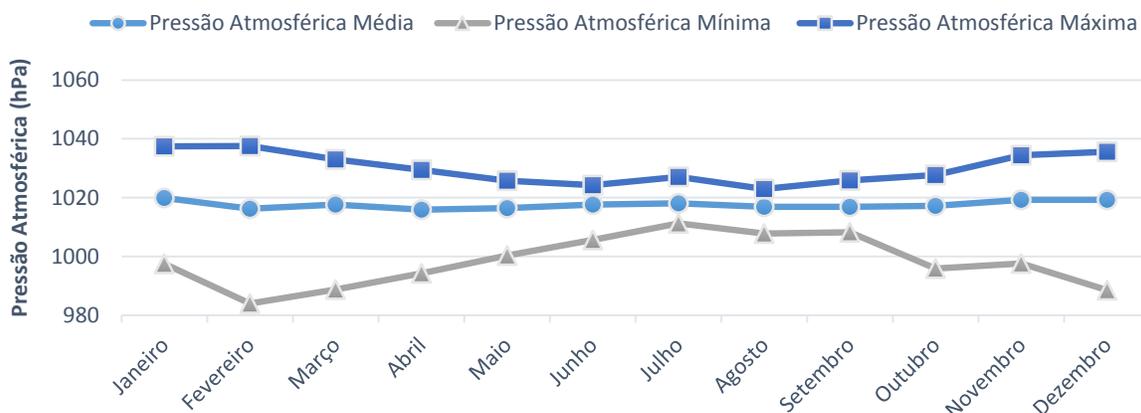


Figura 5 Valores médios e extremos (máximo e mínimo) de pressão atmosférica (hPa) medidos na estação sinótica de Sines Montes Chaos entre 2008 e 2013. Adaptado de Citizen Weather Observer Program (2014).

Observando a Figura 5 verifica-se que em média a pressão atmosférica não é variável ao longo do ano, sendo ligeiramente mais baixa nos meses de verão que nos meses de inverno. É nos meses mais frios que se registam pressões mais elevadas, que se devem ao desenvolvimento do anticiclone continental. Contudo, é também no inverno que se registam pressões abaixo de 1000 hPa, devido à influência dos centros depressionários (Instituto de Meteorologia 2004a). No verão as condições atmosféricas são normalmente mais estáveis daí que as variações de pressão atmosférica sejam menores nestes meses.

Para caracterizar a região no que diz respeito à temperatura do ar e à precipitação são usados valores disponibilizados no relatório de caracterização climática da costa Portuguesa publicado em 2004 pelo Instituto de Meteorologia. Os valores são valores médios registados na estação meteorológica de Sines entre 1971 e 1990, estando estes valores representados na Figura 6 e na Figura 7.

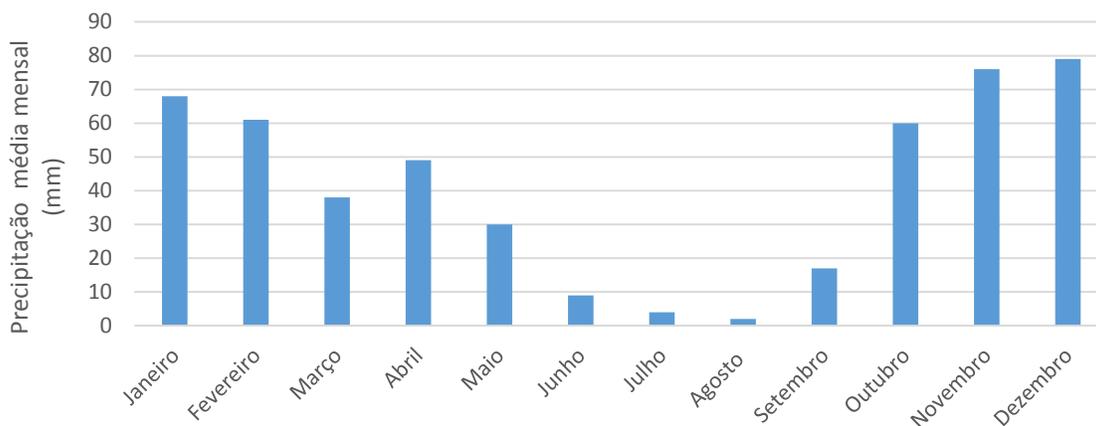


Figura 6 Valor médio da quantidade total de precipitação (mm) medido na estação meteorológica de Sines entre 1971 e 1990. Adaptado de Instituto de Meteorologia (2004a).

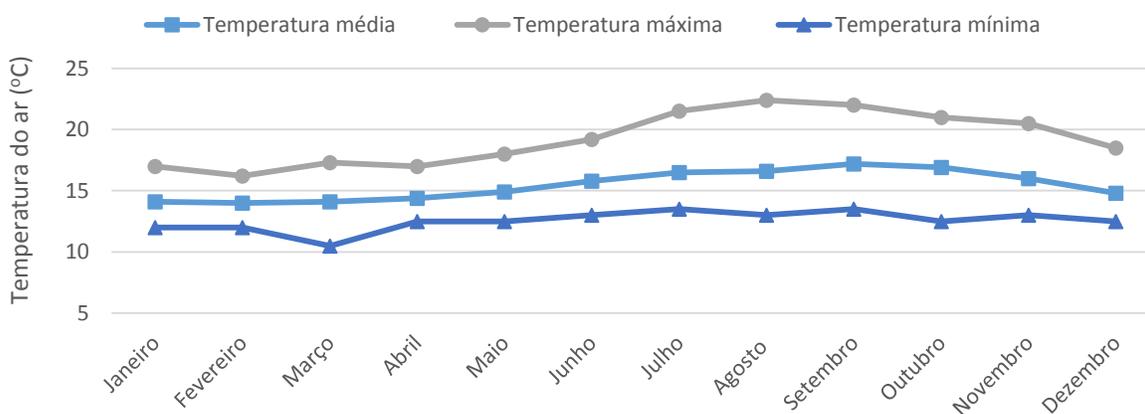


Figura 7 Valores médios e extremos mensais da temperatura do ar (°C) registados na estação meteorológica de Sines entre 1971 e 1990 Adaptado de Instituto de meteorologia (2004a).

De acordo com a Figura 6 verifica-se que a precipitação é bastante variável ao longo do ano ocorrendo principalmente no outono, inverno e primavera. No inverno a precipitação média mensal chega aos 79 mm e no verão aos 2 mm.

Relativamente à temperatura do ar pode-se observar, pela Figura 7, que em termos médios a temperatura mínima é de 15°C e a temperatura máxima não ultrapassa os 22°C. Observando as temperaturas extremas verifica-se que os máximos registados são nos meses de verão, estando

associadas a situações de calma ou ventos E. As temperaturas mínimas registadas ocorrem no inverno, associadas à circulação do anticiclone continental (Instituto de Meteorologia 2004a).

De um modo geral, no que diz respeito à temperatura do ar e à precipitação, conclui-se que esta é uma região de clima temperado, com meses de inverno mais frios e com valores de precipitação mais elevados e meses de verão mais quentes e secos.

A direção e intensidade do vento são fatores determinantes nos processos hidrodinâmicos da área de estudo, sendo responsável por exemplo pelo fenómeno de *upwelling*, já descrito no primeiro capítulo. Por este motivo uma análise dos principais padrões de regime de vento é essencial no contexto deste trabalho. Os dados utilizados para caracterizar o vento na região são os valores registados na estação sinótica Sines Montes Chaos (Citizen Weather Observer Program 2014), para o período de tempo entre 2008 e 2013.

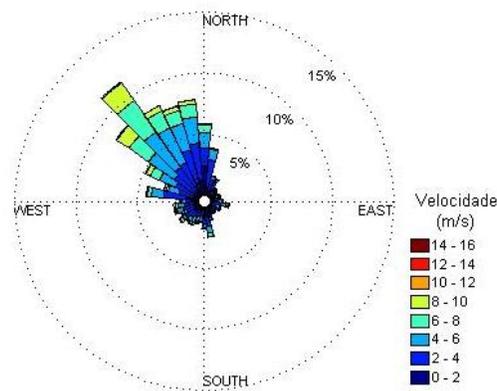


Figura 8 Direção e intensidade do vento para o período de tempo entre 2008 e 2013, registados na estação Sines Montes Chaos. Adaptado de Citizen Weather Observer Program(2014).

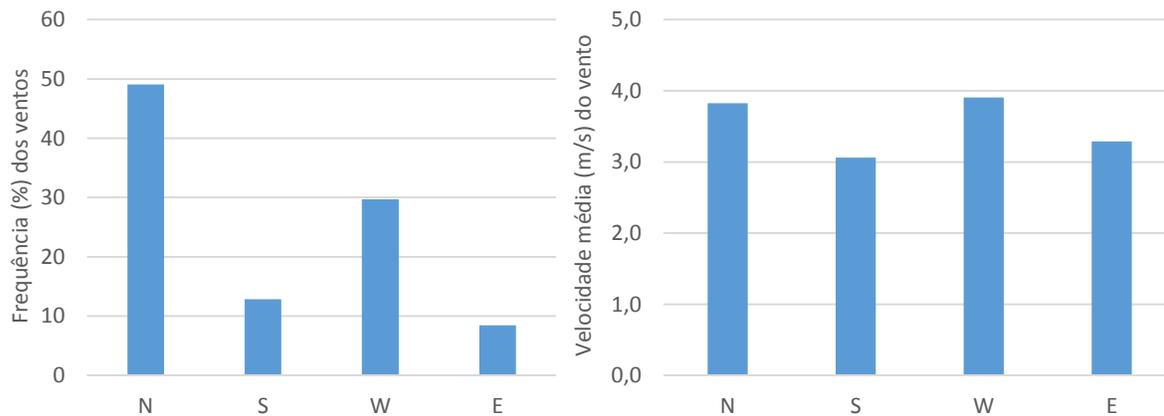


Figura 9 Frequência dos ventos em % (à esquerda) e velocidades médias do vento em m/s (à direita), registados para cada quadrante entre 2008 e 2013, na estação Monte Chaos Sines. Adaptado de Citizen Weather Observer Program (2014).

Observando a Figura 8 verifica-se que na região de Sines os ventos mais frequentes são os ventos N e NW, que corresponde a um padrão típico da costa oeste Portuguesa associados à circulação do anticiclone dos Açores (Fiúza 1980). Os ventos do quadrante N ocorrem com uma frequência de cerca de 50% (Figura 9), sendo este o regime de ventos predominante na região, condicionando fortemente a circulação na região uma vez que este tipo de ventos é favorável à ocorrência de upwelling. O regime de ventos menos frequente são os ventos de quadrante S com uma frequência de 12 % e de E com uma frequência de 8% (Figura 9). Quanto às velocidades associadas a cada regime de ventos verifica-se que as velocidades médias registadas não variam muito entre os ventos dos diferentes quadrantes (Figura 9), mesmo assim observa-se que é aos quadrantes N e W que estão associadas velocidades maiores.

Na Figura 10 é possível observar a variação do regime de ventos ao longo do ano para cada estação.

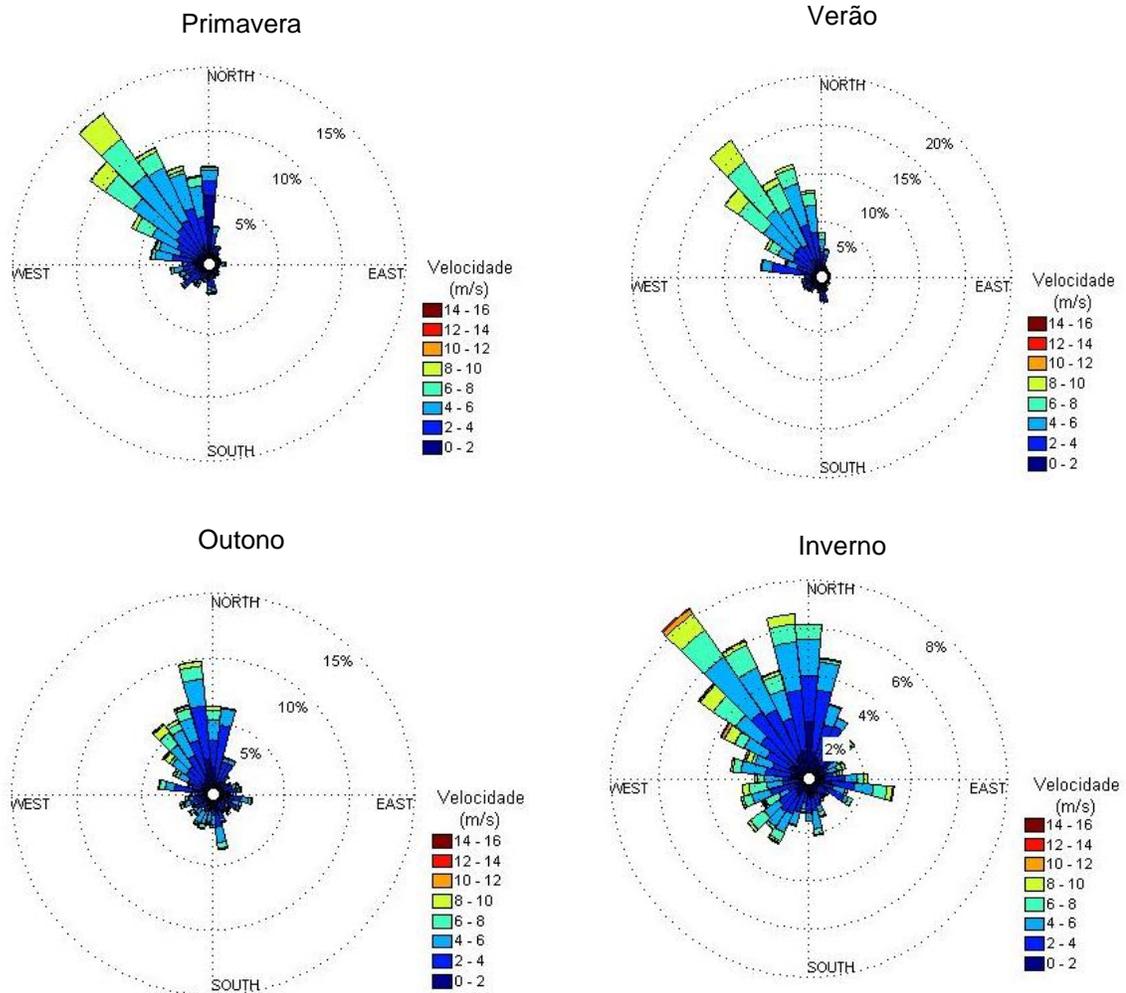


Figura 10 Direção e intensidade do vento para o período de tempo entre 2008 e 2013, registados na estação Sines Montes Chaos, para as diferentes estações do ano.

Adaptado de Citizen Weather Observer Program (2014).

Comparando a frequência associada a cada tipo de ventos nas diferentes estações do ano, observa-se que os ventos de quadrante N são sempre dominantes em todas as estações do ano. A dominância dos ventos N e NW nos meses mais quentes está associada à formação da depressão de origem térmica, no centro da Península Ibérica e no inverno este regime de ventos está associado à circulação do anticiclone dos Açores (Instituto de Meteorologia 2004a). Os ventos E são pouco frequentes ocorrendo principalmente nos meses mais frios estando associados à circulação do anticiclone continental. Na Figura 10 é ainda possível observar que nos meses mais quentes há maior estabilidade na direção do vento. Aos meses mais frios estão associados ventos com intensidades maiores.

2.2.2 Caracterização do meio recetor

Nesta secção serão descritas algumas características do meio recetor, sendo destacadas as variáveis mais relevantes no âmbito deste trabalho.

Na Figura 11 estão representados os valores médios e extremos mensais da temperatura superficial da água do mar, registados na boia ondógrafo localizada em Sines, cuja localização está descrita no Anexo I.

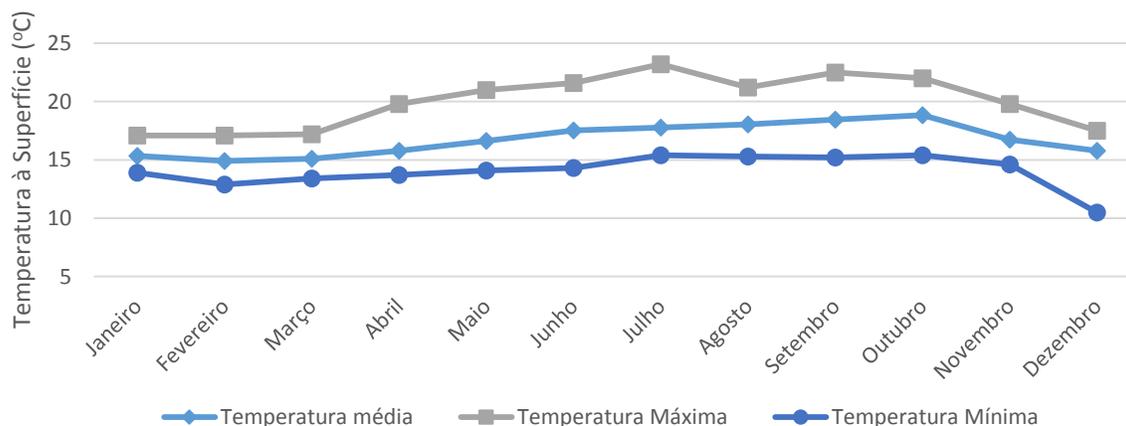


Figura 11 Temperatura média mensal á superfície da água do mar, medida na boia de Sines no período de 2008 -2013.

De um modo geral observa-se que em média a temperatura da superfície da água não é muito variável ao longo do ano. Os valores máximos foram registados nos meses mais quentes e os valores mínimos registaram-se nos meses mais frios. Contudo a temperatura da água do mar não apresenta uma tendência tão suave quanto a variação da temperatura do ar. Isto porque a temperatura da superfície da água não depende apenas da temperatura do ar, sendo também influenciada por fenómenos como o *upwelling*, que promove o arrefecimento da temperatura superficial da água através do afloramento de águas do fundo mais frias.

Uma forma de quantificar estes fenómenos de afloramento, de águas profundas, ou afundamento, de águas superficiais, é mediante o cálculo de índice de upwelling. O índice de *upwelling* permite estimar o caudal de água que aflora na costa, através do caudal de água deslocada por km de linha de costa (Instituto Español de Oceanografía 2014). A fórmula de cálculo do índice está descrita no Anexo II. Na Figura 12 estão representados os valores médios mensais do índice de *upwelling* característicos da região de Sines para o período entre 1967 e 2013. As séries temporais do índice de *upwelling* foram disponibilizadas pelo Instituto Español de Oceanografía (www.indicedeafioramiento.ieo.es) utilizando os dados de pressão ao nível do mar do modelo atmosférico WxMAP.

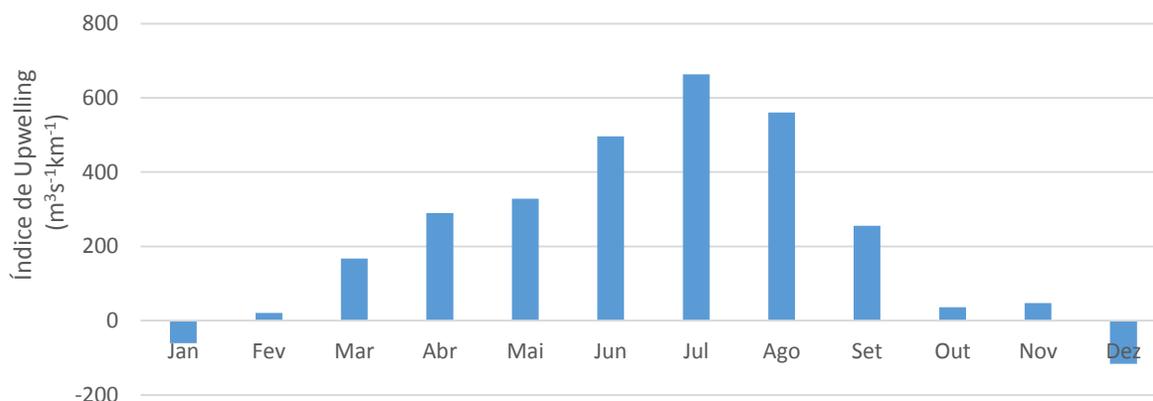


Figura 12 Média mensal do índice de upwelling calculada para o período de tempo entre 1967 e 2013. Adaptado de Instituto Español de Oceanografía (2014).

Observando a Figura 12 verifica-se que o *upwelling* é frequente durante quase o ano, sendo que o índice de *upwelling* é maior nos meses de verão, altura em que os ventos de quadrante N são persistentes na região, como já se observou na Figura 10. Os meses de janeiro e de dezembro registam um índice negativo de *upwelling*, indicando uma dominância de *downwelling* nesta altura do ano, devido ao registo de ventos de W e SW.

Para caracterizar a região relativamente à estrutura vertical da temperatura ao longo da coluna de água, são usados os dados obtidos nas campanhas de amostragem realizadas pela MARETEC no âmbito do programa “Monitorização do ambiente marinho junto e na envolvente mais afastada do emissário submarino de Sines” (2011-2013).

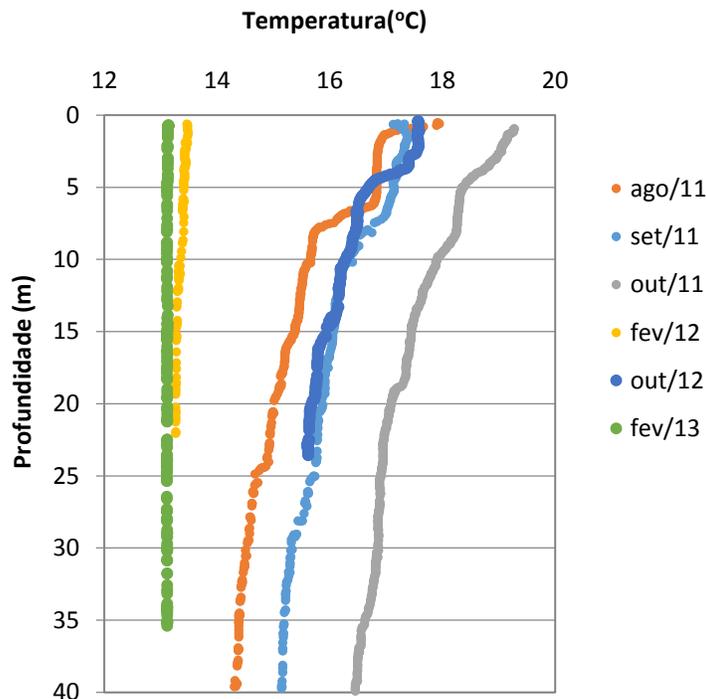


Figura 13 Variação de temperatura ao longo da coluna na região de Sines.

A estrutura vertical, registada na Figura 13, revela um padrão típico de zonas costeiras sujeitas a processos hidrodinâmicos intensos. Observa-se a formação de uma termoclina sazonal caracterizada por uma estrutura vertical térmica com temperaturas mais elevadas à superfície e mais frias em zonas profundas, nos meses mais quentes (agosto, setembro e outubro). Nos meses mais frios, a termoclina, observada nos meses quentes, desfaz-se devido à combinação de vários fatores, nomeadamente a diminuição da temperatura atmosférica, maior ondulação e regime de ventos mais intensos, muitas vezes associados a tempestades. Estes fatores promovem a mistura ao longo da coluna de água resultando assim numa distribuição mais homogênea do perfil de temperatura.

Nos meses quentes também pode haver destruição periódica da termoclina devido aos processos de *upwelling*, muito frequentes nesta altura do ano.

Os valores típicos de salinidade, na região de estudo, são da ordem dos 36 (Instituto da Conservação da Natureza e da Biodiversidade [ICNB] & Hidroprojecto 2008), que é um valor característico de zonas costeiras sem grandes afluências de água doce.

A agitação marítima pode ser caracterizada através da altura da onda, valor médio da cava à crista das ondas bem formadas; período de propagação e direção de propagação (Instituto de Meteorologia 2004b).

Em Portugal o clima de agitação marítima é monitorizado através dos registos em boias ondógrafo, geridos pelo Instituto Hidrográfico. As boias registam as séries temporais dos deslocamentos verticais (elevações) e deslocamentos horizontais nos sentidos norte-sul e este-oeste (Instituto Hidrográfico 2014a). Através destes dados são estimados os parâmetros necessários à caracterização das ondas. De seguida estão representados as figuras com os valores da altura significativa (H_s), período das ondas e direção de propagação obtidos através dos dados registados, entre 2008 e 2013, na boia ondógrafo de Sines.

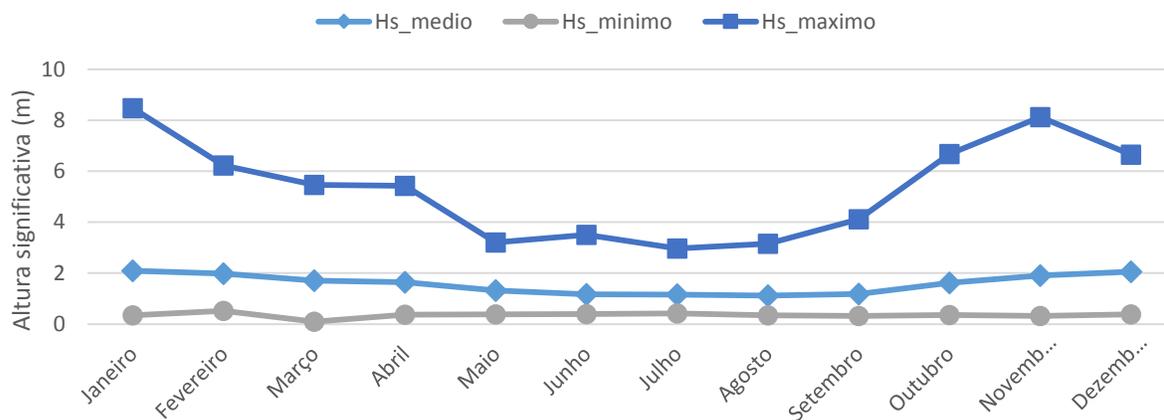


Figura 14 Valores da altura significativa (m) média e dos extremos máximos e mínimo em cada mês, obtidos entre 2008 e 2013 para a boia ondógrafo de Sines.

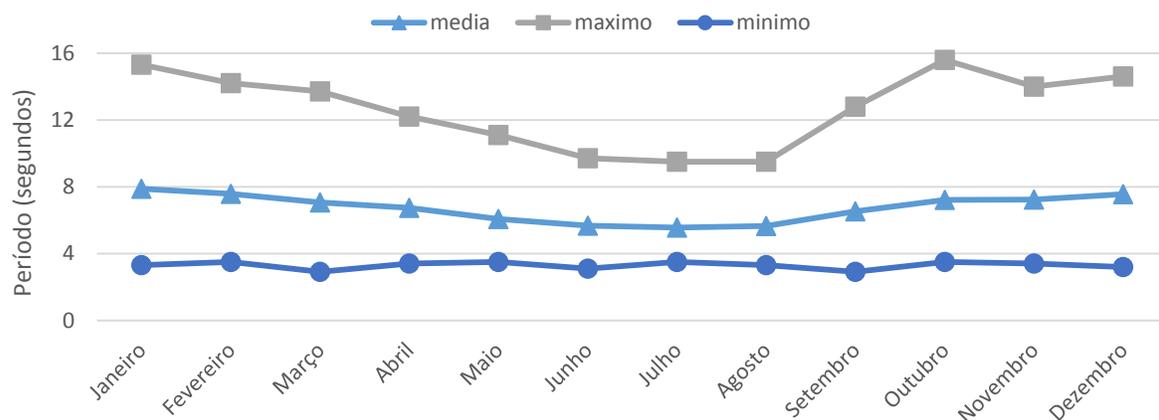


Figura 15 Período das ondas (segundos) médio e os seus valores extremos máximo e mínimo em cada mês, obtidos entre 2008 e 2013 para a boia ondógrafo de Sines

A altura significativa das ondas na região de Sines varia em média entre 1 e 2 metros ao longo do ano (Figura 14), sendo nos meses mais frios que se registam alturas mais elevadas, chegando mesmo aos 8 metros em janeiro, altura do ano em que se registam ventos mais intensos. Observa-se ainda que o período característico das ondas na região apresenta valores médios na ordem dos 7 segundos, com mínimos de 2 segundos e registos máximos de 17 segundos (Figura 15).

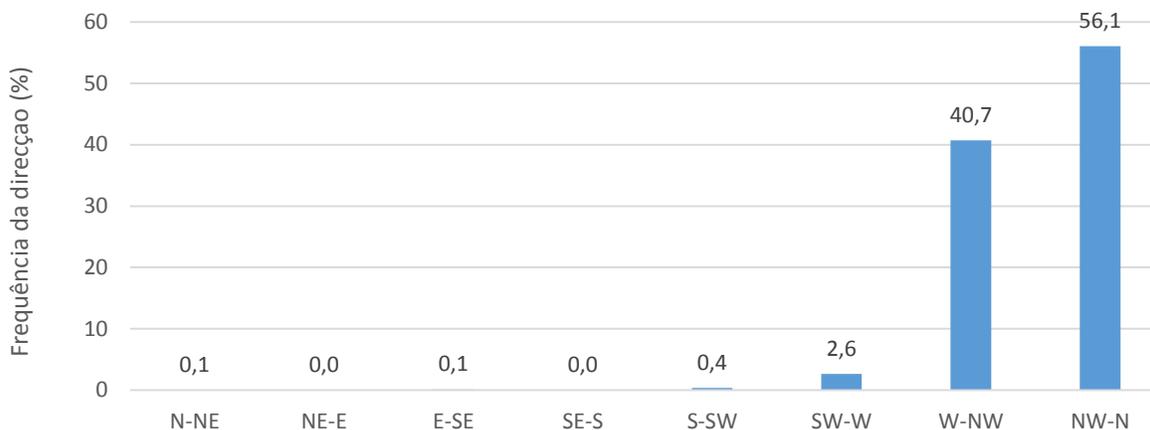


Figura 16 Frequência da direção média de propagação registada entre 2008 e 2013 para a boia ondógrafo de Sines.

Na região em estudo verifica-se que as direções de propagação das ondas mais frequentes são entre W e N com uma frequência de cerca de 96% (Figura 16). Este estado do mar deve-se à ondulação de NW gerada no Atlântico Norte a latitudes mais elevadas (Instituto de Meteorologia 2004b) e à frequência de vento de N e W na região.

A componente harmónica que maior influência tem na maré é do tipo semidiurno regular, isto é em cada dia há duas baixa-mares e duas preia-mares. Há ainda um ciclo de marés quinzenal coincidente com os quartos lunares, dá-se a ocorrência de amplitudes excepcionais de maré, denominadas por marés vivas e marés mortas. Para caracterizar a maré na região são usados os dados disponibilizados pelo Instituto Hidrográfico registados na boia de Sines entre Abril e Maio de 2013.

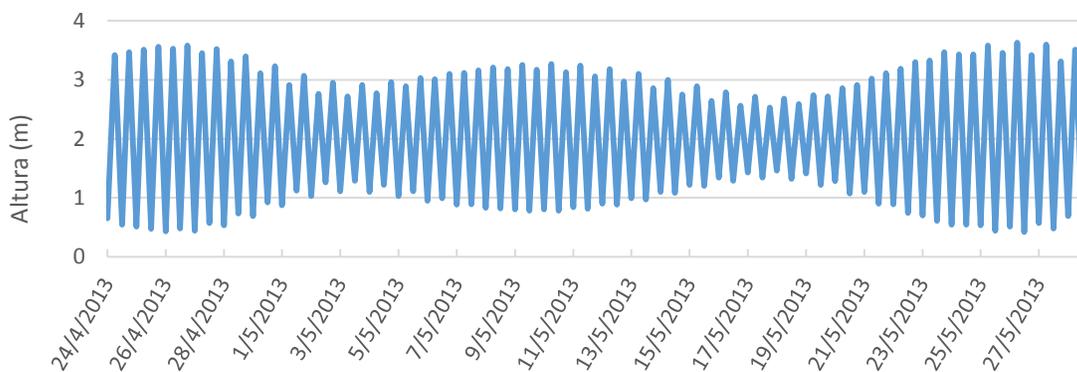


Figura 17 Caracterização da maré na região de Sines, entre abril e maio de 2013. Adaptado de Instituto Hidrográfico (2014b)

3 Metodologia

Neste capítulo pretende-se fazer uma descrição da metodologia adotada para realizar o estudo da dispersão do efluente térmico da Central Termoelétrica de Sines. A primeira parte deste capítulo consiste na descrição do modelo matemático, MOHID, utilizado neste estudo. De seguida é explicado o modo como foi configurado o modelo para representar e simular a região em estudo, sendo ainda demonstrada a validação do modelo implementado. Por fim são descritos os cenários aplicados neste estudo.

3.1 Modelo matemático MOHID

O modelo MOHID, acrónimo para Modelo Hidrodinâmico, é um modelo numérico programado em Fortran 95, que permite a modelação a três dimensões de um corpo de água. Este modelo tem vindo a ser desenvolvido no centro de investigação MARETEC (*Marine and Environmental Technology Research Center*) sediado no Instituto Superior Técnico (IST). O MOHID recorre à programação orientada por objetos permitindo por isso uma modelação integrada de vários processos, a diferentes escalas e aplicado a vários ambientes físicos, como estuários, bacias hidrográficas ou oceano (MARETEC 2014b). Esta filosofia de modelação integrada possibilita a simulação de vários modelos encaixados em simultâneo, permitindo que os submodelos obtenham as condições de fronteira dos modelos anteriores.

O programa está dividido por módulos, cada um dos quais responsável por gerir um tipo específico de informação relativa a processos (físicos e/ou químicos e/ou biológicos) que interagem entre si. O módulo *Hydrodynamic* calcula a evolução das propriedades não turbulentas do escoamento, como o nível, as velocidades e os fluxos de água (Leitão 2002). A evolução destas propriedades é calculada a partir de balanços de quantidade de movimento e continuidade em volumes de controlo num sistema de coordenadas cartesianas. A discretização espacial destas equações é feita recorrendo ao método dos volumes finitos. Este método permite definir explicitamente os parâmetros geométricos da malha, não sendo necessário uma transformação das coordenadas (Martins 1999). Deste modo, podem ser implementados diversos tipos de geometria de malha, sendo por isso possível a aplicação do modelo a locais de geometrias variáveis.

É no módulo *Geometry* que se define a geometria vertical do domínio, podendo subdividir a coluna de água em diferentes tipos de coordenadas, entre as quais as coordenadas sigma e cartesianas (Figura 18). As camadas cartesianas são fixas no domínio enquanto as camadas sigma são variáveis com a batimetria ou com a superfície.



Figura 18 Domínio com 4 camadas cartesianas (à esquerda) e 4 camadas sigma (à direita).

Fonte: MARETEC, 2012.

O módulo *Turbulence* recebe informação do módulo *Hydrodynamic* sobre as velocidades horizontais e verticais, parametrizando com base nestas as características turbulentas do escoamento (Leitão 2002). O módulo *Water Properties* modela a evolução das várias propriedades da água, entre as quais a temperatura, a salinidade e a densidade, recorrendo a uma abordagem Euleriana (MARETEC 2014c).

Os processos que ocorrem entre a superfície da água e a atmosfera são geridos pelo módulo *Interface Water Air*. Este módulo calcula as condições de fronteira na superfície livre de água (como por exemplo a tensão do vento; a radiação solar; o calor latente ou calor sensível) através dos dados meteorológicos impostos no módulo *Atmosphere* (MARETEC 2012).

3.1.1 Equações

O modelo resolve as equações de conservação de quantidade de movimento horizontal (ρu e ρv), temperatura (T), salinidade (S_a) e a equação da continuidade (conservação da massa) para calcular a evolução da velocidade vertical (w) e o nível de água (η).

Como já foi referido, a discretização espacial das equações é feita recorrendo ao método dos volumes finitos que se baseia na formulação integral das equações, sendo apresentadas na forma integral. A equação geral de conservação de uma qualquer propriedade α (Equação 1) é a equação base para as equações resolvidas pelo modelo. A variação de uma propriedade (α), a ser conservada num volume de controlo (\mathcal{V}), depende dos fluxos (\vec{f}_α) que atravessam a superfície de fronteira (S), com normal exterior definida por (\vec{n}), e do balanço entre fontes e poços (F-P) dentro do volume de controlo.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\mathcal{V}} \alpha d\mathcal{V} = - \oint_S \vec{f}_\alpha \cdot \vec{n} dS + F - P \quad (\text{Equação 1})$$

3.1.1.1 Propriedades não Turbulentas do escoamento

3.1.1.1.1 Quantidade de movimento horizontal

As velocidades horizontais em x e y, dadas por $\vec{V}_H = (u, v)$, são calculadas a partir da equação da quantidade de movimento que pode ser obtida através da Equação 1. Neste caso assume-se que a

propriedade cuja evolução se pretende estudar é a quantidade de movimento no plano horizontal ($\alpha = \rho \vec{V}_H$) (Leitão 2002).

Para este caso, os fluxos, definidos por \vec{f}_α na Equação 1, representam fluxos de quantidade de movimento por unidade de volume, devendo por isso ser interpretados como forças. Estas forças, exercidas num volume de fluido, são: forças viscosas, forças de pressão, forças gravíticas e forças de tensão de corte exercidas à superfície e no fundo. É ainda adicionado um termo que define a aceleração de Coriolis ($\int_V \rho 2\vec{\Omega} \times \vec{V}_H dV$), que permite que a equação da quantidade de movimento seja aplicada num referencial solidário com a Terra (Leitão 2002).

A equação de quantidade de movimento horizontal resolvida pelo modelo é obtida admitindo as hipóteses de equilíbrio hidrostático e a aproximação de Boussinesq (MARETEC 2012). No caso da aproximação de Boussinesq, assume-se que a densidade é constante para o cálculo das forças de inércia. Esta aproximação tem por base o fato de nas águas dos oceanos e nas zonas costeiras não haver uma grande variação de densidade (Leitão 2002).

A hipótese hidrostática permite simplificar o balanço da quantidade de movimento na vertical, desprezando os termos de inércia e admitindo que o gradiente de pressão vertical está em equilíbrio com a força de gravidade. Esta hipótese baseia-se no fato de a escala horizontal do oceano ser várias ordens de grandeza superior à escala vertical (Martins 1999), levando a que a componente vertical da velocidade seja várias ordens de grandeza inferior às horizontais. O termo relativo às forças de pressão é ainda discretizado em pressão barotrópica e pressão baroclínica. A componente barotrópica contabiliza o efeito do gradiente de nível sobre a pressão e tem um carácter 2D, já a componente baroclínica contabiliza o efeito do gradiente de densidade e tem um carácter 3D (Leitão 2002).

Aplicando as hipóteses e simplificações à Equação 1, pode-se obter a equação final (Equação 2) que traduz a evolução da quantidade de movimento horizontal formulada matematicamente da seguinte forma (Mateus et al. 2012):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial}{\partial t} \int_V \vec{V}_H dV = & \underbrace{- \oint_S \vec{V}_H (\vec{V} \cdot \vec{n}) dS}_{\text{Aceleração advectiva}} + \underbrace{\oint_S v_T (\vec{\nabla} (\vec{V}_H) \cdot \vec{n}) dS}_{\text{Fluxo difusivo}} \\
& - \underbrace{g \oint_S (\eta - z) \cdot \vec{n} dS}_{\text{Pressão Barotrópica}} - \underbrace{g \oint_S \left(\int_z^\eta \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \right) \cdot \vec{n}_H dS}_{\text{Pressão Baroclínica}} \\
& - \frac{1}{\rho_0} \oint_S p_{atm} \cdot \vec{n}_H dS + \underbrace{\int_V 2\vec{\Omega} \times \vec{V}_H dV}_{\text{Aceleração de Coriolis}} - \underbrace{\oint_S \Phi \vec{n} dS}_{\text{Potencial Gravitacional}} \\
& + \underbrace{\oint_S \vec{\tau} dS}_{\text{Tensão de corte}}
\end{aligned} \tag{Equação 2}$$

3.1.1.1.2 Cota da superfície livre

A evolução da cota da superfície livre também é calculada pelo módulo hidrodinâmico, assumindo que esta evolução depende apenas dos fluxos de água horizontais. Neste caso a propriedade é a massa volúmica $P = \rho$ e as fontes e poços podem ser descargas ou processos de evaporação e precipitação. A Equação 1 fica assim na seguinte forma (Leitão 2002).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV = - \oint_S \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dS + \text{Descargas} + \text{Precipitação} - \text{Evaporação} \tag{Equação 3}$$

3.1.1.1.3 Quantidade de movimento vertical

A velocidade vertical é obtida aplicando, à equação da continuidade para um fluido incompressível, o teorema da divergência e a regra da integração de Leibniz, resultando na Equação 4.

$$W(z) = \partial_x \int_{-H}^z u dz + \partial_y \int_{-H}^z v dz. \tag{Equação 4}$$

O modelo MOHID para além de calcular a evolução das propriedades de forma discreta no espaço também as calcula de forma discreta no tempo. Por esta razão às equações anteriores é ainda aplicada a regra de decomposição à Reynolds, descrita em Leitão (2002). Com esta técnica os valores instantâneos das propriedades são dados por quantidades médias acrescidas de flutuações turbulentas.

3.1.1.2 Propriedades turbulentas do escoamento

Os processos turbulentos são computados na forma de uma viscosidade turbulenta ν . A viscosidade turbulenta horizontal pode ser constante ou variável com o gradiente de velocidades através da fórmula de Smagorinsky descrita em Leitão (2002).

Para a parametrização da viscosidade turbulenta vertical o MOHID recorre ao modelo GOTM (*General Ocean Turbulence Model*) ao qual está acoplado (MARETEC 2012). O modelo GOTM é um modelo a uma dimensão que resolve os processos relacionados com a mistura vertical ao longo da coluna de água (GOTM 2014) que pode ser conectado a modelos de três dimensões.

3.1.1.3 Cálculo das condições na fronteira vertical

Na superfície e no fundo o fluxo advectivo é considerado nulo (MARETEC 2012). O fluxo difusivo de momento é imposto na superfície de forma implícita através da tensão do vento na superfície, que é calculada com base na fórmula seguinte:

$$\vec{\tau}_W = C_a \rho_a \vec{W} |\vec{W}| \quad (\text{Equação 5})$$

Onde $\vec{\tau}_W$ é a tensão de corte exercida à superfície, $\rho_a = 1,125 \text{ Kg/m}^3$ é a densidade do ar, C_a é um coeficiente de atrito que é função da rugosidade da superfície da fronteira e \vec{W} é a velocidade do vento a 10 m acima da superfície do oceano.

No fundo o fluxo difusivo é imposto através da tensão de corte exercida pelo fundo que é calculada através da seguinte fórmula (MARETEC 2012):

$$\vec{\tau}_F = C_D \vec{V}_H |\vec{V}_H| \quad (\text{Equação 6})$$

A tensão de corte exercida pelo fundo ($\vec{\tau}_F$) depende assim do coeficiente de atrito de fundo C_D e da velocidade \vec{V}_H próxima do fundo.

3.1.1.4 Propriedades da água – Transporte Euleriano

A evolução das propriedades da água é modelada de acordo com uma equação de conservação própria, onde o fluxo convectivo, resultante das leis de conservação de momento e massa, impõe processos de mistura de natureza turbulenta ao qual acrescem os efeitos de possíveis fontes e sumidouros que a propriedade possa ter (MARETEC 2012).

A evolução da temperatura pode ser obtida pela seguinte fórmula (Mateus et al. 2012):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V T dV = - \oint_S T(\vec{V} \cdot \vec{n}) dS + \oint_S T(K\vec{\nabla}(\vec{V}_H) \cdot \vec{n}) dS + F - P \quad (\text{Equação 7})$$

Para o caso da temperatura as fontes e poços são as trocas de calor, como a radiação solar, a radiação infravermelha, calor latente e sensível e descargas pontuais.

A evolução da Salinidade pode ser dada pela seguinte equação (Mateus et al. 2012):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V S_a dV = - \oint_S S_a (\vec{V} \cdot \vec{n}) dS + \oint_S S_a (K \vec{\nabla}(\vec{V}_H) \cdot \vec{n}) dS + F - P \quad (\text{Equação 8})$$

Neste caso as fontes e poços provêm dos termos externos de transferência de massa, como evaporação, precipitação e descargas.

A densidade é calculada através da equação de estado proposta por Leenderstsee e Liu, sendo função da temperatura e da salinidade (MARETEC 2012):

$$\rho = \frac{(5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S_a)}{(1179.5 + 11.25T - 0.0745T^2) - (3.8 + 0.01T)S_a + 0.698(5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S_a)} \quad (\text{Equação 9})$$

O processo de discretização espacial particularizado para cada um dos termos das equações resolvidas pelo modelo está descrito no manual do MOHID em MARETEC (2012) e mais detalhadamente em Martins (1999).

A discretização temporal das equações é implementada através do algoritmo semi implícito ADI “*Alternate Direction Implicit*”. A descrição da metodologia de discretização temporal usada no modelo MOHID, e a discretização para cada processo pode ser encontrada no manual do MOHID em MARETEC (2012).

3.2 Implementação do modelo

O maior desafio deste trabalho consiste na implementação do modelo numérico, o MOHID, à área de estudo, permitindo simular os processos responsáveis na dispersão e transporte da pluma térmica, que deriva da descarga do efluente térmico da Central de Sines. Assim, a descrição da metodologia que permitiu a configuração deste projeto é um dos pontos principais deste trabalho.

O modelo implementado é constituído por quatro modelos encaixados, como se pode observar na Figura 19, sendo que esta configuração tem por base o método de *Downscaling* (Riflet 2010). Este método é usado para lidar com as condições na fronteira aberta, permitindo usar soluções de modelos operacionais de larga escala em modelos locais com maior resolução espacial (Ascione et al. 2014).

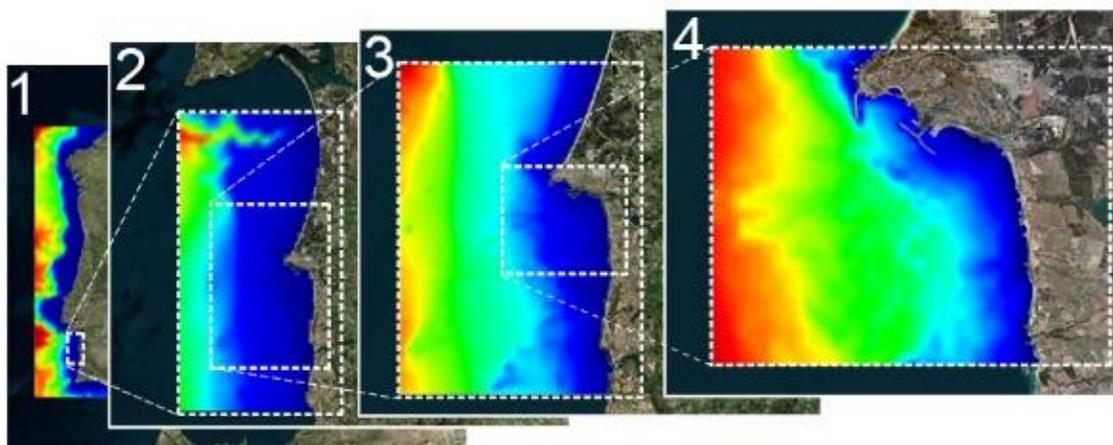


Figura 19 Implementação dos modelos encaixados.

O primeiro nível consiste numa janela de leitura dos resultados obtidos no modelo operacional PCOMS (*Operational Model for the Portuguese Coast*), descrito em Mateus et al (2012), que fornece resultados de maré, campos de velocidade, densidade, temperatura e salinidade para toda a costa portuguesa.

O modelo PCOMS é um modelo 3D hidro-biogeoquímico implementado na costa oeste da península Ibérica. Este modelo é forçado na fronteira oceânica (fronteira horizontal aberta) com os resultados do Mercator-Océan PSY2V4 (Drillet et al. 2005) e os seus níveis de água são obtidos pelo modelo global de maré FES2004 (Lyard et al. 2006). O PCOMS está ainda acoplado ao modelo de previsão atmosférica MM5 (*Mesoscale Meteorological Model 5*), descrito em Trancoso (2012), operacional no IST, que lhe fornece as condições atmosféricas impondo fluxos de momento e calor à superfície. A validação do modelo operacional PCOMS é feita comparando os resultados do modelo com dados obtidos por deteção remota e com dados obtidos por medições (Mateus et al. 2012). No Anexo III está representado um exemplo da validação do modelo PCOMS, com dados obtidos por deteção remota, para a temperatura à superfície num instante.

A partir do nível superior (janela de leitura do PCOMS), nível de maior passo espacial, são implementados mais três submodelos, em que o passo de malha vai sendo reduzido até chegar a precisão pretendida. A transição do passo de malha não deve ser demasiado abrupta entre níveis e por isso considerou-se uma transição feita com uma razão de 1:5 como indicado em Leitão (2002). Os valores referentes à resolução espacial de cada nível estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 Resolução espacial de cada nível do modelo implementado.

	Resolução espacial (graus)	Resolução espacial (Km)
Nível 1 (Resultados do PCOMS)	0,06 × 0,06	6,7 × 6,7
Nível 2	0,012 × 0,012	1,3 × 1,3
Nível 3	0,0024 × 0,0024	0,27 × 0,27
Nível 4	0,00048 × 0,00048	0,053 × 0,053

O nível 4 representa o modelo local onde se pretende simular a mistura e dispersão da pluma originada pela descarga do efluente térmico.

3.2.1 Batimetria e geometria vertical

A batimetria do primeiro nível é uma das batimetrias usadas no modelo operacional PCOMS. As batimetrias dos níveis seguintes foram feitas para este trabalho usando um ficheiro de pontos xyz com os dados de batimetria; uma malha e um polígono com informação sobre a linha de costa. Os dados com informação sobre os valores batimétricos foram obtido a partir do portal do *EMODnet Bathymetry* (European Marine Observation and Data Network 2014). Com os três ficheiros enunciados, usando as ferramentas implementadas na interface gráfica *MOHID Studio*, são interpolados os valores da batimetria para a malha pretendida em cada nível. As batimetrias implementadas estão representadas na Figura 20.

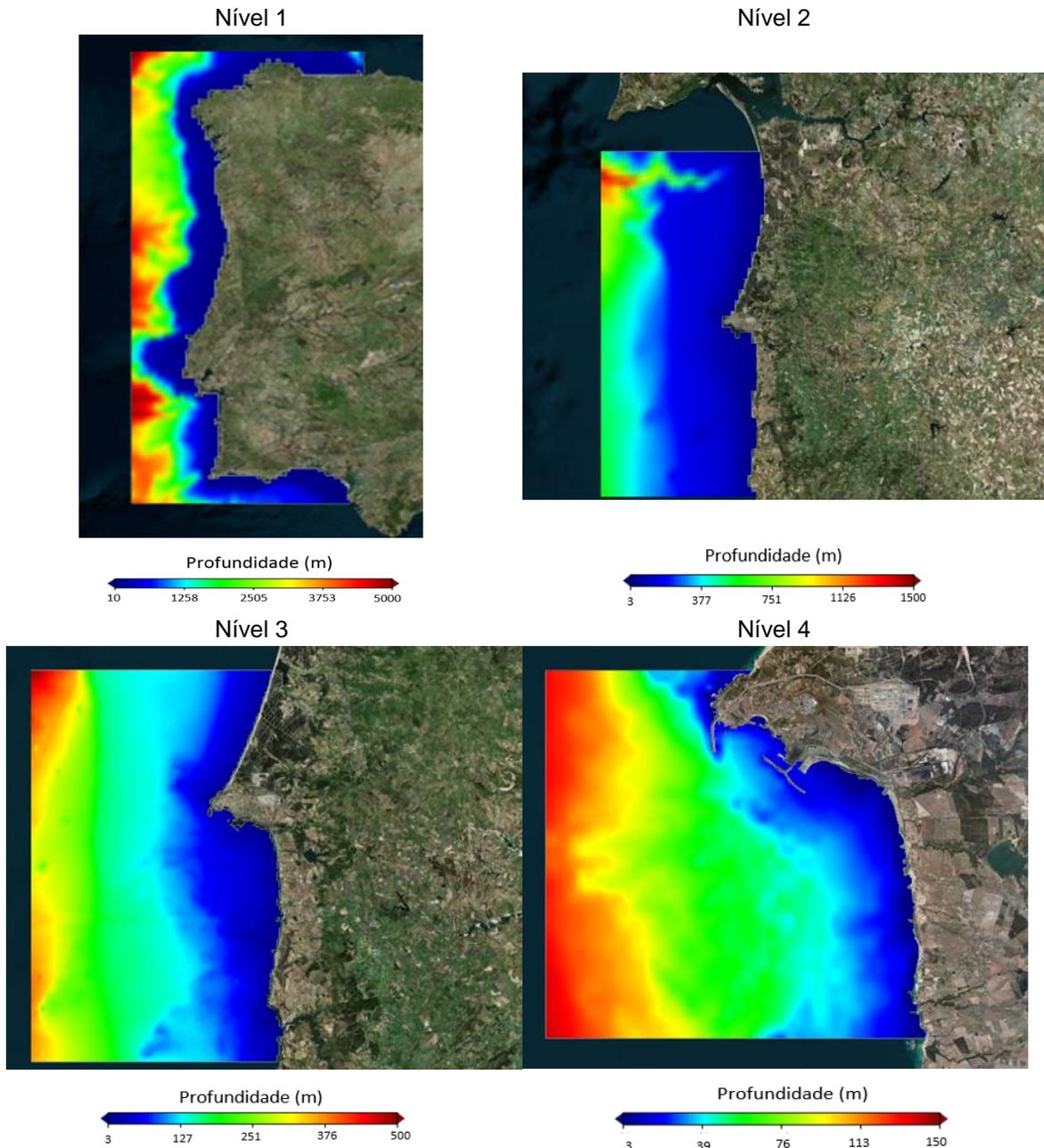


Figura 20 Batimetrias (em metros) dos quatro níveis encaixados implementados no modelo.

Quanto à configuração vertical, todos os níveis são constituídos por camadas cartesianas a partir do fundo e camadas sigma à superfície. As camadas sigma estão implementadas nos primeiros 8,68 metros em relação ao zero hidrográfico, o nível de referência no MOHID.

A Figura 21 mostra um esquema da geometria vertical usada no modelo numérico, onde a referência é o zero hidrográfico (Z_H), correspondente à mais baixa baixa-mar. O nível de referência em relação ao zero hidrográfico é o nível médio da água do mar (Z_o), que representa a média da oscilação das ondas de maré. Em cada instante o nível de água é dado por η_t . A profundidade (h), medida em

relação ao zero hidrográfico, é positiva para baixo em direção ao fundo e negativa acima do zero hidrográfico. No modelo a primeira camada (camada 1) corresponde à camada do fundo.

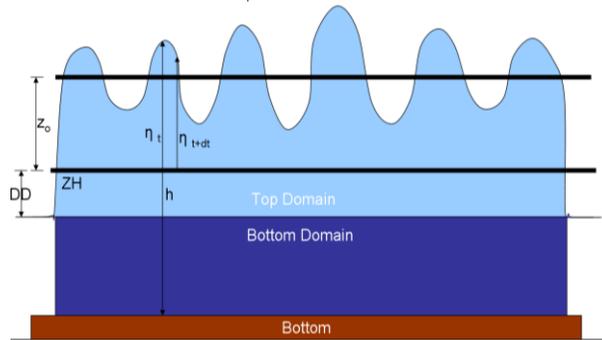


Figura 21 Geometria vertical aplicada na implementação do modelo (MARETEC 2014a).

Para todos os níveis estão definidas 7 camadas sigmas à superfície, que se adaptam à topografia local, sendo por isso a espessura destas camadas implementada em porcentagem no modelo. A espessura de cada uma das camadas sigma implementadas na modelo estão definidas na Tabela 9 do Anexo IV.

As camadas cartesianas são implementadas a partir dos 8,68 metros, medidos a partir do zero hidrográfico, até ao fundo. O número de camadas cartesianas é variável nos níveis, o primeiro nível tem 43 camadas, o segundo tem 31 camadas, o terceiro tem 28 e o último nível tem 20 camadas, a espessura das camadas implementadas está definida na Tabela 10 do Anexo IV. A espessura destas camadas é definida em metros no modelo.

3.2.2 Condições de fronteira

3.2.2.1 Condições de fronteira verticais

Na vertical a coluna de água é delimitada na superfície por uma interface ar-água, que funciona como fonte de energia cinética turbulenta e como fonte ou poço de quantidade de movimento, função da direção do vento relativamente ao escoamento (Leitão 2002). No fundo a fronteira funciona como um poço de quantidade de movimento devido ao efeito da força de atrito que é proporcional ao quadrado da velocidade.

No primeiro nível não são impostas condições na fronteira superficial porque este é apenas uma janela de leitura dos resultados do PCOMS. Nos três níveis seguintes, à superfície, são impostas forças (tensão de corte do vento) e fluxos de calor (radiação, calor latente, calor sensível). A tensão de corte exercida pelo vento é calculada de acordo com a Equação 5, implementando um coeficiente de atrito igual a 0,0025. Os dados das condições atmosféricas, necessários para impor os fluxos de

momento e calor à superfície, foram obtidos a partir do modelo meteorológico operacional MM5, acoplado ao modelo PCOMS, sendo interpolados para as malhas dos diferentes níveis.

A força de atrito exercida pelo fundo é calculada com base na Equação 6, assumindo um coeficiente de rugosidade igual a 0,0025 m, para todos os níveis.

3.2.2.2 Condições na fronteira aberta horizontal

A fronteira aberta horizontal corresponde à fronteira horizontal com outras massas de água, é a definição desta fronteira que permite confinar o domínio à região de estudo.

Os valores das variáveis na fronteira aberta da região de estudo são obtidos através do método de modelos encaixados que permite o cálculo de uma solução exterior. A metodologia dos modelos encaixados consiste em implementar a partir de modelos de maior escala modelos de menor escala (com maior resolução espacial), para os quais é interpolada a informação. A comunicação entre os modelos é feita “one way”, ou seja os resultados de cada modelo de nível superior são fornecidos ao respetivo modelo de nível inferior na fronteira horizontal aberta mas o contrário não acontece.

Para implementar as condições na fronteira aberta, dadas por cada modelo de nível superior ao respetivo modelo de nível inferior, podem ser usados métodos radiativos e /ou métodos de relaxação (Riflet 2010). Para a temperatura, para a salinidade e para as velocidades, a condição na fronteira aberta é aplicada através de um esquema de relaxação do escoamento (FRS). O esquema FRS permite que numa camada de 10 células (*sponge layer*), junto à fronteira, a solução seja relaxada para a solução exterior. Aos níveis é aplicada uma condição de radiação do tipo Flather nos pontos da fronteira, que permite radiar a diferença entre a solução de referência e a solução do modelo com passo de malha mais refinado (Riflet 2010).

3.2.3 Implementação do circuito de refrigeração da Central- Captação e descarga de água

Para simular a tomada e a descarga de água executadas pela central termoelétrica de Sines foram implementados um sumidouro e três fontes no nível 4, que é o nível que representa a região em estudo. A Figura 22 mostra a região de tomada de água e as zonas de descarga de efluente térmico.

A captação de água, representada pelo sumidouro no modelo, é feita numa célula junto à bacia de decantação na sua camada superficial com um caudal constante igual a 40 m³/s, que é o caudal máximo estabelecido na LA.

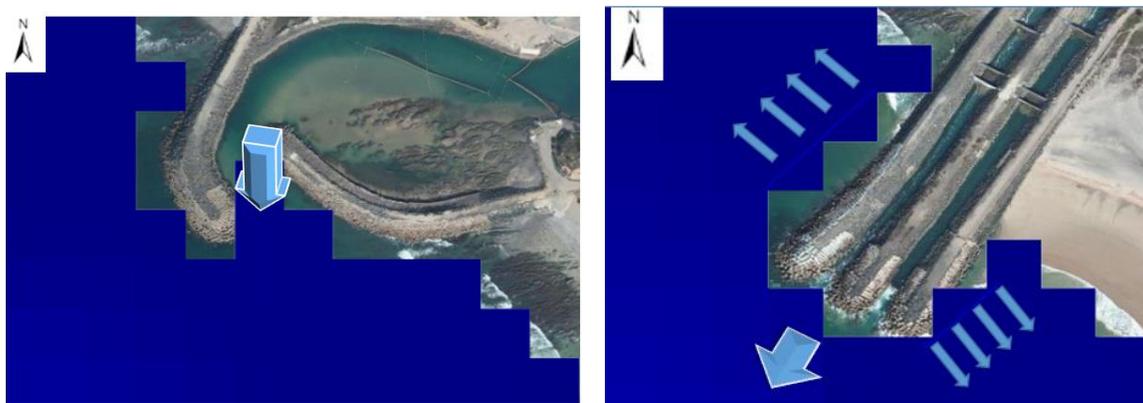


Figura 22 Zona de tomada de água (à esquerda) e zonas de descarga (à direita).

A descarga é feita em três locais: numa célula frontal e em duas linhas laterais. Na célula frontal considera-se uma descarga de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ao longo da coluna de água com velocidade igual a 0.7 m/s . Para calcular a velocidade teve-se em conta que cada canal tem uma secção de 22 m^2 , como a descarga de $30 \text{ m}^3/\text{s}$ é referente à soma da descarga dos dois canais considera-se uma secção de 44 m^2 , obtendo-se assim uma velocidade de $0,7 \text{ m/s}$.

As descargas laterais são feitas em linha, ao longo da coluna de água, com um caudal de $5 \text{ m}^3/\text{s}$. Com estas descargas laterais pretende-se simular a água que percola pelos vazios que se formam nos molhes que delimitam os canais.

Através de uma função implementada no modelo, função *Bypass*, define-se que a água captada é transferida para os três locais de descarga com um aumento de 10°C na temperatura. Com esta função pretende-se assim simular o aumento de temperatura que a água sofre no processo de refrigeração na central, e fazer com que a temperatura da água à saída varie com a temperatura da água na entrada.

3.2.4 Simulações

As condições iniciais em cada nível são interpoladas a partir de cada modelo de nível superior para o respetivo submodelo, de maior resolução espacial. O que permite que o modelo inicie com as condições do modelo PCOMS, já estável e validado.

Para iniciar uma simulação aplicaram-se condições de *slow start*, permitindo que as forças sejam ativadas lentamente. Para a tensão de corte exercida pelo vento e para a pressão atmosférica definiu-se que o modelo só considera o efeito total do vento após um período de 43200 segundos, ao longo deste período a amplitude da tensão de corte exercida pelo vento é multiplicada por um coeficiente que evolui linearmente entre zero e um.

O passo temporal definido para cada simulação é igual a 180, 60, 30 e 15 segundos para o nível 1, 2, 3 e 4 respetivamente.

3.3 Validação

Para validar o modelo implementado foram usados dados medidos no meio através da boia localizada no porto de Sines e através de registos obtidos em campanhas de monitorização.

O nível 3 é validado, comparando os resultados obtidos pelo modelo, para a temperatura ao longo da coluna de água, com os registos obtidos nas campanhas de monitorização realizadas pelo centro de investigação MARETEC. Estas campanhas foram realizadas no âmbito do programa “Monitorização do ambiente marinho junto e na envolvente mais afastada do emissário submarino de Sines”. A localização geográfica da estação onde foram obtidos os registos utilizados neste trabalho está descrita no Anexo I.

Para validar o nível 4, que é o nível onde se simula a dispersão da pluma térmica, são comparados os resultados obtidos através do modelo, para a temperatura e para o nível de água do mar, com os dados medidos pela boia de Sines, cuja localização está descrita no Anexo I. Neste nível são ainda comparados os resultados de temperatura calculada pelo modelo com os registos da monitorização realizada na zona adjacente à descarga, pela direção da Central Termoelétrica.

Para analisar a concordância entre os resultados obtidos na validação do modelo e os registos *in situ* são utilizadas algumas ferramentas estatísticas. O valor médio (\bar{x}), calculado através da Equação 10, define o valor com maior probabilidade de ocorrência. O desvio padrão (σ) quantifica a dispersão em relação ao valor médio e é obtido a partir da Equação 11.

Os parâmetros frequentemente usados para comparar os resultados calculados pelo modelo (M) com os registos observados *in situ* (O) são o coeficiente de correlação (R), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o enviesamento (BE, Bias Error).

O coeficiente de correlação de Pearson (Equação 12) tem um limite superior igual a 1, indicando uma correlação linear positiva perfeita, e um limite inferior igual a -1, correspondendo a uma correlação linear negativa. Assim, este coeficiente permite medir o grau e a direção (positiva ou negativa) da relação linear entre os resultados do modelo e os valores observados.

A raiz do erro quadrático médio é a raiz quadrada da média das diferenças individuais quadráticas entre os resultados do modelo e as observações, estimando a magnitude do erro associado à previsão do modelo. Quanto menor for este valor melhor é a aproximação entre os valores do modelo e os registos *in situ*.

O enviesamento mede a tendência do modelo para sobrestimar ou subestimar uma variável, estimando a direção do erro associado à previsão do modelo.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (\text{Equação 10})$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\chi_i - \bar{\chi})^2} \quad (\text{Equação 11})$$

$$R(\chi_i^M, \chi_i^O) = \frac{\sum_{i=1}^N (\chi_i^M - \bar{\chi}_i^M)(\chi_i^O - \bar{\chi}_i^O)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\chi_i^M - \bar{\chi}_i^M)^2 \sum_{i=1}^N (\chi_i^O - \bar{\chi}_i^O)^2}} \quad (\text{Equação 12})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\chi_i^M - \chi_i^O)^2} \quad (\text{Equação 13})$$

$$BE(\chi) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \chi_i^M - \chi_i^O \quad (\text{Equação 14})$$

Nas equações N é o número total de observações/resultados do modelo e os índices M e O indicam resultado dado pelo modelo e observações respetivamente.

3.4 Cenários

Foram simulados, no modelo implementado, quatro cenários diferentes, para estudar a dispersão e mistura da pluma térmica. Os cenários foram escolhidos tendo por base simular a pluma térmica sob diferentes condições de temperatura do ar e da água e diferentes regimes de vento. As condições de cada cenário estão descritas na Tabela 3 e na Figura 23.

Tabela 3 Condições do clima e do meio recetor nos dias dos cenários.

Cenário	Temperatura média do ar (°C)	Temperatura média da água à superfície (°C)	Índice de upwelling médio (m ³ s ⁻¹ km ⁻¹)
Janeiro 2013	14	16	-128
Agosto 2013	21	21	754
Outubro 2013	20	21	-143
Janeiro 2014	13	15	619

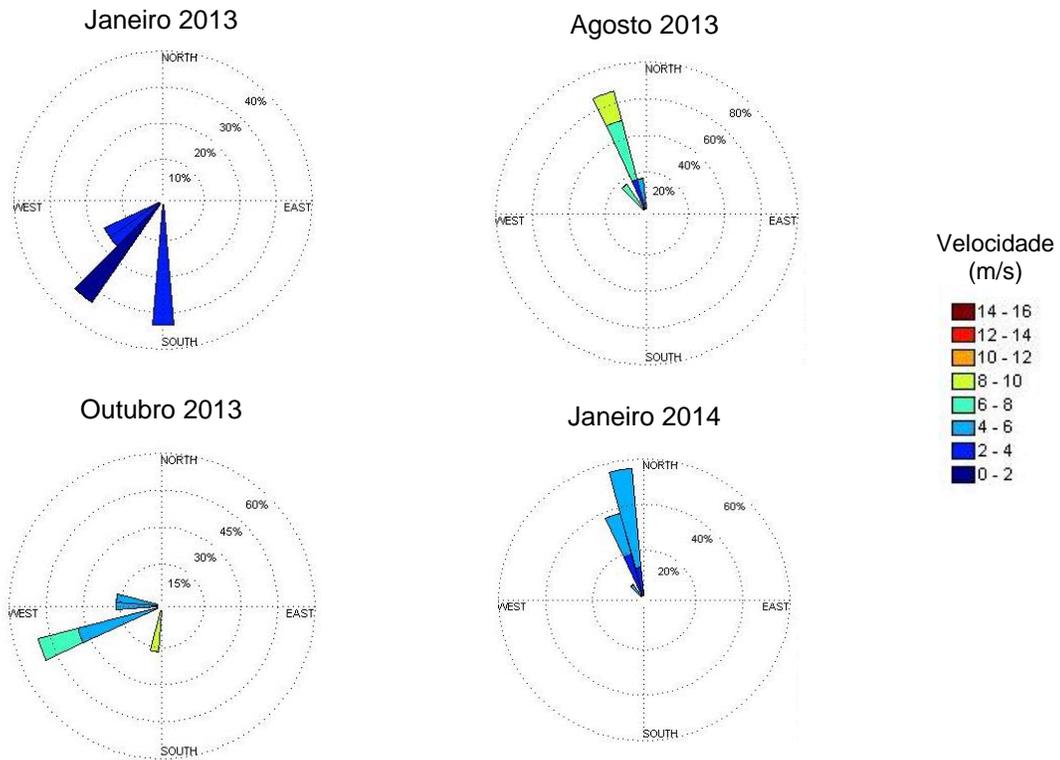


Figura 23 Direção e intensidade do vento registados nos dias dos diferentes cenários. Adaptado de Citizen Weather Observer Program (2014).

4 Resultados

Com este capítulo pretende-se mostrar e analisar os resultados obtidos com a aplicação do modelo numérico aos diferentes cenários. Na primeira secção do capítulo são descritos os resultados obtidos na validação dos resultados do modelo, em diferentes domínios, com os dados obtidos *in situ*.

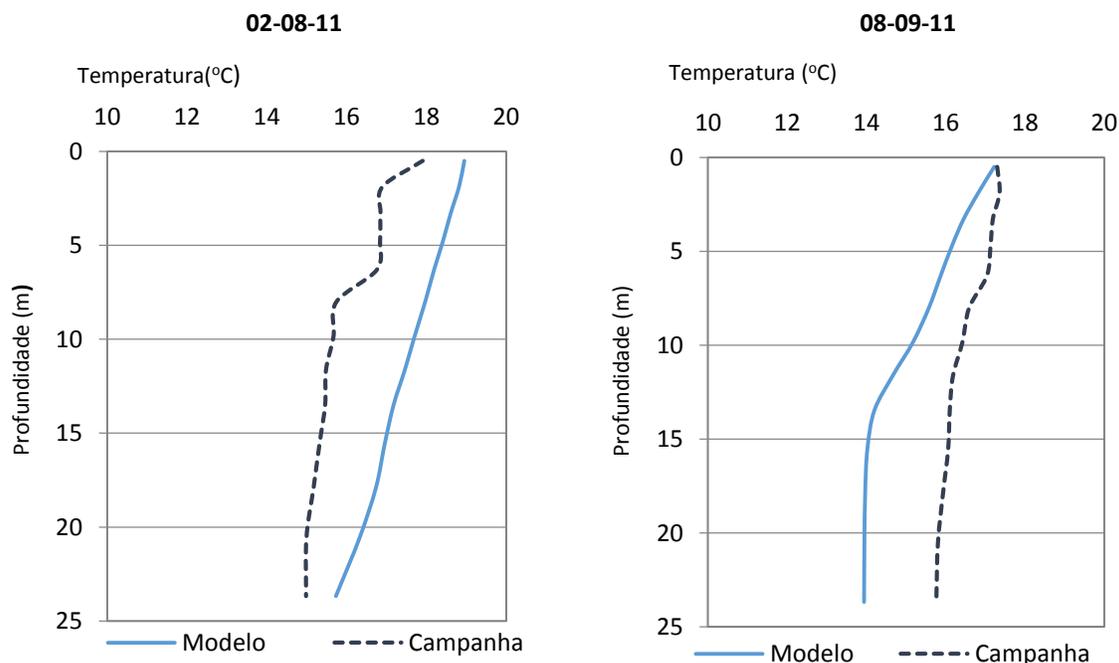
Na segunda secção são apresentados os resultados obtidos para uma situação sem descarga de efluente térmico, em todos os cenários, obtendo-se assim uma situação de referência que possibilite perceber quais os principais efeitos da descarga do efluente térmico na dinâmica da zona costeira envolvente. Os resultados obtidos nesta situação de referência são depois comparados com os resultados obtidos numa situação com descarga de efluente térmico.

É ainda analisado o comportamento da pluma térmica em diferentes condições ambientais, para determinar os fatores condicionantes da sua dispersão e mistura.

Por fim, estão expostos os resultados obtidos para na análise do cumprimento do valor limite de emissão nos diferentes cenários.

4.1 Validação

Os dados obtidos nas campanhas de monitorização permitem validar os perfis de temperatura no subdomínio 3, para 4 datas diferentes. A Figura 24 mostra os diferentes perfis de temperatura calculados pelo modelo e os dados registados nas campanhas de monitorização.



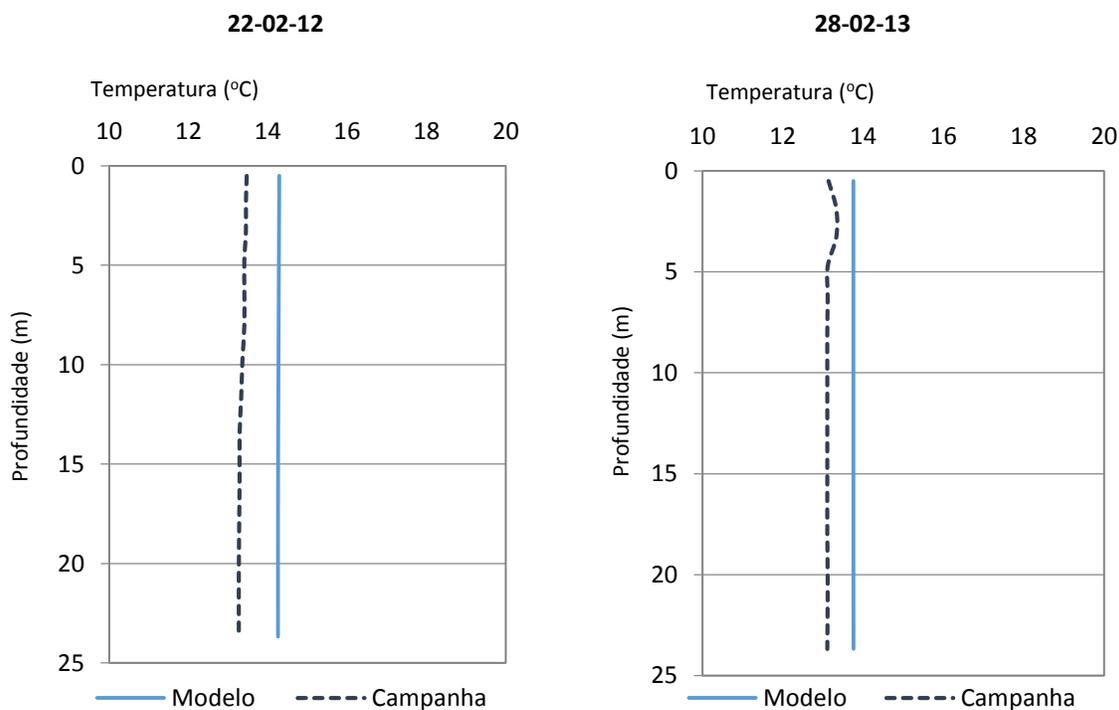


Figura 24 Comparação dos resultados obtidos no modelo, para o nível 3, com as medições efetuadas *in situ* para os perfis de temperatura.

Tabela 4 Parâmetros estatísticos para validação do nível 3 com os registos das campanhas de monitorização para o perfil de temperatura.

	02-08-11	08-09-11	22-02-12	28-02-13
$\bar{x} \pm \sigma$ Modelo (°C)	17,62 ± 0,96	15,23 ± 1,15	14,27 ± 0,01	13,76 ± 0,00
$\bar{x} \pm \sigma$ Campanha (°C)	16,01 ± 0,90	16,53 ± 0,58	13,36 ± 0,07	13,15 ± 0,08
R	0,91	0,98	0,98	-0,27
RMSE (°C)	1,66	1,43	0,91	0,62
BE (°C)	1,61	-1,30	0,91	0,61

Observando a Figura 24 verifica-se que o modelo, de um modo geral, segue a tendência de variação de temperatura obtida nas campanhas de monitorização. Observando-se uma diminuição da temperatura com a profundidade, nos meses mais quentes, e um perfil mais homogéneo nos meses mais frios. Contudo o modelo não consegue representar as pequenas variações registadas nos primeiros 10 metros, o que se pode dever à baixa resolução deste nível. Para além disso, há que ter em consideração que nas campanhas de monitorização os dados são registados num ponto enquanto que no modelo os resultados são valores médios da camada onde está localizado cada ponto considerado na campanha.

Em quase todos os casos o coeficiente de correlação é positivo e é próximo de 1 (Tabela 4), indicando uma correlação linear positiva. De um modo geral o modelo tende a sobrestimar a temperatura, uma vez que o enviesamento é positivo exceto em Setembro de 2011 onde a temperatura calculada pelo modelo é menor que a temperatura registada na campanha.

Globalmente os valores de temperatura calculada pelo modelo aproximam-se bastante dos valores medidos *in situ*, diferindo 0,62 °C no mínimo e no máximo 1,62 °C.

A Figura 25 e a Figura 26 mostram a comparação entre os resultados obtidos através do modelo, para a temperatura e para o nível de água do mar, no nível 4, e os dados medidos pela boia de Sines.

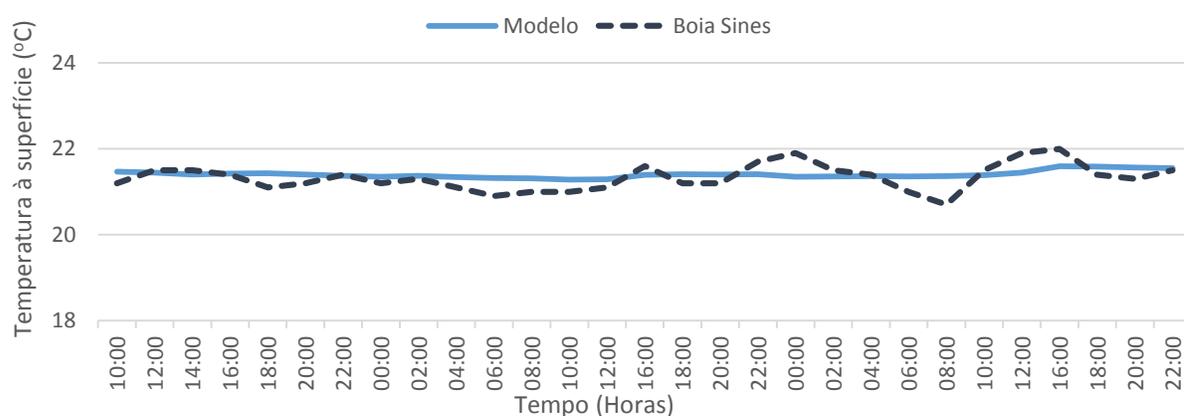


Figura 25 Comparação dos resultados obtidos no modelo, para o nível 4, com os registos da boia localizada no porto de Sines, para a temperatura superficial da água de 2 a 4 de Outubro.

Tabela 5 Parâmetros estatísticos de validação do nível 4 com os dados registados na boia de Sines para a temperatura superficial, entre 2 e 4 de Outubro de 2013.

$\bar{x} \pm \sigma$ Modelo (°C)	21,41 ± 0,08
$\bar{x} \pm \sigma$ Boia Sines (°C)	21,20 ± 0,31
R	0,11
RMSE (°C)	0,49
BE (°C)	0,21

Observando a Figura 25 verifica-se que a temperatura à superfície calculada pelo modelo não apresenta a variabilidade registada na boia de Sines. Há uma tendência do modelo para sobrestimar este parâmetro, uma vez que o enviesamento é positivo (Tabela 5). O fato de o modelo não representar as variações de temperatura à superfície registada pela boia pode dever-se a várias questões, nomeadamente ao fato de a temperatura superficial do modelo representar a temperatura média na camada superficial que neste local tem aproximadamente 1 metro de espessura, não sendo

exatamente a temperatura à superfície no local exato onde está localizada a boia. Para além disso, há que ter em consideração que os instrumentos de medição, como uma boia, também têm erros associados. A variabilidade na temperatura registada pela boia pode ainda estar associada à sua sensibilidade aos fatores climáticos, como a temperatura do ar e o vento, uma vez que o sensor que mede a temperatura da superfície está localizado mesmo à superfície.

Apesar do modelo não apresentar uma variação de temperatura, na camada superficial, igual à registada na boia de Sines, a diferença entre o valor calculado pelo modelo e os dados registados pela boia é de 0,49 °C (Tabela 5) que é um valor baixo. Pode-se concluir que a temperatura superficial calculada pelo modelo aproxima-se da temperatura registada na boia de Sines.

A Figura 26 e a Tabela 6 mostram os níveis calculados pelo modelo e os níveis registados pela boia e os parâmetros estatísticos.

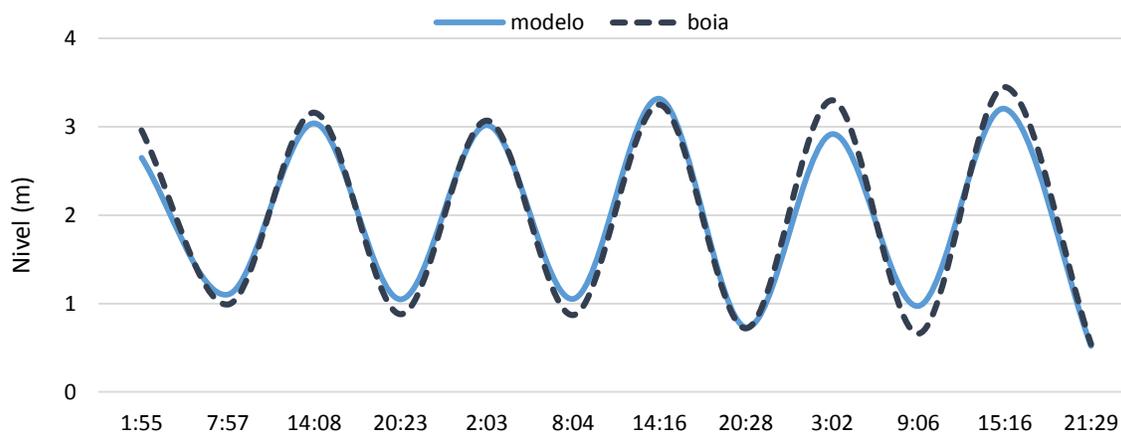


Figura 26 Comparação dos resultados obtidos no modelo, para o nível 4, com os registos da boia localizada no porto de Sines, para o nível da água de 2 a 4 de Outubro de 2013.

Tabela 6 Parâmetros estatísticos de validação do nível 4 com os registos da Boia de Sines para o nível, entre 2 e 4 de Outubro de 2013.

$\bar{x} \pm \sigma$ Modelo (m)	1,97 ± 1,05
$\bar{x} \pm \sigma$ Boia Sines (m)	1,98 ± 1,18
R	0,99
RMSE (m)	0,19
BE	-0,01

Observando a Figura 26 verifica-se que os resultados calculados pelo modelo aproximam-se dos dados registados na boia de Sines. O nível de água do mar calculado pelo modelo varia de forma semelhante ao registado na boia, sendo o coeficiente de correlação igual a 0,99 (Tabela 6). A

diferença entre os resultados, calculado pelo modelo, e os dados registados na boia é de 0,19 metros.

Através dos resultados da monitorização na região, disponibilizados pela EDP, é possível validar também no nível 4, a temperatura no meio recetor junto à descarga. A monitorização relativa à temperatura foi realizada através de leituras de temperatura da água do mar, ao longo da coluna de água, numa zona circundante à zona de rejeição. Os valores registados nas medições realizadas no dia 4 de Setembro de 2012 foram comparados com os obtidos pelo modelo no mesmo dia. Na monitorização a medição foi feita numa região de referência que se situa fora da região da mancha térmica, a norte da descarga, e numa região sob influência da zona de descarga. Na Figura 27 estão representados os perfis de temperatura calculados pelo modelo e registados durante a monitorização para o dia 4 de Setembro de 2012.

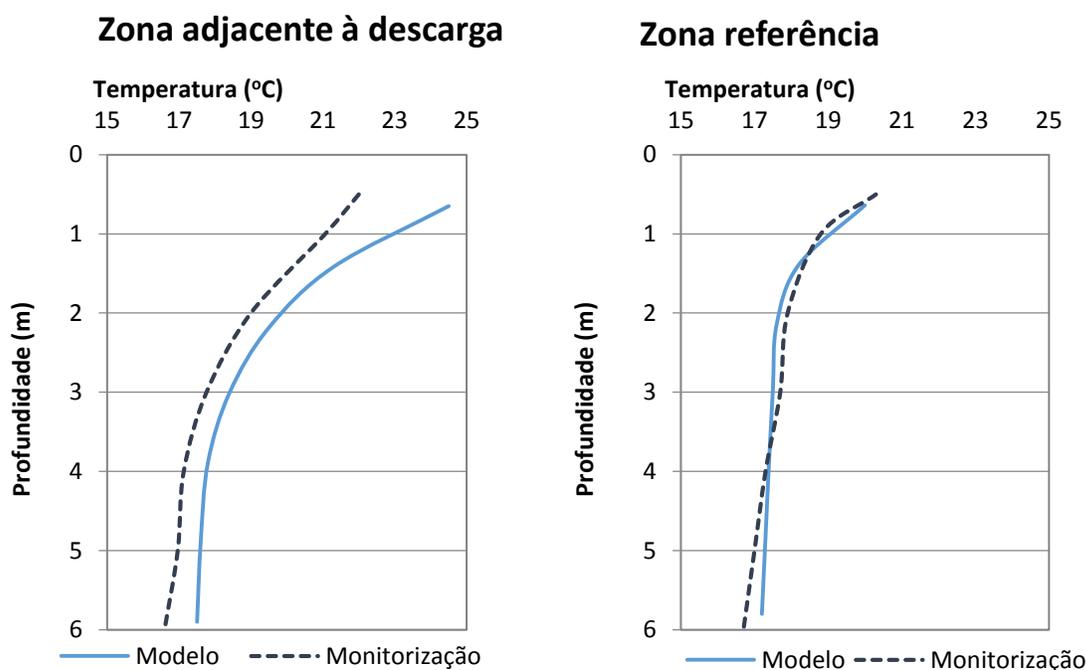


Figura 27 Comparação entre os registos obtidos na monitorização, à região adjacente à descarga, com os resultados obtidos pelo modelo para os perfis de temperatura, no dia 4 de Setembro de 2012.

Tabela 7 Parâmetros estatísticos de validação do nível 4 com os registos da monitorização, na zona adjacente à descarga (à esquerda) e numa zona de referência (à direita), para o perfil de temperatura, no dia 4 de Setembro de 2012.

Zona adjacente à descarga		Zona referência	
$\bar{x} \pm \sigma$ Modelo (°C)	19,51 ± 2,39	$\bar{x} \pm \sigma$ Modelo (°C)	17,89 ± 2,39
$\bar{x} \pm \sigma$ Monitorização (°C)	18,65 ± 1,98	$\bar{x} \pm \sigma$ Monitorização (°C)	17,96 ± 1,15
R	0,97	R	0,97

RMSE (°C)	1,11	RMSE (°C)	0,36
BE	0,93	BE	-0,07

Através Figura 27 observa-se que o modelo reproduz resultados, para a temperatura, muito próximos dos registados no ambiente simulado. O coeficiente de correlação é positivo e muito próximo de 1, tanto na zona de referência como na zona adjacente à descarga, portanto o modelo segue uma tendência de variação de temperatura igual à observada na monitorização. Mostra-se assim que o modelo mais refinado consegue representar bem a realidade e o pior resultado no modelo mais grosseiro não têm influência nos resultados. Este é o modelo mais importante, pois é este o nível que representa a região de estudo.

Observa-se que o modelo difere cerca de 1°C em relação aos valores observados, no caso da zona adjacente à descarga, e 0,4 °C na zona de referência. A diferença maior de temperatura, entre o modelo e as observações, poderá estar relacionada com as hipóteses assumidas para a descarga. Tendo em conta que não havia registos diários de dados relativos à tomada e descarga de água, usada na refrigeração da central termoelétrica de Sines, foram assumidos os valores médios anuais disponíveis que podem diferir dos valores reais para este dia em concreto.

4.2 Cenário de referência

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos, na região de estudo, após simulação sem a descarga do efluente térmico, pretendendo-se mostrar como é que se comporta o meio sem a presença do sistema de refrigeração da central.

Em cada cenário estão representadas as imagens referentes à distribuição superficial de temperatura e do módulo de velocidade, relativas a um instante da simulação. Estão ainda representados os perfis de temperatura cujo corte está representado na figura de distribuição superficial de temperatura.

4.2.1 Janeiro de 2013

Este cenário representa uma simulação sem descarga num instante em que se regista vento do quadrante sul e temperatura do ar e do meio baixas.

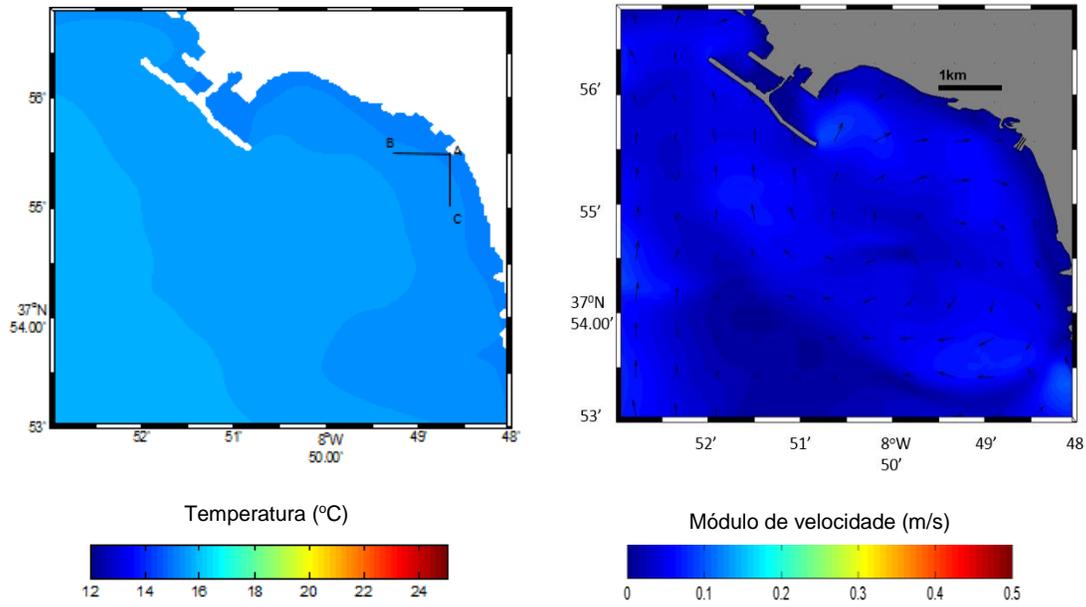


Figura 28 Distribuição de temperatura e do módulo da velocidade à superfície, no cenário de referência, no dia 5 de janeiro de 2013.

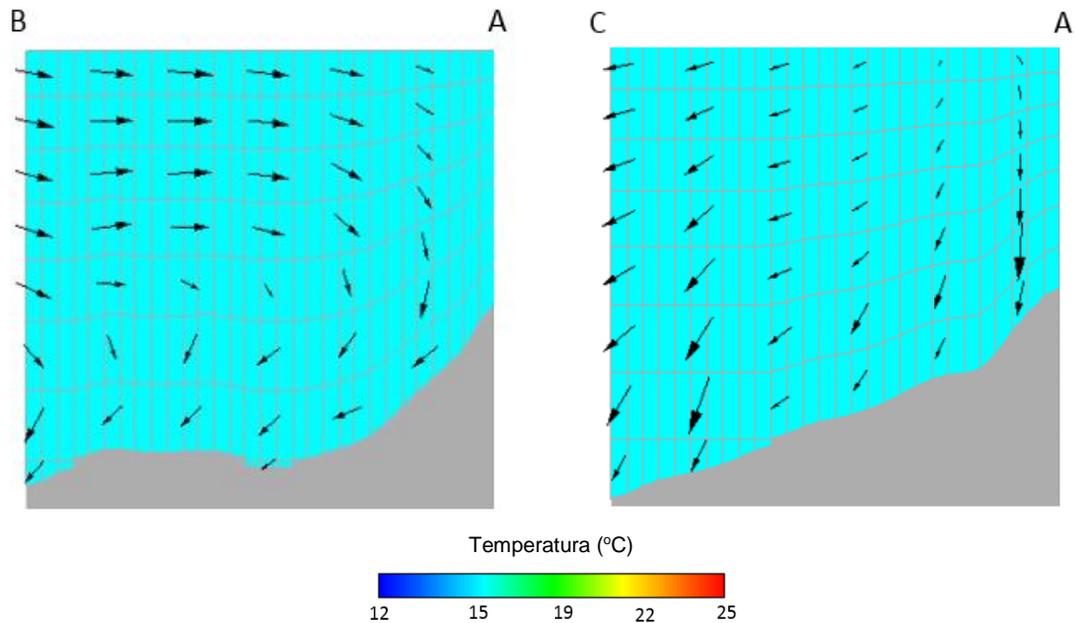


Figura 29 Perfis de temperatura (°C) no cenário de referência para o dia 5 de janeiro de 2013.

Na Figura 28 observa-se que, num cenário sem descarga de efluente térmico na zona de estudo, a distribuição de temperatura à superfície é muito homogénea variando entre os 15 e os 16 °C. Relativamente à distribuição de velocidades, também se observa uma homogeneidade no meio, em quase toda a região a velocidade é de cerca de 0,1m/s. Quanto à direção, observam-se correntes para norte que se formam devido aos ventos sul. Observa-se ainda que na região que compreende o porto de Sines e os molhes do circuito de refrigeração há uma recirculação superficial, que se deve à configuração da linha de costa e ao regime de vento predominante.

Em relação à distribuição de temperatura ao longo dos perfis, observa-se uma coluna de água totalmente homogénea em ambos os perfis (Figura 29), com uma temperatura de cerca de 15°C. No perfil A-B é possível observar um afundamento das massas de água o que se deve ao fato da água estar a ser empurrada para a costa.

4.2.2 Agosto de 2013

A Figura 30 e a Figura 31 representam a situação de referência, sem descarga de efluente térmico, no cenário de temperatura do meio alta e com ventos de quadrante norte.

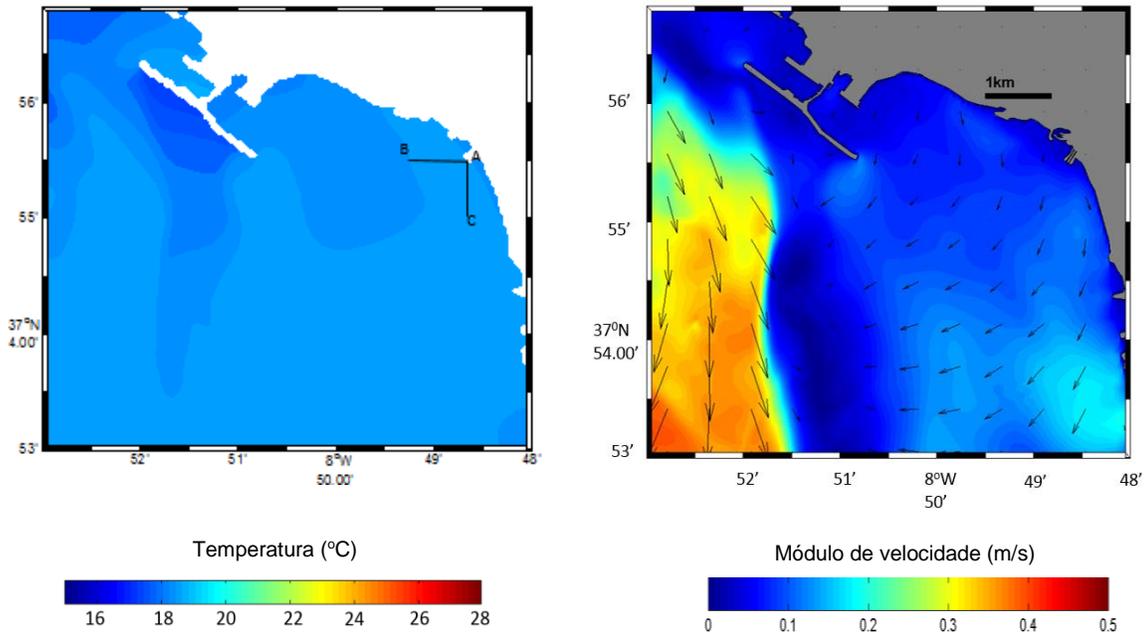


Figura 30 Distribuição de temperatura e do módulo da velocidade à superfície, no cenário de referência, no dia 6 de agosto de 2013.

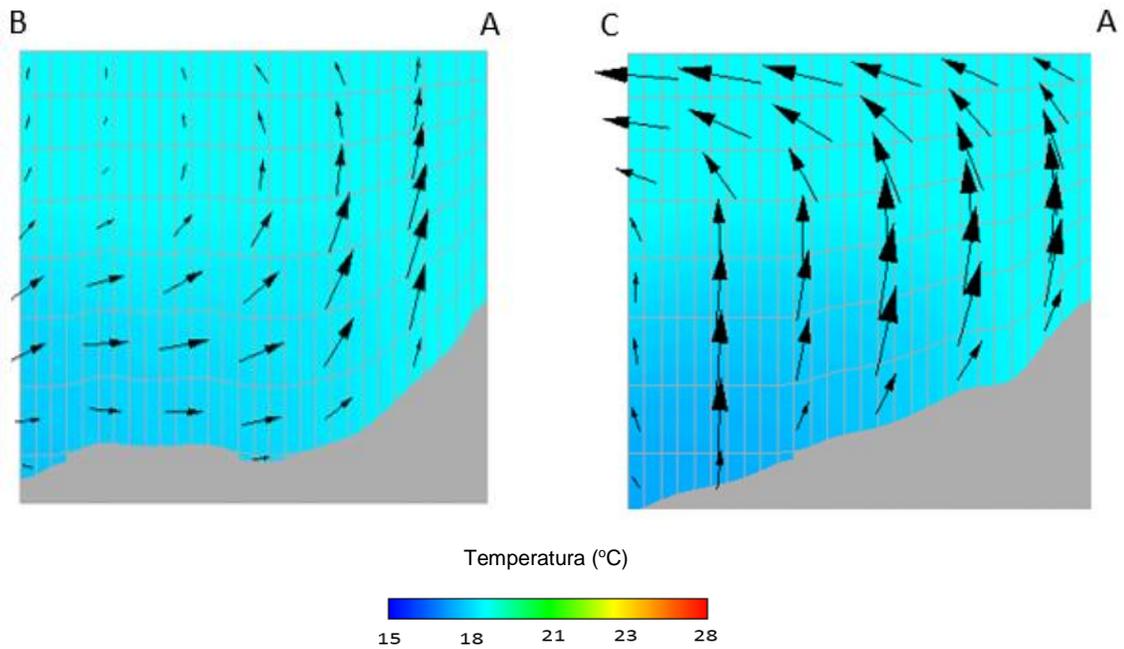


Figura 31 Perfis de temperatura (°C) no cenário de referência para o dia 6 de agosto de 2013.

Na Figura 30 observa-se que, num cenário sem descarga de efluente térmico na zona de estudo, a distribuição de temperatura à superfície é muito homogénea variando entre os 17 e os 18 °C. No que concerne às velocidades no meio, observa-se que o módulo de velocidades é variável, observando-se velocidades entre os 0,1 e 0,4 m/s. Verifica-se ainda que as correntes do meio são dirigidas maioritariamente para sul.

Ao longo da coluna de água a temperatura não é muito variável (Figura 31), observa-se uma temperatura de cerca de 17 °C em quase toda a coluna. Contudo é visível a ascensão de massas mais frias, provenientes de zonas mais profundas, a cerca de 16°C, sendo assim visível o processo de *upwelling* neste cenário.

4.2.3 Outubro de 2013

A Figura 32 e a Figura 33 representam a situação de referência, sem descarga de efluente térmico, no cenário de ventos de quadrante sul com temperatura do meio alta.

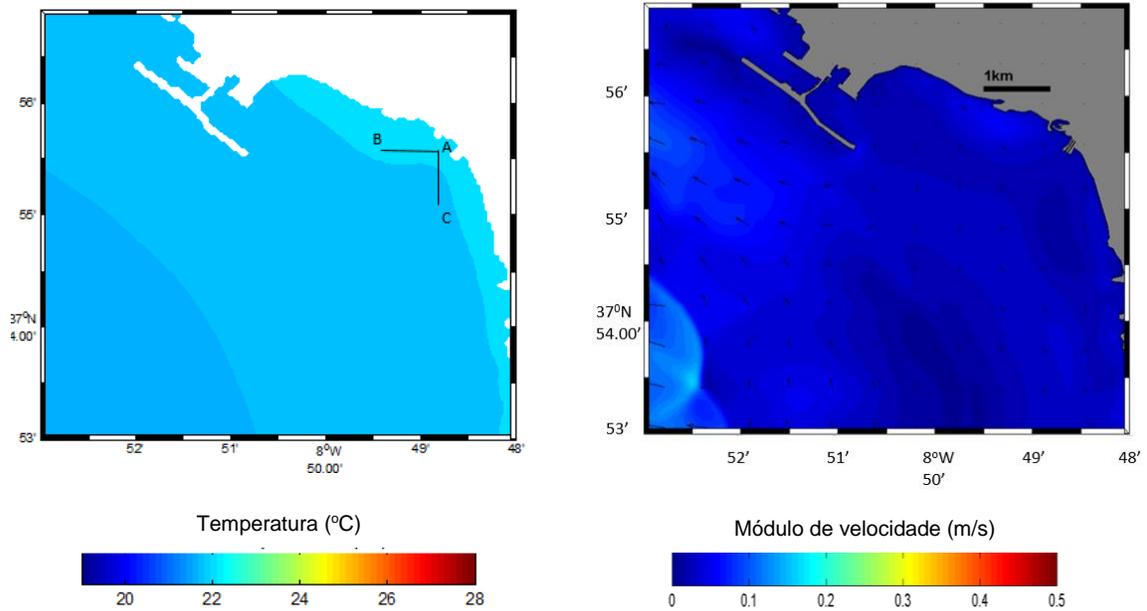


Figura 32 Distribuição de temperatura e do módulo da velocidade à superfície, no cenário de referência, no dia 4 de outubro de 2013.

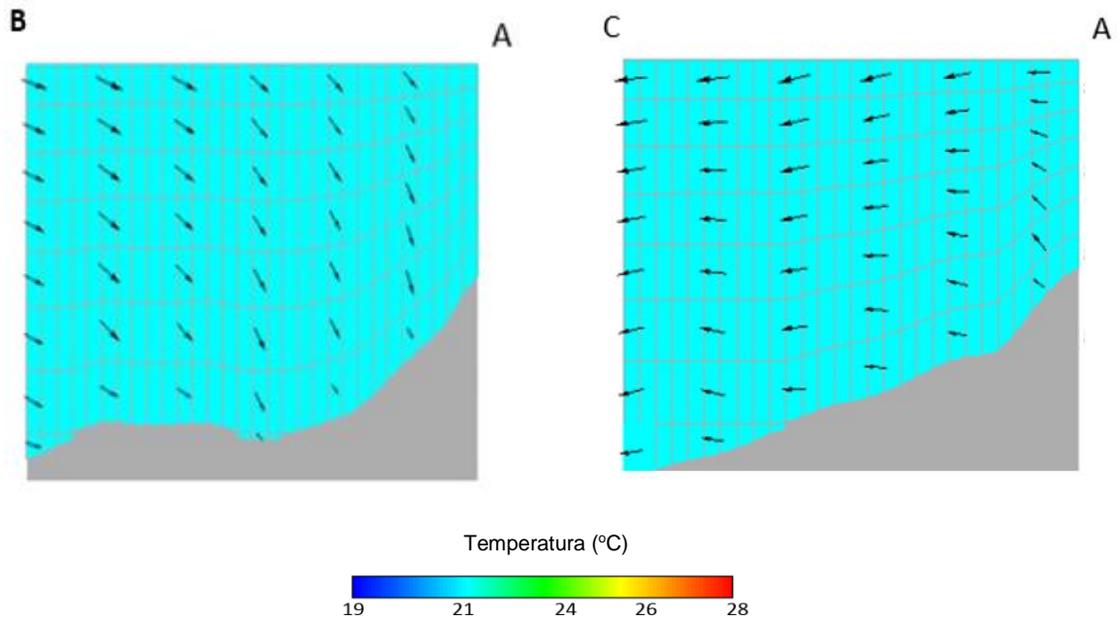


Figura 33 Perfis de temperatura (°C) no cenário de referência para o dia 4 de outubro de 2013.

No cenário de Outubro de 2013, observa-se que a temperatura superficial do meio varia entre 21 °C e 22°C (Figura 32). Na Figura 33 verifica-se que a velocidade também é praticamente igual em toda a região, sendo igual a 0,1m/s, e observa-se uma corrente dirigida para norte devido à incidência de ventos sul.

Nos perfis de temperatura, representados na Figura 33, também se observa uma coluna de água bem misturada, com uma temperatura constante de cerca de 21 °C. Neste caso, onde o regime de ventos é de quadrante sul, observa-se uma submersão das massas de água no perfil A-B.

4.2.4 Janeiro de 2014

A Figura 34 e a Figura 35 representam a situação de referência, sem descarga de efluente térmico, no cenário de inverno com ventos norte.

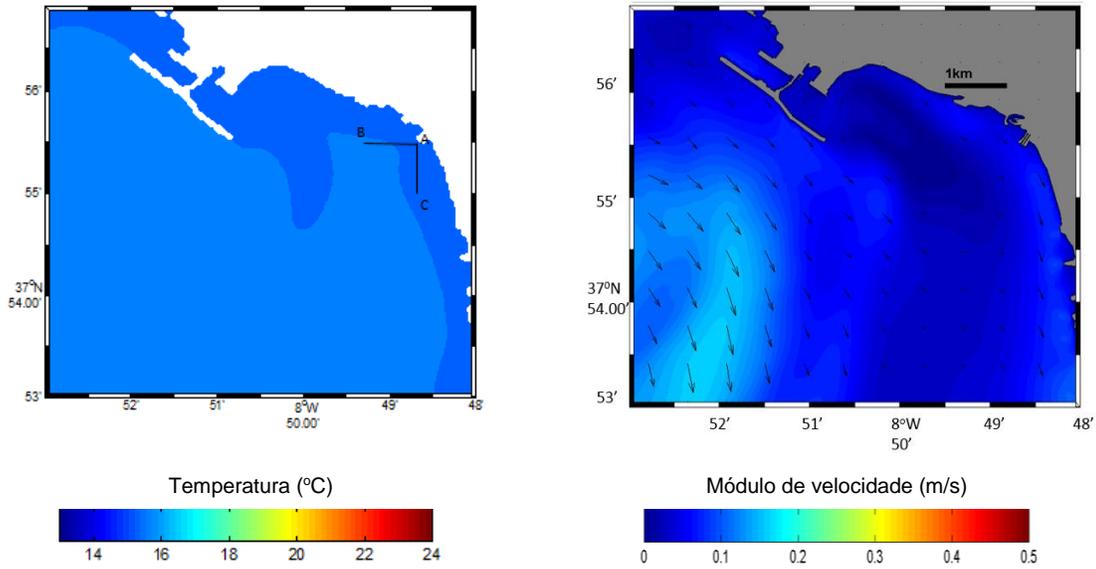


Figura 34 Distribuição de temperatura e do módulo da velocidade à superfície, no cenário de referência, no dia 26 de janeiro de 2014.

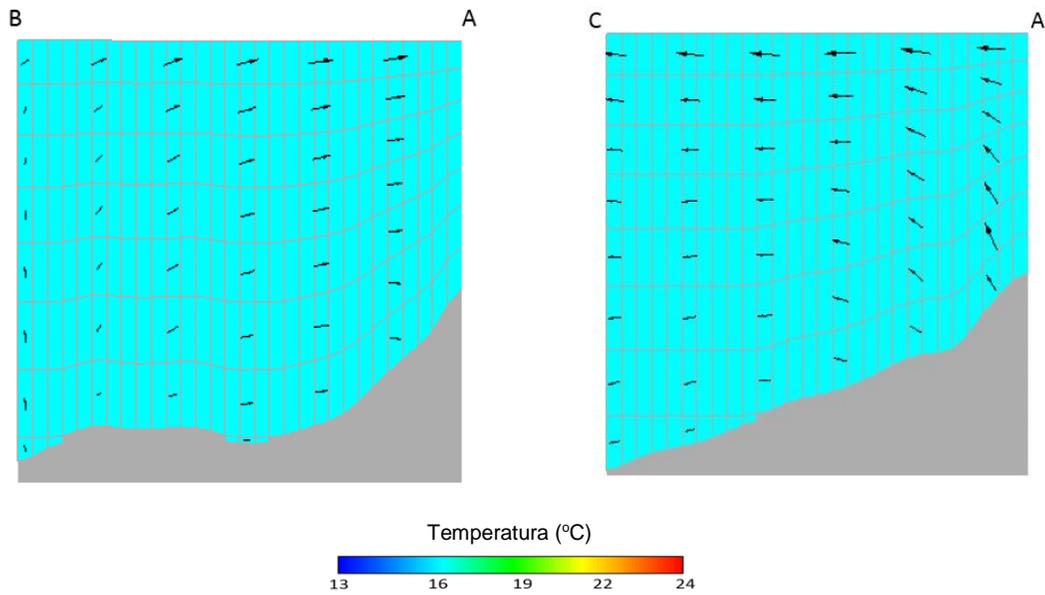


Figura 35 Perfis de temperatura (°C) no cenário de referência para o dia 26 de janeiro de 2014.

Na Figura 34 observa-se que, no cenário de Janeiro de 2014 sem descarga de efluente térmico, a distribuição de temperatura à superfície é muito homogênea variando entre os 15 e os 16 °C. Relativamente à distribuição de velocidades, representada na Figura 35, observam-se velocidades entre 0,1 m/s e 0,2 m/s. Quanto à direção, observam-se correntes dirigidas para sul que se formam devido aos ventos norte.

Quanto à distribuição de temperatura ao longo dos perfis, observa-se uma coluna de água totalmente homogênea em ambos os perfis (Figura 35) com uma temperatura de cerca de 16°C. Neste cenário é observável uma subida das massas de água, no perfil A-B, que se poderá dever ao processo de *upwelling* diretamente relacionado com os ventos norte. Contudo neste caso o *upwelling* não é tão marcado como o observado na Figura 31, o que se deve ao fato de neste caso o vento de quadrante norte ter uma intensidade muito menor que a registada no cenário de agosto.

Relativamente aos resultados obtidos para uma situação de referência, onde não há qualquer descarga de efluente no meio, conclui-se que a temperatura está distribuída de forma praticamente homogênea na região, tanto há superfície como em perfil. No cenário de agosto de 2013, em que os ventos são de quadrante norte e com maior intensidade, é possível observar na zona mais profunda do perfil (Figura 31) a ascensão de massas de água mais frias que se deve ao fenómeno de *upwelling*.

Em relação às velocidades verifica-se que em cenários de ventos sul as velocidades no meio são mais baixas que em cenários de ventos norte. Nos cenários de ventos sul observa-se uma distribuição homogênea de velocidades no meio, sendo cerca de 0.1 m/s (Figura 28 e Figura 32). Nos cenários de ventos norte observam-se velocidades entre 0.1 e 0.4 m/s, no caso do cenário de agosto representado na Figura 30, e entre 0.1 e 0.2 m/s no cenário de janeiro de 2014 representado na Figura 34.

4.3 Pluma térmica em perfil

Nesta secção pretende-se mostrar os resultados obtidos depois de simulada a descarga de efluente térmico na zona em estudo. Para cada cenário está representada a distribuição superficial de temperatura e do módulo da velocidade, bem como a direcção das correntes. Estão ainda representados dois perfis que mostram a variação de temperatura ao longo da coluna de água e a direcção das massas de água.

Os momentos escolhidos coincidem com os momentos de simulação mostrados na secção 4.2, situação de referência, para poder ser feita uma comparação com o cenário sem descarga de efluente térmico e perceber quais os impactes do efluente térmico na dinâmica da região.

4.3.1 Janeiro 2013

Com a Figura 36 pretende-se mostrar a distribuição de temperatura e velocidade à superfície com a descarga de efluente térmico na região de estudo. Na Figura 37 está representada a distribuição vertical de temperatura em dois perfis.

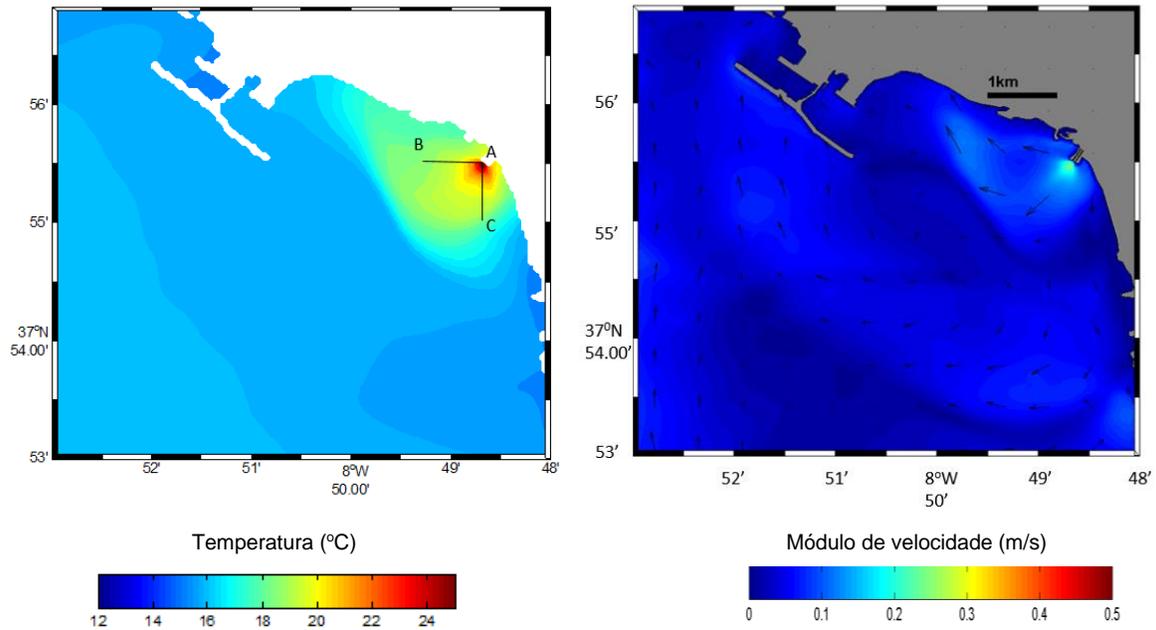


Figura 36 Distribuição de temperatura e do módulo da velocidade à superfície, no cenário com descarga de efluente térmico, no dia 5 de janeiro de 2013.

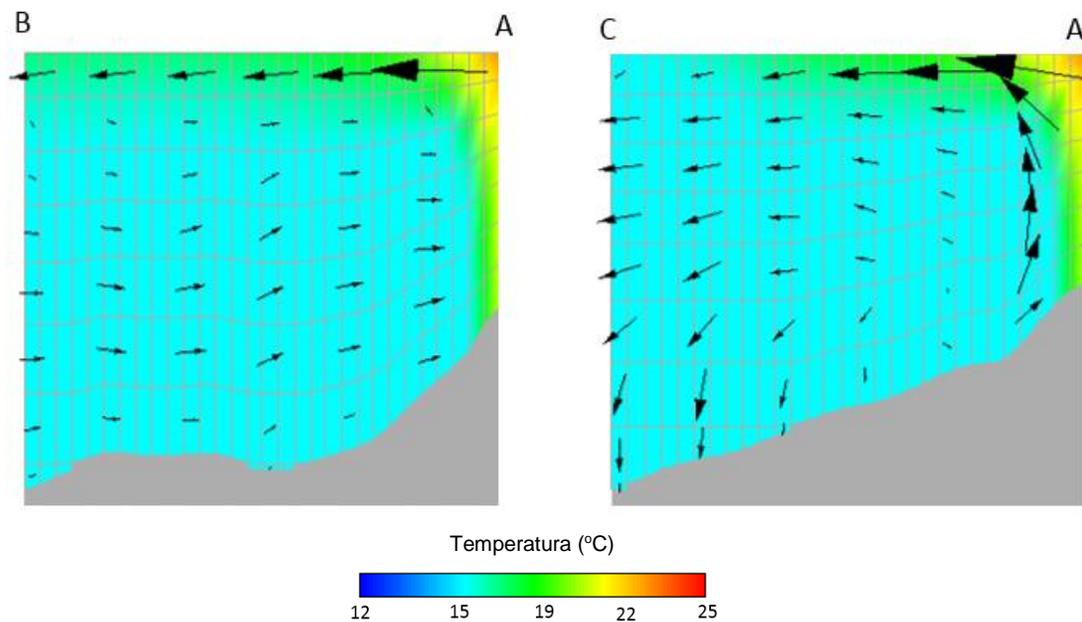


Figura 37 Perfis de temperatura (°C) no cenário com descarga de efluente térmico para o dia 5 de janeiro de 2013.

Observando a distribuição de temperatura no cenário de janeiro de 2013, com a descarga de efluente térmico, representada na Figura 36, nota-se que a temperatura é variável no meio. Observa-se uma gama de temperatura entre os 25 °C, na região contígua à descarga, e os 15 °C, referentes à temperatura do meio não afetada pela pluma térmica. No mesmo cenário mas sem descarga de efluente térmico, observa-se que na região envolvente à descarga a temperatura seria igual a 15 °C (Figura 28). Assim, pode-se concluir que a descarga de efluente térmico causa a formação de uma pluma térmica superficial, provocando um aumento de temperatura de 10°C acima da temperatura do meio, numa região próxima à descarga.

Quanto à distribuição do módulo de velocidade observa-se, na Figura 36, que na maior parte da região em estudo a velocidade é igual a 0,1m/s. Na região afetada pela dispersão da pluma térmica verifica-se que a velocidade é aproximadamente igual a 0,2 m/s. Comparando esta situação com a situação de referência, representada na Figura 28, verifica-se que a velocidade aumenta 0,1 m/s na região influenciada pela pluma térmica. Observa-se ainda que a direção da pluma térmica é para norte, devido à ação do vento do quadrante sul.

Relativamente à distribuição da temperatura em perfil, observa-se nos dois perfis, representados na Figura 37, que há uma estratificação térmica do meio com diferentes temperaturas nas várias camadas. No perfil A-B a estratificação ocorre em quase todo o corte, apesar de a partir de metade do perfil a estratificação ser menos intensa. Na zona da descarga e na zona adjacente à descarga, a temperatura à superfície é igual a 25°C e nas camadas inferiores vai diminuindo até cerca de 19°C. A partir desta zona a água mais quente mantém-se sempre à superfície, o que se deve à sua menor densidade.

No perfil B-C a estratificação térmica é menor que a observada no perfil A-B, em termos de área superficial afetada. Esta situação deve-se ao fato de a corrente estar direcionada para norte, afetando mais a região do perfil A-B.

Comparando o perfil A-B representado na Figura 29, que representa uma situação sem descarga de efluente térmico, com o mesmo perfil representado na Figura 37 observa-se que existe uma alteração na direção das massas de água nas camadas superficiais. Esta alteração pode-se justificar pelo fato de a descarga, com maior quantidade de movimento, ter uma direção contrária à direção das correntes na superfície do perfil.

4.3.2 Agosto de 2013

Com a Figura 38 pretende-se mostrar a distribuição de temperatura e velocidade à superfície com a descarga de efluente térmico na região de estudo. Na Figura 39 está representada a distribuição vertical de temperatura em dois perfis.

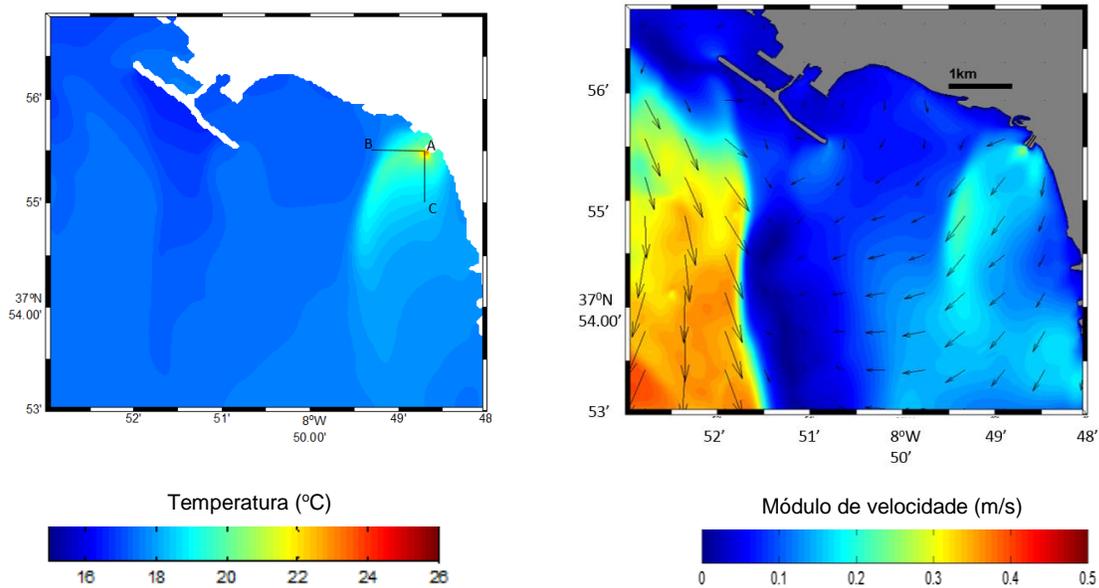


Figura 38 Distribuição de temperatura e do módulo da velocidade à superfície, no cenário com descarga de efluente térmico, no dia 6 de agosto 2013.

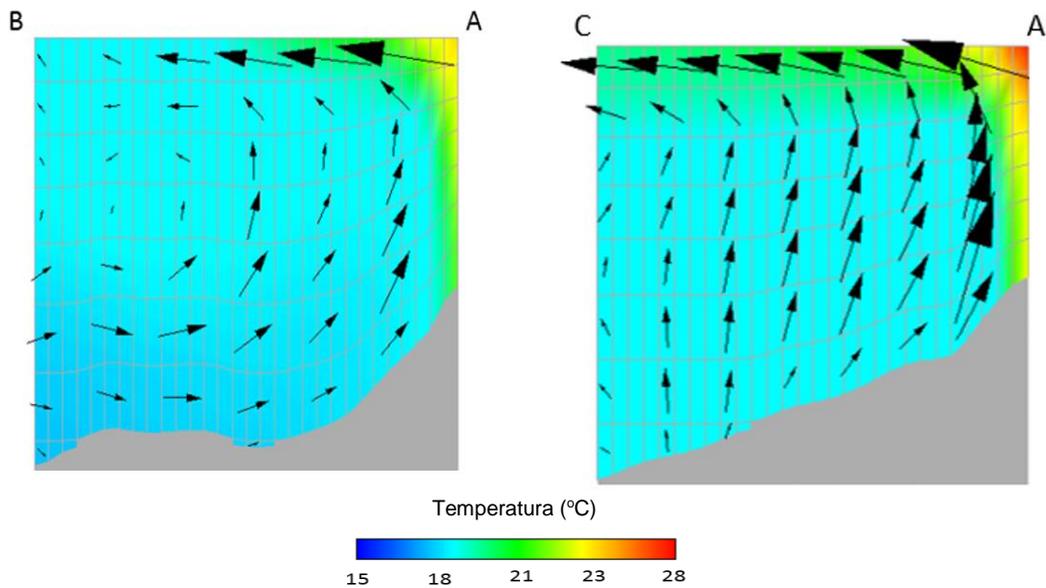


Figura 39 Perfis de temperatura (°C) no cenário com descarga de efluente térmico para o dia 6 de agosto de 2013.

Na Figura 38 observa-se que, em agosto de 2013 com descarga de efluente térmico, a temperatura do meio é variável, observando-se temperaturas entre os 26 °C, na região contígua à descarga, e os 18 °C, referentes à temperatura do meio não afetada pela pluma térmica. No mesmo cenário mas sem descarga de efluente térmico, verificou-se que na região envolvente à descarga a temperatura seria igual a 18 °C (Figura 30). Assim, pode-se concluir que a descarga da água de refrigeração, no cenário de agosto de 2013, provoca um aumento na temperatura de 8°C acima da temperatura do meio, numa região próxima à descarga.

Quanto à distribuição do módulo de velocidade, representado na Figura 38, observa-se que a velocidade não é igual em toda a região de estudo variando entre 0,1m/s e 0,4m/s. Comparando esta situação com a situação de referência (Figura 30) verifica-se que a velocidade aumenta 0,1 m/s na região influenciada pela pluma térmica.

Na Figura 39, que representa a distribuição da temperatura em perfil, observa-se uma estratificação térmica do meio, com diferentes temperaturas nas várias camadas. No perfil A-C a estratificação térmica é observável ao longo de todo o corte superficial, enquanto no perfil A-B a estratificação ocorre apenas até cerca de metade do corte. Esta dissemelhança deve-se ao fato de a pluma, sob o efeito de ventos norte, ser direcionada para sul. Assim, o perfil A-C, localizado a sul, é mais afetado pela dispersão da pluma térmica do que é o perfil A-B, localizado a norte.

Na região junto à descarga observa-se que o upwelling promove o arrefecimento e mistura do efluente térmico ao longo da coluna de água. A direção das correntes em perfil é a mesma observada no cenário de referência, representado na Figura 31.

4.3.3 Outubro de 2013

Com a Figura 40 pretende-se mostrar a distribuição de temperatura e velocidade à superfície com a descarga de efluente térmico na região de estudo. Na Figura 41 está representada a distribuição vertical de temperatura em dois perfis.

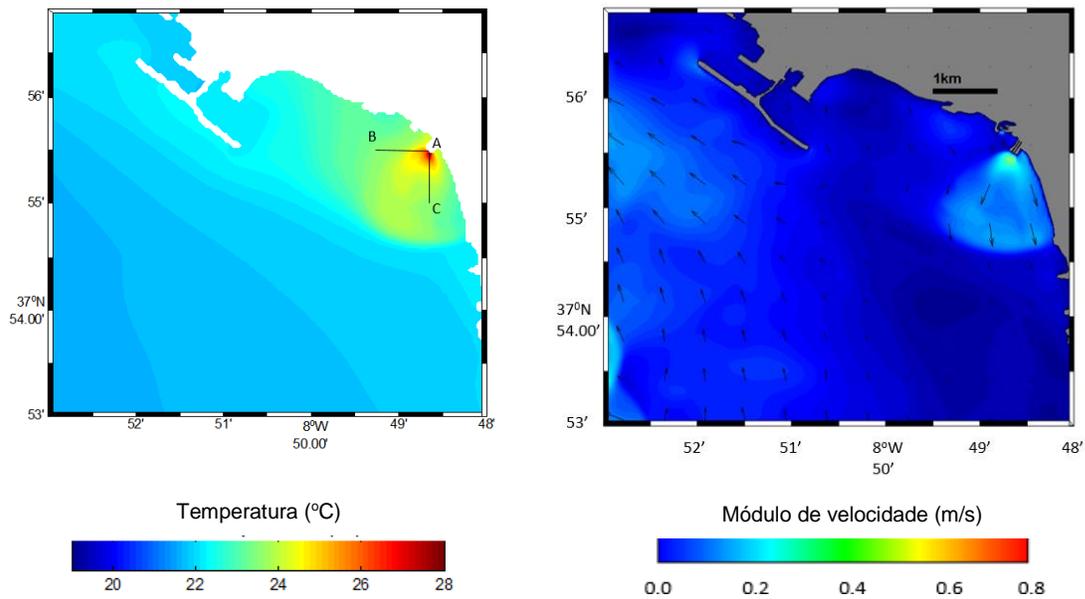


Figura 40 Distribuição de temperatura e do módulo da velocidade à superfície no dia 4 de outubro de 2013, com descarga de efluente térmico.

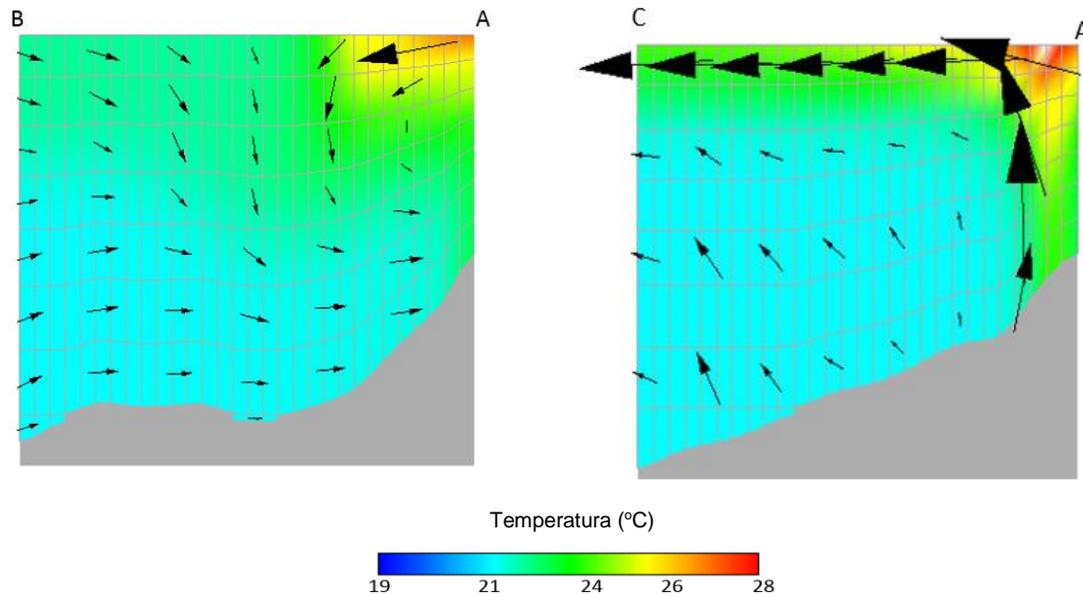


Figura 41 Perfis de temperatura (°C) no cenário com descarga de efluente térmico para o dia 4 de outubro de 2013.

Em outubro, cenário de ventos sul, observa-se que a descarga de efluente térmico na região de estudo causa o aumento de temperaturas no meio, registrando-se temperaturas entre os 28 °C e os 21 °C. Assim, na zona envolvente à descarga há um aumento de cerca de 7 °C acima da temperatura do meio, uma vez que num cenário de referência a temperatura naquela região seria igual a 21 °C (Figura 32).

Na Figura 40 é ainda possível observar que o módulo de velocidade não é muito variável na região, registrando-se na maior parte da zona velocidades de 0,1m/s, exceto na região envolvente à descarga onde se registam velocidades de 0,2m/s. Comparando esta situação com a situação de referência (Figura 32) verifica-se que a velocidade aumenta 0,1 m/s na região influenciada pela pluma térmica. Observa-se que as correntes estão direcionadas para norte, resultado da ação dos ventos sul.

Relativamente à distribuição da temperatura em perfil, observa-se uma estratificação térmica do meio, com diferentes temperaturas nas várias camadas (Figura 41). Neste cenário a estratificação térmica é observável em quase todo o corte nos dois perfis (A-B e C-B).

Quanto à direção das correntes em perfil, observa-se que na camada superficial do perfil A-B a direção da corrente é oposta à observada no mesmo perfil no cenário de referência (Figura 33), devido ao caudal originado pela descarga de efluente.

4.3.4 Janeiro 2014

Com a Figura 42 pretende-se mostrar a distribuição de temperatura e velocidade à superfície com a descarga de efluente térmico na região de estudo. Na Figura 43 está representada a distribuição vertical de temperatura em dois perfis.

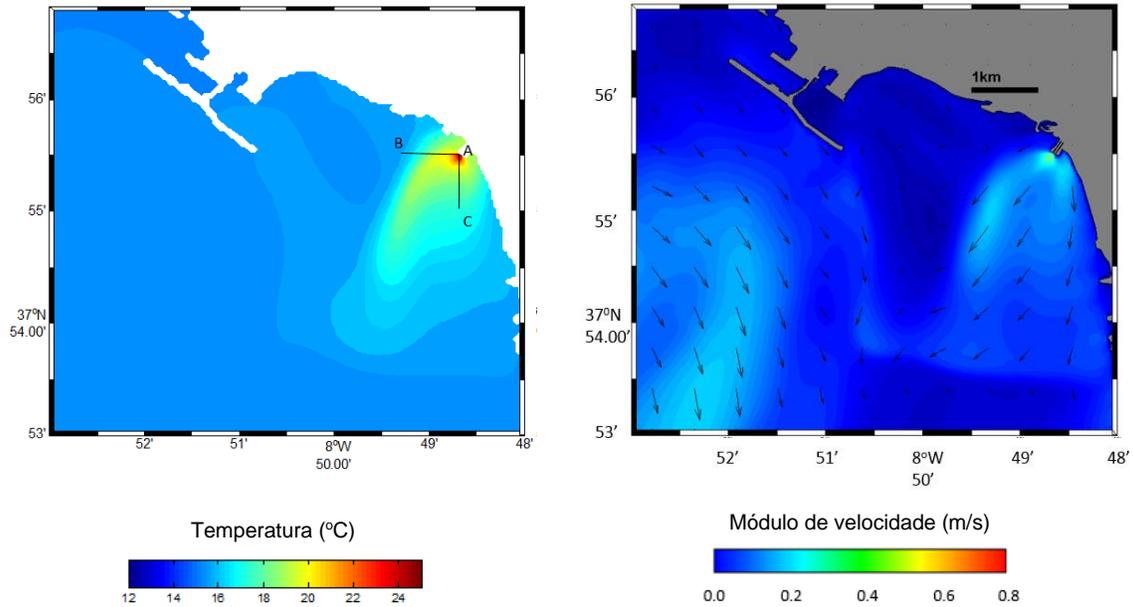


Figura 42 Distribuição de temperatura e do módulo da velocidade à superfície, no cenário com descarga de efluente térmico, no dia 26 de janeiro de 2014.

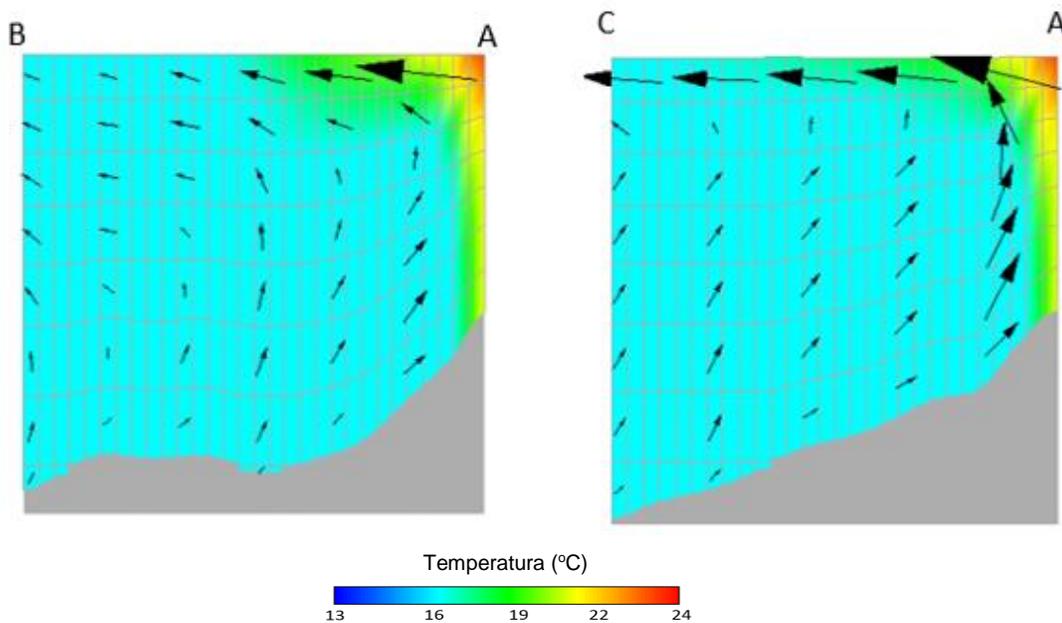


Figura 43 Perfis de temperatura (°C) no cenário com descarga de efluente térmico para o dia 26 de janeiro de 2014.

Na Figura 42 observa-se que, em janeiro de 2013, com descarga de efluente térmico, a temperatura do meio é variável, observando-se temperaturas entre os 24 °C, na região contígua à descarga, e os 15 °C. No mesmo cenário mas sem descarga de efluente térmico, verificou-se que na região envolvente à descarga a temperatura seria igual a 15 °C (Figura 34). Assim, pode-se concluir que a descarga de água de refrigeração, neste cenário, provoca um aumento na temperatura de 9°C acima da temperatura do meio, numa região próxima à descarga.

Quanto à distribuição do módulo de velocidade, representado na Figura 38, observa-se que a velocidade na região de estudo varia entre 0,1m/s e 0,2 m/s. Comparando esta situação com a situação de referência (Figura 34) verifica-se que a velocidade aumenta 0,1 m/s na região influenciada pela pluma térmica. Observa-se que as correntes estão direcionadas para sul, o que se deve à ação dos ventos de quadrante norte.

Na Figura 43, que representa a distribuição da temperatura em perfil, observa-se uma estratificação térmica do meio, com diferentes temperaturas nas várias camadas. A estratificação térmica é observável até cerca de metade do corte superficial em ambos os perfis.

Analisando os resultados obtidos com a simulação da descarga de efluente térmico no meio, e comparando-os com os resultados obtidos no cenário de referência, descrito na secção 4.2, conclui-se que o principal efeito das águas de refrigeração no meio é a formação de uma pluma térmica à superfície e a estratificação do meio. Em todos os cenários analisados é visível a formação de camadas com diferentes temperaturas ao longo da coluna de água. Em relação à velocidade há um aumento de 0,1m/s na região envolvente à descarga, em todos os cenários simulados.

Comparando os diferentes cenários verifica-se que, de um modo geral, a estratificação atinge uma área maior nos cenários de ventos sul que nos cenários de vento norte. Esta situação é bem visível no caso de temperaturas do meio altas, em que no cenário de ventos norte (Figura 38) se observa uma área afetada pela estratificação consideravelmente menor que a área afetada no cenário de ventos sul (Figura 40). Esta questão pode ser explicada pela maior intensidade dos ventos norte e pelo fenómeno de *upwelling*, provocado por este tipo de ventos, que promovem uma mistura e arrefecimento mais acentuados do efluente na região junto à descarga originando uma pluma menor.

4.4 Dispersão da pluma térmica

Nesta secção pretende-se mostrar a dispersão da pluma à superfície, para perceber qual o efeito dos fatores físicos nos padrões de circulação da pluma e no seu tamanho.

Para cada cenário estão representadas figuras com quatro momentos diferentes de dispersão superficial da pluma térmica. Nas figuras está também representado o regime de maré em cada instante, sinalizado no gráfico com o nível de água do mar, localizado no canto inferior esquerdo de cada figura.

Note-se que, para poder identificar as diferentes plumas térmicas nos diferentes cenários, são usadas diferentes escalas de temperatura, onde a temperatura mínima corresponde à temperatura numa zona sem influência da pluma no meio, no respetivo cenário.

4.4.1 Janeiro de 2013

A Figura 44 representa a dispersão do efluente térmico em 5 de janeiro de 2013, cenário de temperaturas baixas com ventos sul, às 14:00 (baixa-mar), às 16:00, às 18:00 e às 20:00 (preia-mar) horas.

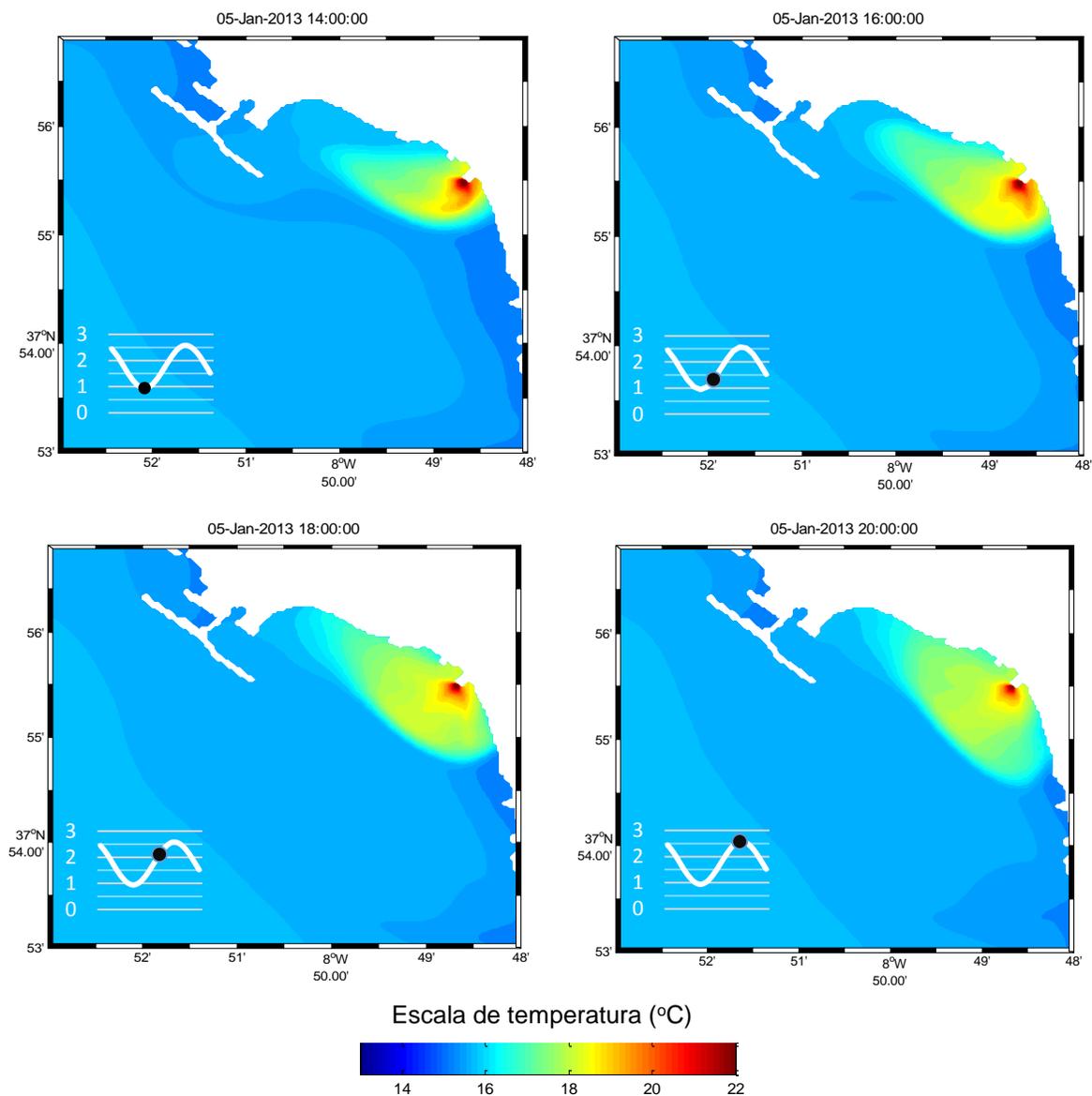


Figura 44 Dispersão à superfície da pluma térmica, para diferentes instantes de maré, em 5 de Janeiro de 2013.

4.4.2 Agosto de 2013

Na Figura 45 está representada a dispersão do efluente térmico em 5 de agosto de 2013, cenário de temperaturas altas com ventos norte, às 14:00 (preia-mar), às 16:00, às 18:00 e às 20:00 (baixa-mar) horas.

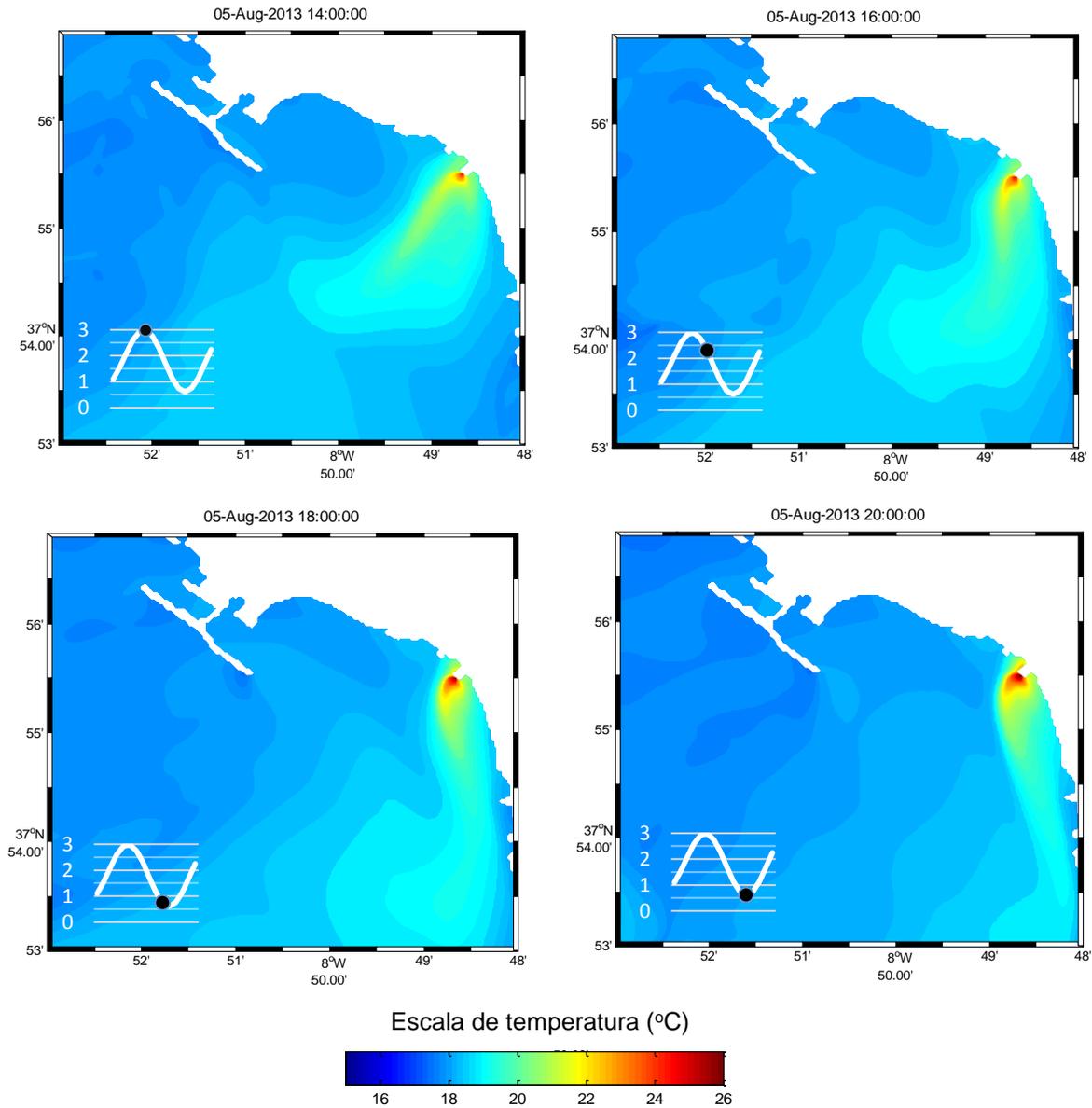


Figura 45 Dispersão à superfície da pluma térmica, para diferentes instantes de maré, em 5 de Agosto de 2013.

4.4.3 Outubro de 2013

A Figura 46 mostra a dispersão do efluente térmico a 4 de outubro de 2013, cenário de temperaturas altas com ventos sul, às 06:00 (baixa-mar), às 08:00, às 10:00 e às 12:00 (preia-mar) horas.

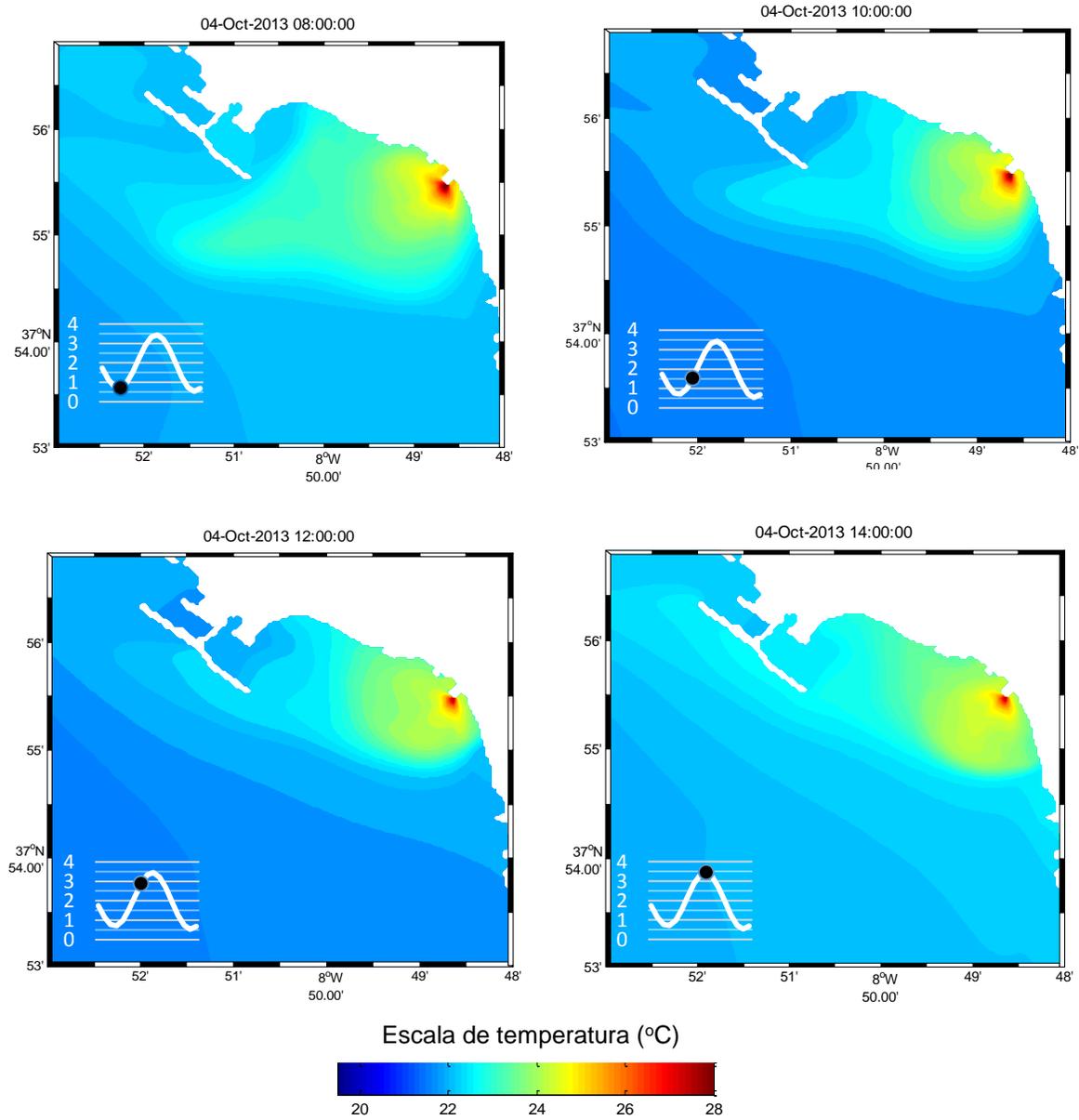


Figura 46 Dispersão à superfície da pluma térmica em 4 de Outubro 2013

4.4.4 Janeiro de 2014

A Figura 47 mostra a dispersão do efluente térmico às 16:00, às 18:00, às 20:00 e às 22:00 horas em 26 de Janeiro de 2014, cenário de temperaturas baixas e ventos norte.

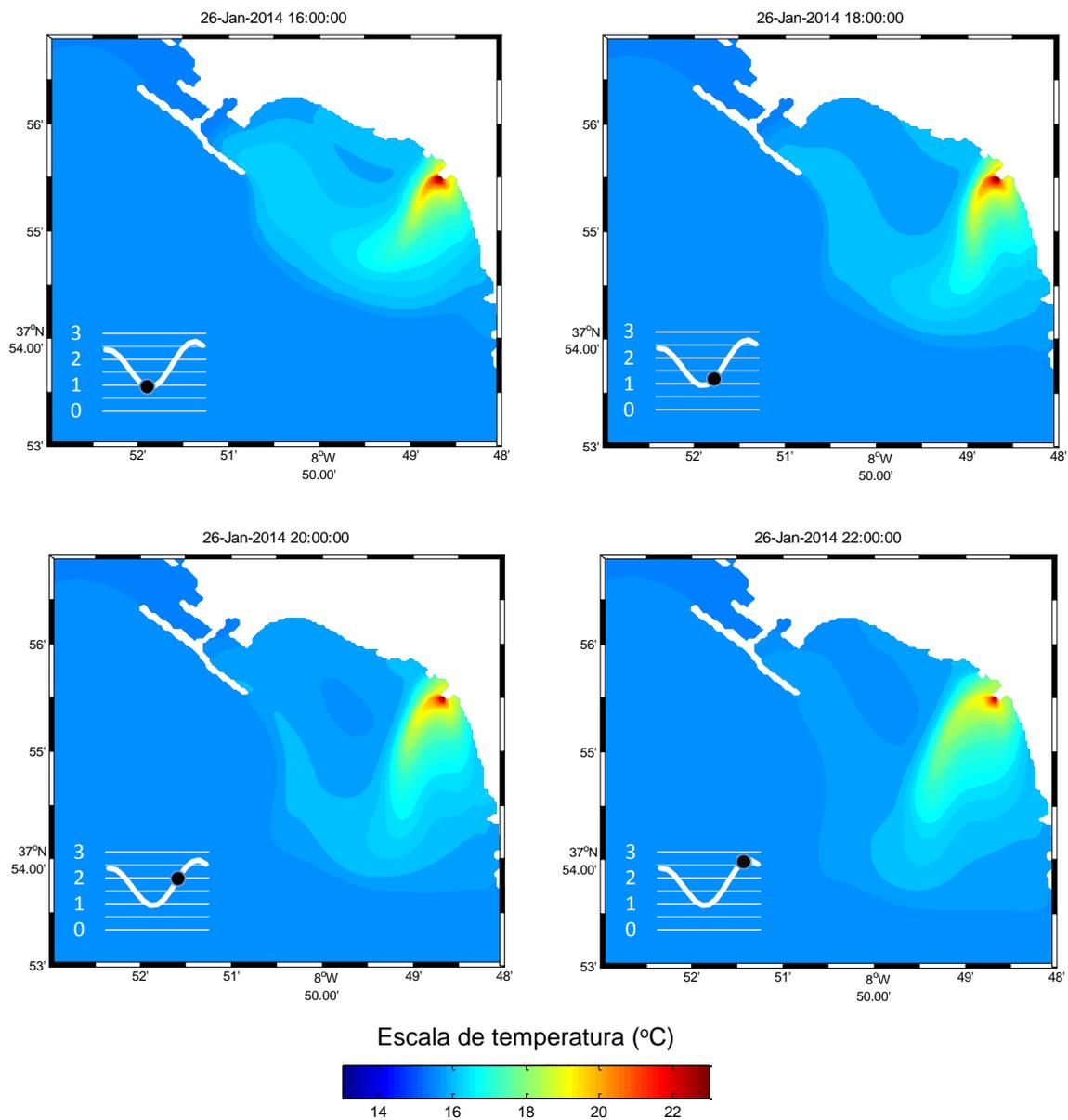


Figura 47 Dispersão à superfície da pluma térmica em 26 de Janeiro de 2014.

Analisando a Figura 44, a Figura 45, a Figura 46, e a Figura 47 observa-se que a mancha térmica formada nos cenários de vento sul (janeiro 2013 e outubro de 2013) é menos alongada e com uma menor diluição que a formada nos cenários de ventos norte (janeiro 2014 e agosto 2013). Também é através dos cenários de ventos diferentes que se observam plumas com direções diferentes.

Nos cenários de vento sul a pluma térmica é empurrada para norte, chegando à zona de captação de água que está localizada a norte da zona de descarga. Assim, a água usada para refrigeração é captada a uma temperatura cada vez maior e conseqüentemente é descarregado no meio um efluente térmico a uma temperatura mais elevada. A configuração da zona também intensifica este efeito de aquecimento contínuo, uma vez que na zona norte da descarga há uma contenção da pluma devido à morfologia da costa. Ou seja, a morfologia da região também condiciona a dispersão e o tamanho da pluma térmica.

Nos cenários de vento norte a pluma é empurrada para sul, onde não há fatores de contenção, e onde já não há o efeito de aquecimento contínuo porque a zona de tomada de água de refrigeração já não é afetada pela pluma térmica. Além disso, como já se tinha constatado na secção 4.2 a velocidade do meio é maior nas alturas de vento norte, devido à maior intensidade deste regime de ventos, o que leva a uma mistura maior contribuindo desta forma para diminuir a mancha térmica. Assim, no cenário de ventos norte a pluma é mais rapidamente transportada para sul, sendo ao mesmo tempo sujeita a uma mistura maior. Os ventos norte são ainda responsáveis pelo fenómeno de *upwelling* que promove uma mistura e arrefecimento maiores do efluente térmico.

Comparando os cenários de igual regime de ventos e temperatura do ar diferentes observa-se que não há diferenças no padrão de transporte. Comparando a Figura 44 com a Figura 46 verifica-se que a pluma se direciona para norte em ambos os cenários, e nos cenários representados pela Figura 45 e pela Figura 47 observa-se uma pluma direcionada para sul. Portanto a temperatura do ar e do meio não tem qualquer influência no padrão geral de circulação da pluma térmica.

Quanto à influência da temperatura do ar na dimensão da pluma térmica observa-se que, numa situação de ventos sul, no cenário de menor temperatura do ar (Figura 44) a mancha térmica é menor que no cenário de maior temperatura do ar (Figura 46). Contudo, numa situação de vento norte, não são visíveis diferenças na dimensão da pluma térmica sob diferentes temperaturas do ar. Note-se que já se demonstrou que o regime de ventos é o principal condicionante da mistura e dispersão do efluente térmico, assim só sob condições de vento exatamente iguais é que seria possível aferir na influência da temperatura do ar.

A principal influência da temperatura do ar é na temperatura do meio, que por sua vez influenciará a temperatura a que sai o efluente térmico, sendo maior nos meses mais quentes que nos meses mais frios. Esta relação entre a temperatura do efluente e do meio é imposta através do funcionamento

do sistema de refrigeração, uma vez que o efluente descarregado é a água captada no meio a uma temperatura maior.

Em relação à influência da maré, observa-se que sob diferentes regimes de maré as plumas comportam-se de forma semelhante, notando-se apenas que na zona junto à descarga as temperaturas são maiores em alturas de maré baixa e menores em regime de preia-mar. Portanto a maré não tem influência na hidrodinâmica geral da pluma, tem apenas um efeito muito local na temperatura junto à descarga.

Conclui-se então que o pior cenário, em termos de área de pluma térmica maior, é o cenário de ventos sul. Este cenário não é favorável ao funcionamento eficiente da central, uma vez que a eficiência da central depende da temperatura do meio e neste cenário há um aumento da temperatura na zona de captação de água. Contudo, este regime de ventos é pouco frequente na região, como se pode observar na Figura 8, e portanto o pior cenário tem baixa probabilidade de ocorrência.

Conclui-se ainda que o vento é o principal condicionante no transporte da pluma térmica. Na secção 4.3 observou-se que na maior parte da região, em todos os cenários, a pluma permanece na camada superior, que é a camada diretamente influenciada pelo vento o que justifica a grande influência do vento no transporte da pluma térmica. O vento também tem influência no arrefecimento da pluma térmica, uma vez que, os ventos com maiores intensidades levam a uma mistura maior. Além disso o processo de *upwelling*, que se forma em cenários de ventos norte, contribui para um arrefecimento inicial maior, devido ao afloramento de águas mais frias, originando uma mancha térmica menor.

4.5 Influência da maré

Na secção 4.4 concluiu-se que a maré poderia ter influência na pluma térmica na região próxima da descarga. Para perceber melhor qual a influência do regime de maré nessa região foram comparadas as séries de temperatura com as séries do nível de água, na célula da descarga e numa célula onde não há influência da mancha térmica ,à qual se chama zona de referência.

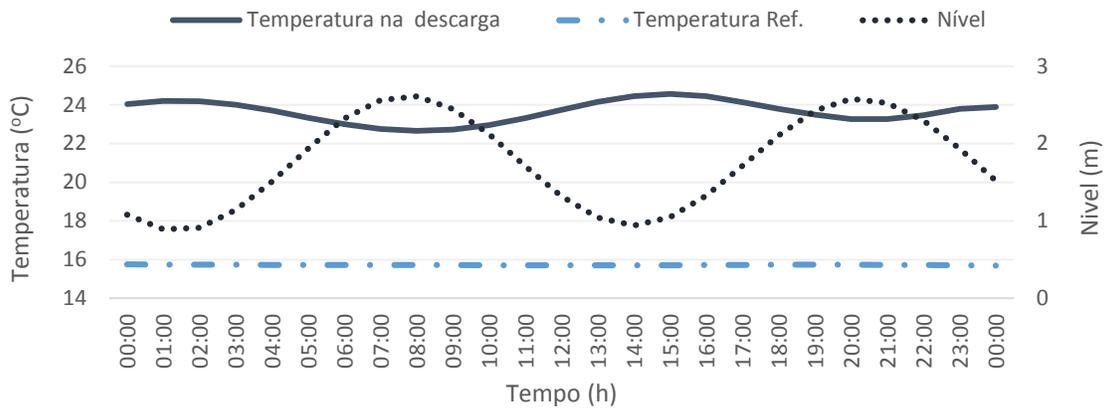


Figura 48 Relação entre o nível de água do mar e a temperatura à superfície, na zona da descarga e numa zona sem influência da pluma térmica, em janeiro de 2013.

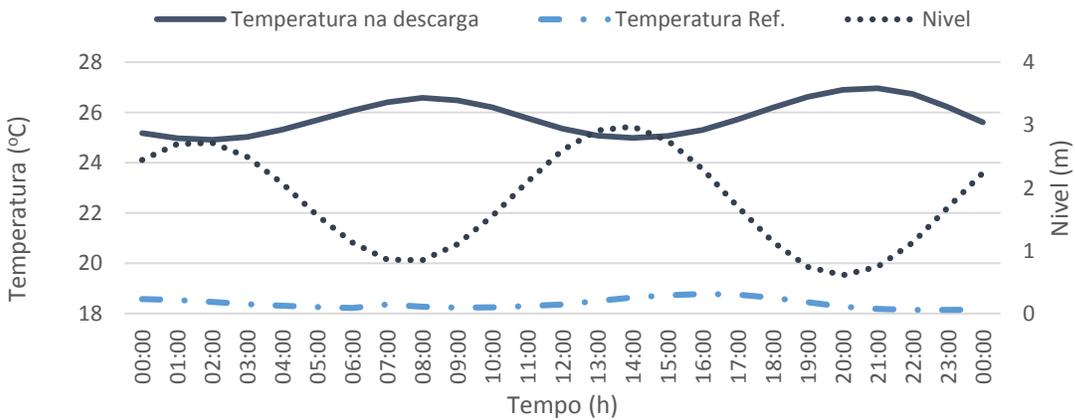


Figura 49 Relação entre o nível de água do mar e a temperatura à superfície, na zona da descarga e numa zona sem influência da pluma térmica, em agosto de 2013.

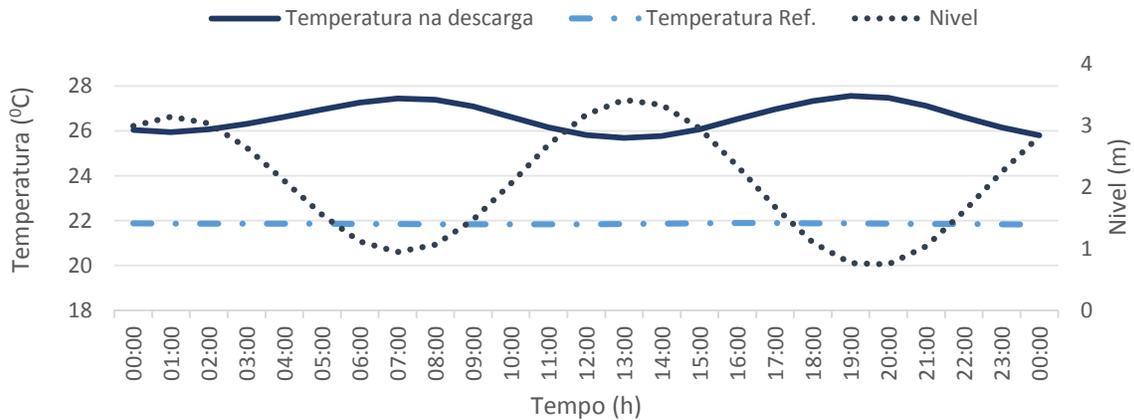


Figura 50 Relação entre o nível de água do mar e a temperatura à superfície, na zona da descarga e numa zona sem influência da pluma térmica, em outubro de 2013.

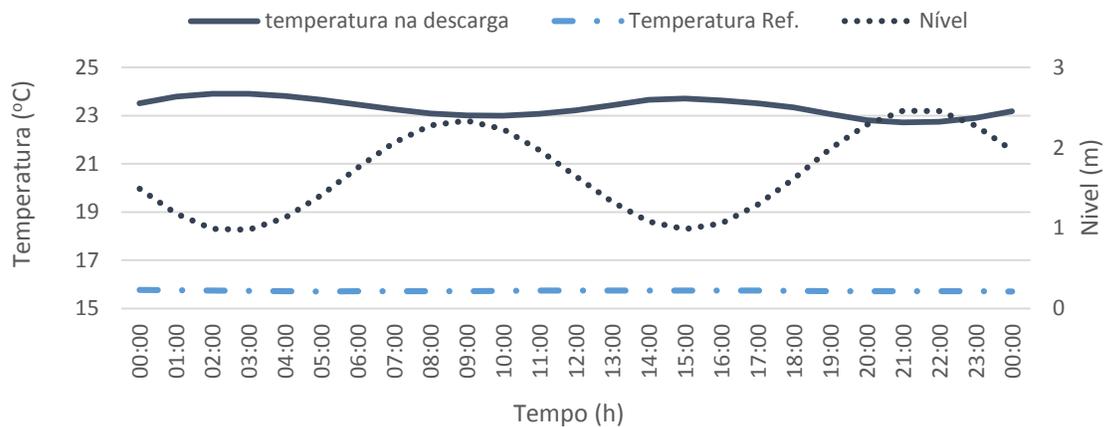


Figura 51 Relação entre o nível de água do mar e a temperatura à superfície, na zona da descarga e numa zona sem influência da pluma térmica, em janeiro de 2014.

A Figura 48, a Figura 49, a Figura 50 e a Figura 51 mostram que na célula onde se dá a descarga há uma relação direta entre a variação da temperatura e a variação do nível de água do mar. Observa-se uma diminuição ou um aumento de 2 °C à medida que aumenta ou diminui o nível de água, exceto no cenário de inverno com ventos norte (janeiro de 2014), onde a temperatura varia 1°C com a variação do regime de maré (Figura 51). Numa região de referência verifica-se que a temperatura não tem qualquer variação com a maré uma vez que o prisma de maré perde relevância quando comparado com a profundidade da zona.

O regime de marés tem influência na oscilação do nível de água do mar, uma vez que a cada dia há duas baixa-mares e duas preia-mares. A oscilação do nível de água influencia a quantidade de água disponível para diluição do efluente. Assim quanto mais água houver no meio maior será a diluição do efluente térmico e menor será a temperatura, justificando assim a influência da maré na temperatura na região próxima da descarga.

4.6 Valor limite de emissão

Como já tinha sido referido, na LA concedida para o funcionamento da Central, está estabelecido um valor limite de emissão para o efluente térmico, sendo que não pode haver um aumento de 3°C acima da temperatura do meio, numa zona 30 metros a jusante da descarga. Para perceber se este VLE é cumprido nos diferentes cenários, são comparadas as séries de temperatura na zona de descarga e 50 metros desta zona com a série de temperatura numa zona de referência. Considerou-se como zona de referência um local onde não houvesse influência da mancha térmica em nenhum dos cenários.



Figura 52 Localização do ponto de referência (R).

De seguida são mostradas as figuras com a série de temperatura na descarga, a 50 metros da descarga e uma série de temperatura 3°C acima da temperatura registada na zona de referência, zona não afetada pela descarga.

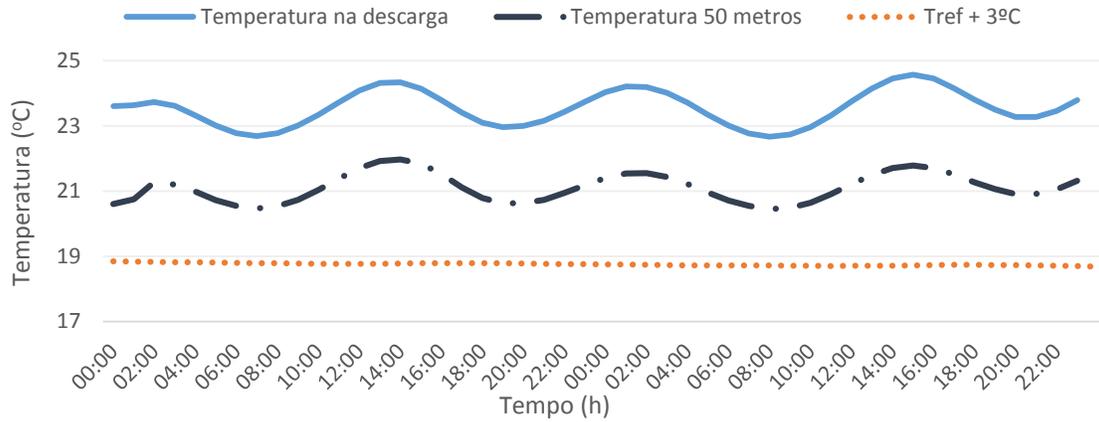


Figura 53 Séries de temperatura na zona da descarga numa, zona a 50 metros da descarga e série de temperatura 3°C acima da série na zona de referência (Tref + 3°C), em 4 e 5 de Janeiro de 2013.

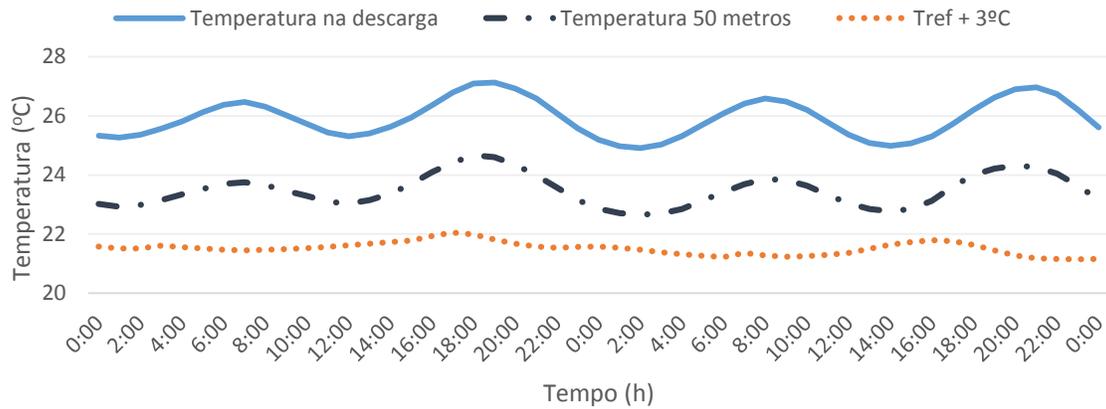


Figura 54 Séries de temperatura na zona da descarga numa, zona a 50 metros da descarga e série de temperatura 3°C acima da série na zona de referência (Tref + 3°C), em 4 e 5 de Agosto de 2013.

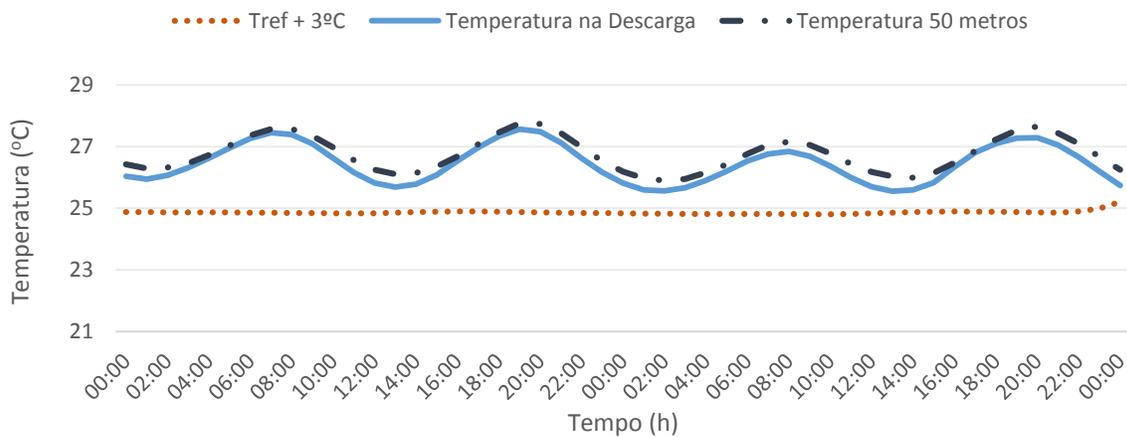


Figura 55 Séries de temperatura na zona da descarga numa, zona a 50 metros da descarga e série de temperatura 3°C acima da série na zona de referência (Tref + 3°C), em 3 e 4 de Outubro de 2013.

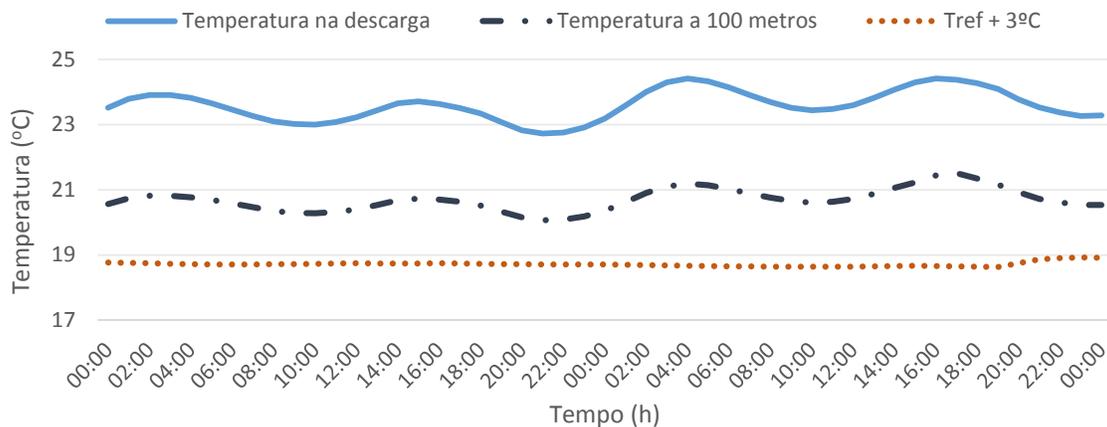


Figura 56 Séries de temperatura na zona da descarga numa, zona a 50 metros da descarga e série de temperatura 3°C acima da série na zona de referência (Tref + 3°C), em 25 e 26 de Janeiro de 2014.

Da análise das figuras anteriores verifica-se que na zona onde se dá a descarga a temperatura é em média superior 4 °C em relação ao VLE imposto. Em altura de baixa-mar chega mesmo a ser superior a 6 °C, como se observa por exemplo na Figura 53. A 50 metros a diferença entre a temperatura da pluma térmica e do VLE imposto é menor, sendo em média 2°C superior.

Conclui-se assim, que em nenhum dos cenários simulados é possível cumprir o valor limite de emissão imposto na LA em vigor para a Central Termoelétrica. Ou seja a 30 metros medidos a jusante da zona de descarga a há sempre um aumento superior a 3°C no meio devido à descarga de efluente térmico originado pelo circuito de refrigeração da central termoelétrica de Sines.

5 Conclusões e desenvolvimentos futuros

Com este trabalho pretendeu-se fazer o estudo da dispersão do efluente térmico originado pela descarga de águas usadas no circuito de refrigeração da central termoelétrica de Sines. Para desenvolver o trabalho proposto a metodologia adotada consistiu na aplicação de um modelo numérico tridimensional à região de estudo, o MOHID, permitindo a simulação da hidrodinâmica na região em estudo.

A utilização do modelo MOHID permitiu relacionar a hidrodinâmica da pluma com os fatores atmosféricos, uma vez que este permite a interação de vários módulos: hidrodinâmico, interface água-atmosfera e propriedades da água. A aplicação deste modelo a 3D, apesar de ser computacionalmente muito exigente, permitiu fazer uma melhor representação da estrutura vertical da coluna de água e assim avaliar a mistura da pluma e o seu comportamento na coluna de água.

A metodologia de *downscaling*, aplicada na implementação do modelo, possibilitou forçar o modelo local com condições realistas e validadas de um modelo operacional de larga escala, o PCOMS. Como esta metodologia permite a integração de vários níveis, foi possível usar a solução do nível exterior em níveis cada vez mais refinados, obtendo-se um nível local de resolução com detalhe suficiente para analisar a dispersão da pluma térmica.

O modelo local revelou ser uma representação realista da região em estudo. Isto porque, os resultados obtidos com este modelo para a temperatura, na região circundante ao sistema de refrigeração, são bastantes semelhantes aos valores obtidos na monitorização realizada, através de campanhas de amostragem por parte da direção da EDP.

A aplicação do modelo numérico neste estudo proporcionou a simulação da região sem descarga de efluente térmico, que de outra forma não seria possível. A configuração de um modelo que represente a zona de estudo permite a simulação de inúmeros cenários, constituindo por isso uma ferramenta muito útil na previsão dos efeitos que esta descarga pode ter no meio.

Apesar de serem realizadas campanhas de monitorização na região afetada pelo efluente e portanto existirem dados de campo, a natureza pontual destes dados não seria suficiente para realizar este estudo. A região de estudo compreende uma zona costeira onde os processos têm uma grande variabilidade espacial e temporal. A aplicação de um modelo numérico à zona de estudo mostrou ter uma resolução espacial e temporal suficiente para estudar os processos envolvidos na mistura e dispersão do efluente térmico. Assim, a utilização de modelos numéricos constitui uma ferramenta fundamental no apoio à gestão ambiental.

Através da comparação entre os resultados obtidos para os diferentes cenários sem e com descarga de efluente, é possível concluir que o principal impacto da água de refrigeração no meio recetor é a formação de uma pluma nas camadas superficiais e a estratificação térmica do meio. Em relação ao

efeito nos padrões de circulação do meio, concluiu-se que nas situações de *downwelling*, em que as massas de água são empurradas para a costa, há a formação de uma corrente superficial contrária à que haveria se não houvesse descarga de efluente. Este efeito deve-se ao fato de o fluxo originado pela descarga ter maior quantidade de movimento que o meio e ser contrário às correntes formadas em situação de *downwelling*, onde as massas de água são empurradas para a costa. À superfície verificou-se que a descarga de água de refrigeração causa um aumento de 0,1m/s na região envolvente à descarga, em todos os cenários simulados.

Relativamente aos fatores de maior influência na dispersão e mistura da pluma térmica concluiu-se que o vento é o principal condicionante. É este parâmetro que define os padrões de circulação superficial da pluma, sendo que em caso de ventos norte a pluma é transportada para sul e em caso de ventos sul a pluma é transportada para norte. Isto acontece porque a água quente mantém-se na camada superficial, devido à sua menor densidade, ficando o seu comportamento dominado pela ação do vento. A configuração do sistema de refrigeração, com a captação a norte da descarga, leva a que no cenário de ventos sul haja um contínuo aumento da temperatura do efluente descarregado, devido ao aumento da temperatura na zona da tomada de água. Neste cenário há ainda o aprisionamento da pluma térmica devido à localização do porto de Sines, e por isso a configuração da zona contribui para uma pluma ainda mais concentrada no cenário de ventos sul.

Os ventos norte promovem o processo de *upwelling* contribuindo para uma mistura inicial maior, resultando em plumas mais diluídas neste cenário. Nestes cenários não há o efeito de aquecimento contínuo e a morfologia da região permite que a pluma disperse até largas distâncias, sem qualquer contenção, proporcionando uma mistura maior e menores zonas de estratificação do meio.

O cenário de ventos sul é assim o pior cenário em termos de impacto no meio, uma vez que este cenário dá origem a uma zona maior de temperaturas mais elevadas que o meio, levando a uma maior estratificação do meio. Este cenário também é desfavorável ao funcionamento eficiente da central uma vez que a eficiência da central depende da temperatura do meio e neste cenário há um aumento da temperatura na zona de captação de água. Contudo este cenário é pouco frequente, os ventos sul ocorrem com uma frequência de cerca de 13% enquanto os ventos de quadrante norte ocorrem 50 % do tempo.

Os resultados mostraram ainda que a maré influencia a temperatura na região próxima à descarga. Como esta é uma zona pouco profunda as oscilações do nível de água condicionam diretamente a quantidade de água disponível no meio para diluição do efluente térmico. Assim, em alturas de preamar a temperatura na região diminui em média 2 °C em relação à temperatura no meio em alturas de baixa-mar.

Quanto ao valor limite de emissão imposto na licença ambiental, verificou-se que em nenhum dos cenários é cumprido o limite de não poder haver um aumento superior a 3 °C no meio, numa região 30 metros a jusante da descarga.

Este trabalho terá continuidade uma vez que está previsto acoplar um modelo ecológico ao modelo hidrodinâmico já implementado na região. O principal objetivo do próximo trabalho será estudar o impacto do aumento da temperatura da região na ecologia marinha local, mais concretamente no desenvolvimento de macroalgas. A temperatura é um fator fundamental na curva de crescimento de qualquer organismo, sendo por isso interessante perceber como é que as alterações neste parâmetro afetam a população marinha local. A proliferação de macroalgas pode ter consequências no ambiente natural, devido a problemas de eutrofização. O crescimento de macroalgas pode ainda afetar as infra estruturas da central termoelétrica podendo condicionar o funcionamento da central com repercussões a nível económico.

6 Referências Bibliográficas

- Abbaspour, M. et al., 2005. Modeling of thermal pollution in coastal area and its economical and environmental assessment. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2(1), pp.13–26.
- Agarwal, S.K., 2005. *Water Pollution*, New Delhi: APH Publishing.
- Agência Portuguesa do Ambiente, 2009. *Licença Ambiental para a Central Termoelétrica de Sines*, Available at: sniamb.apambiente.pt/LADigital.
- Ascione, I. et al., 2014. Advances in modeling of water quality in estuaries. In *Advances in Coastal and Marine Resources: Remote Sensing and Modeling*. Springer.
- Barbosa, P. (Museu da E. [EDP]), 2014. Central de Sines | Museu da Electricidade. www.wikienergia.pt. Available at: http://www.wikienergia.pt/~edp/index.php?title=Central_de_Sines [Accessed April 1, 2014].
- Bedri, Z. et al., 2013. Environmental consequences of a power plant shut-down: a three-dimensional water quality model of Dublin Bay. *Marine pollution bulletin*, 71(1-2), pp.117–28. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23622835> [Accessed March 28, 2014].
- Citizen Weather Observer Program, 2014. Synop Information for 08541 in Sines Montes Chaos, SE, Portugal. <http://weather.gladstonefamily.net/>. Available at: <http://weather.gladstonefamily.net/site/08541> [Accessed May 4, 2014].
- Direcção de Produção Térmica (EDP), 2010. *Declaração Ambiental 2010 - Central Termoelétrica de Sines*,
- Drillet, Y. et al., 2005. Meddies in the Mercator North Atlantic and Mediterranean Sea eddy-resolving model. *Journal of Geophysical Research*, 110(C3), p.C03016. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/2003JC002170> [Accessed April 22, 2014].
- Ekman, V.W., 1905. On the Influence of the Earth's Rotation on Ocean-Currents. *Arkiv for Matematik, Astronomi och Fysik*, 2(11).
- El-Ghorab, E., 2013. Physical model to investigate the effect of the thermal discharge on the mixing zone (Case Study: North Giza Power Plant, Egypt). *Alexandria Engineering Journal*, 52(2), pp.175–185. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1110016813000021> [Accessed March 28, 2014].
- Environment Canada, 2014. Environment Canada - Pollution and Waste - Additional Technical Guidance - How to Conduct Effluent Plume Delineation - Effluent Dispersion. *Government of Canada*. Available at: <http://www.ec.gc.ca/eseee-em/default.asp?lang=En&n=E93AE5BC-1&offset=2&toc=hide> [Accessed May 3, 2014].
- European Marine Observation and Data Network, 2014. EMODnet Bathymetry Portal. <http://portal.emodnet-bathymetry.eu/>. Available at: <http://portal.emodnet-bathymetry.eu/download-bathymetry> [Accessed April 23, 2014].
- Fiúza, A.F., 1980. The Portuguese Coastal Upwelling System. In *Actual problems of oceanography in Portugal*. Lisboa.

- Fiúza, A.F., Macedo, M.E. & Guerreiro, M.R., 1981. Climatological space and time variation of the Portuguese coastal upwelling. *Oceanologica Acta*, 5.
- Garcia, A.C., Neves, R. & Beja, J., 2007. *Plano de Monitorização na Envoltura do Emissário Submarino de Sines - Relatório das Condições Ambientais de Referência*,
- GOTM, 2014. General Ocean Turbulence Model [information]. Available at: <http://www.gotm.net/index.php?go=information> [Accessed April 17, 2014].
- Hunt, C.D. et al., 2010. Plume tracking and dilution of effluent from the Boston sewage outfall. *Marine environmental research*, 70(2), pp.150–61. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20452014> [Accessed March 28, 2014].
- Instituto da Conservação da Natureza e da Biodiversidade [ICNB] & Hidroprojecto, 2008. *Plano de Ordenamento do Parque Natural do Sudoeste Alentejano e Costa Vicentina Estudo de Base Etapa I - Descrição*,
- Instituto de Meteorologia, 2004a. *Caracterização Climática da Costa. Características do Clima da Costa de Portugal Continental*,
- Instituto de Meteorologia, 2004b. *Caracterização Climática da Costa. Clima de Agitação Marítima*,
- Instituto Español de Oceanografía, 2014. IEOPeracional. © 2011 Instituto Español de Oceanografía. Available at: <http://www.indicedeafloramiento.ieo.es/index.html> [Accessed May 9, 2014].
- Instituto Hidrográfico, 2014a. Instituto Hidrográfico | Bóias Ondógrafo. Available at: <http://www.hidrografico.pt/boias-ondografo.php> [Accessed March 28, 2014].
- Instituto Hidrográfico, 2014b. Instituto Hidrográfico| Previsão de Marés - Portugal. Available at: <http://www.hidrografico.pt/previsao-mares.php> [Accessed May 11, 2014].
- Jan, S. et al., 2004. Physical properties of thermal plumes from a nuclear power plant in the southernmost Taiwan. *Journal of Marine Science and Technology*, 12(5), pp.433–441.
- Langford, T., 1990. *Ecological Effects of Thermal Discharges*, England: Elsevier applied science publishers LTD.
- Leitão, P.M.C.F.L., 2002. *Integração de Escalas e de Processos na Modelação do Ambiente Marinho*. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Lyard, F. et al., 2006. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, 56(5-6), pp.394–415. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s10236-006-0086-x> [Accessed March 20, 2014].
- MARETEC, 2012. *Descrição do MOHID* Essentia Editora, ed., Lisboa: Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- MARETEC, 2014a. Module Geometry - MohidWiki. <http://www.mohid.com/wiki>. Available at: http://www.mohid.com/wiki/index.php?title=Module_Geometry [Accessed April 28, 2014].
- MARETEC, 2014b. MOHID | What is MOHID. www.mohid.com. Available at: http://www.mohid.com/what_is_mohid.htm [Accessed April 17, 2014].

- MARETEC, 2014c. Mohid Description Manual. , 11(1), pp.i–ii. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24670304>.
- Martins, F., 1999. *Modelação matemática tridimensional de escoamentos costeiros e estuarinos usando uma abordagem de coordenada vertical genérica*. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Mateus, M. et al., 2012. An operational model for the West Iberian coast: products and services. *Ocean Science*, 8(4), pp.713–732. Available at: <http://www.ocean-sci.net/8/713/2012/> [Accessed March 28, 2014].
- Mateus, M. & Neves, R., 2013. *Ocean modelling for coastal management Case Studies with MOHID* 1st ed., Lisboa: IST Press. Available at: <http://mohid.wordpress.com/2013/02/08/book-release/>.
- NASA, 2014. Ocean Motion | Background | Ocean in Motion - Ekman Transport. Available at: <http://oceanmotion.org/html/background/ocean-in-motion.htm> [Accessed May 3, 2014].
- Rede Elétrica Nacional, 2012. *Dados Técnicos 2012 - REN*, Lisboa. Available at: https://www.ren.pt/media/comunicados/detalhe/ren_publica_dados_tecnicos_de_eletricidade_e_gas_natural_de_2012/.
- Riflet, G., 2010. *Downscaling large-scale ocean-basin solutions in coastal tri-dimensional hydrodynamic models*. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Soares, J., Castro, B.M. & Adams, E.E., 1999. Refrigerated water dispersion at the São Sebastião Channel. , 47(825), pp.59–67.
- Subtil, E.L., 2012. *Tratamento de águas residuárias utilizando emissários submarinos: avaliação do nível de tratamento para uma disposição oceânica ambientalmente segura*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Trancoso, A.R., 2012. *Operational Modelling as a Tool in Wind Power Forecasts and Meteorological Warnings*. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- US National Oceanic and Atmospheric Administration, 2014. Currents|Surface Ocean Currents |Ekman Spiral. Available at: <http://oceanservice.noaa.gov/education/kits/currents/05currents4.html> [Accessed May 3, 2014].
- USEPA, 2014. CORMIX Mixing Zone Model: About CORMIX. www.cormix.info. Available at: <http://www.cormix.info/aboutcormix.php> [Accessed April 11, 2014].

Anexos

Anexo I Localização das estações de monitorização

Tabela 8 Localização geográfica das estações de monitorização.

	Latitude (°N)	Longitude (°W)
Estação sinótica de Sines Montes Chaos	37° 57' 14" N	8° 50' 18"
Boia Ondógrafo de Sines	37° 55' 16" N	8° 55'.44"W
Estação de amostragem contemplada no Programa de Monitorização do Emissário Submarino de Sines.	37° 57' 9.78"N	8° 55' 22.50"W

Anexo II Cálculo do índice de upwelling

O índice de upwelling nas direções este-oeste (Q_x) e norte-sul (Q_y) é calculado através da Equação 15 e da Equação 16.

$$Q_x = \frac{\rho_a C_d}{\rho_s f} (W_x^2 + W_y^2)^{1/2} W_y \quad \text{Equação 15}$$

$$Q_y = \frac{\rho_a C_d}{\rho_s f} (W_x^2 + W_y^2)^{1/2} W_x \quad \text{Equação 16}$$

Na Equação 15 e na Equação 16, ρ_a designa a densidade do ar que é igual a $1,22 \text{ kg m}^{-3}$, C_d é um coeficiente de rugosidade adimensional e é igual a $1,4 \times 10^{-3}$, ρ_s é a densidade à superfície da água e é igual a 1025 kg m^{-3} , W_x é a componente este-oeste da velocidade do vento e W_y é a componente norte-sul da velocidade do vento. O parâmetro de Coriolis definido por f é dado pela Equação 17, onde Ω designa a velocidade angular e θ define a latitude.

$$f = 2\Omega \sin \theta \quad \text{Equação 17}$$

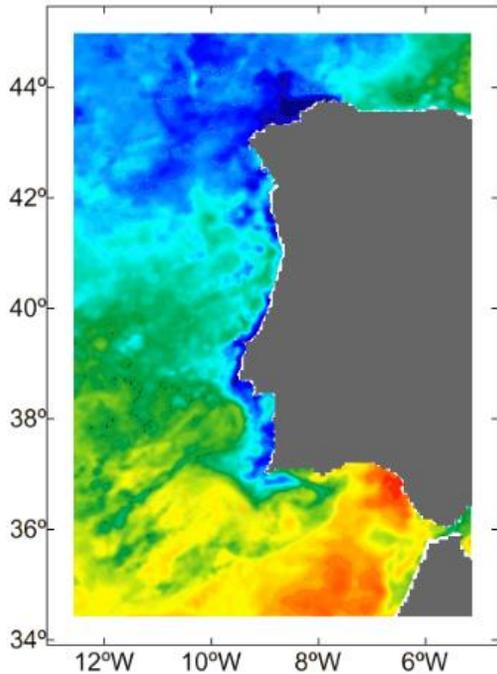
O índice de upwelling (UI) pode ser calculado como a componente do transporte de Ekman perpendicular à costa.

$$UI = Q_{\perp} = -Q_x \sin \theta + Q_y \cos \theta \quad \text{Equação 18}$$

Onde $\theta = \frac{\pi}{2} + \varphi$, em que φ é o ângulo do vetor unitário perpendicular à linha de costa.

Anexo III: Validação da temperatura à superfície do modelo operacional PCOMS

Temperatura à superfície obtida por satélite (°C)



Temperatura à superfície obtida no MOHID (°C)

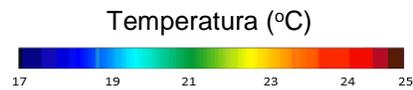
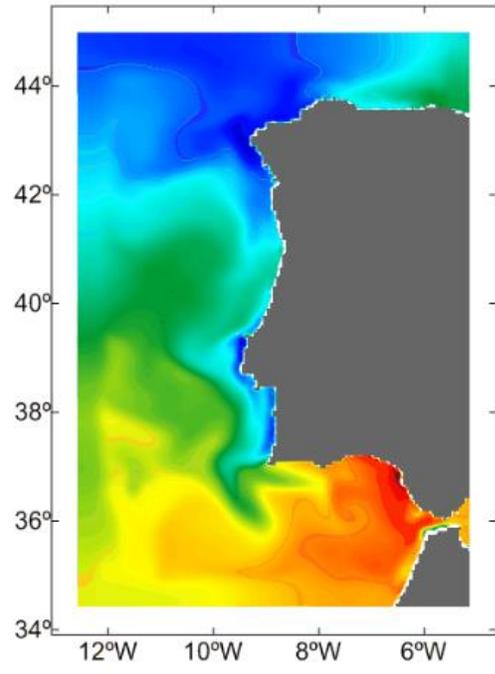
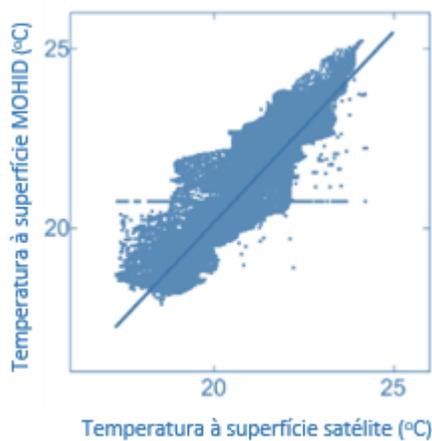


Figura 57 Comparação entre os dados obtidos por detecção remota (à direita) e os resultados obtidos pelo modelo PCOMS (à esquerda) para a temperatura à superfície, no dia 5 de agosto de 2013.



Correlação linear: $Y = -1.107 + 1.064X$
Número de pontos usados: 128990
Valor médio modelo: 20.74 (°C)
Valor médio dados observados: 20.51 (°C)
Correlação de Pearson: 0.939
Bias = 0.232 (°C)
RMSE = 0.549 (°C)

Figura 58: Parâmetros estatísticos usados na validação do PCOMS com os dados obtidos por detecção remota.

Anexo IV Camadas implementadas no modelo

Tabela 9 Espessura das camadas sigma (% de metros) implementadas no modelo.

Espessura das camadas sigma %	11	13	13	14	15	17	17
--------------------------------------	----	----	----	----	----	----	----

Tabela 10 Espessura (em metros) das camadas cartesianas implementada em cada um dos níveis do modelo configurado.

Camadas nível 1 (m)	Camadas nível 2 (m)	Camadas nível 3 (m)	Camadas nível 4 (m)
1,78	1,78	1,78	1,78
1,89	1,89	1,89	1,89
2,23	2,23	2,23	2,23
2,46	2,46	2,46	2,46
2,91	2,91	2,91	2,91
3,29	3,29	3,29	3,29
3,94	3,94	3,94	3,94
4,52	4,52	4,52	4,52
5,46	5,46	5,46	5,46
6,36	6,36	6,36	6,36
7,70	7,70	7,70	7,70
9,08	9,08	9,08	9,08
11,01	11,01	11,01	11,01
13,08	13,08	13,08	13,08
15,87	15,87	15,87	15,87
18,93	18,93	18,93	18,93
22,95	22,95	22,95	22,95
27,42	27,42	27,42	27,42
33,13	33,13	33,13	33,13
39,57	39,57	39,57	39,57
47,56	47,56	47,56	
56,61	56,61	56,61	
67,56	67,56	67,56	
79,89	79,89	79,89	
94,41	94,41	94,41	
110,55	110,55	110,55	

128,98	128,98	128,98
149,03	149,03	149,03
171,17	171,17	
194,54	194,54	
219,38	219,38	
244,68		
270,54		
295,83		
320,69		
344,04		
366,20		
386,22		
404,68		
420,80		
435,34		
447,64		
458,63		