

**INSTITUTO UNIVERSITÁRIO MILITAR
DEPARTAMENTO DE ESTUDOS PÓS-GRADUADOS
CURSO DE PROMOÇÃO A OFICIAL SUPERIOR**

2016/2017



TII

**IMPACTO DA TEMPERATURA DA ÁGUA DO MAR NO VENTO
COSTEIRO AO LARGO DA COSTA OESTE DA PENÍNSULA IBÉRICA**

**O TEXTO CORRESPONDE A TRABALHO FEITO DURANTE A
FREQUÊNCIA DO CURSO NO IUM SENDO DA RESPONSABILIDADE DO
SEU AUTOR, NÃO CONSTITUINDO ASSIM DOCTRINA OFICIAL DAS
FORÇAS ARMADAS PORTUGUESAS OU DA GUARDA NACIONAL
REPUBLICANA.**

**Nádia Sofia Oliveira Rijo
Primeiro-tenente M**



INSTITUTO UNIVERSITÁRIO MILITAR
DEPARTAMENTO DE ESTUDOS PÓS-GRADUADOS

IMPACTO DA TEMPERATURA DA ÁGUA DO MAR NO
VENTO COSTEIRO AO LARGO DA COSTA OESTE DA
PENÍNSULA IBÉRICA

Primeiro-tenente M Nádia Sofia Oliveira Rijo

Trabalho de Investigação Individual do CPOS-M

Pedrouços 2017



**INSTITUTO UNIVERSITÁRIO MILITAR
DEPARTAMENTO DE ESTUDOS PÓS-GRADUADOS**

**IMPACTO DA TEMPERATURA DA ÁGUA DO MAR NO
VENTO COSTEIRO AO LARGO DA COSTA OESTE DA
PENÍNSULA IBÉRICA**

Primeiro-tenente M Nádía Sofia Oliveira Rijo

Trabalho de Investigação Individual do CPOS-M

Orientador: Capitão-de-fragata M Carlos Santos Fernandes

Coorientador: Capitão-tenente M Paulo Alonso Lindo

Pedrouços 2017



Declaração de compromisso Anti plágio

Eu, Nádía Sofia Oliveira Rijo, declaro por minha honra que o documento intitulado *Impacto da temperatura da superfície da água do mar no Vento Costeiro ao largo da Costa Oeste da Península Ibérica* corresponde ao resultado da investigação por mim desenvolvida enquanto auditor do Curso de Promoção a Oficial Superior de Marinha 2016/17 no Instituto Universitário Militar e que é um trabalho original, em que todos os contributos estão corretamente identificados em citações e nas respetivas referências bibliográficas.

Tenho consciência que a utilização de elementos alheios não identificados constitui grave falta ética, moral, legal e disciplinar.

Pedrouços, 19 de junho de 2017

Nádía Sofia Oliveira Rijo



Agradecimentos

A investigação desenvolvida e apresentada neste trabalho contou com a colaboração e apoio de diversas pessoas, Instituições e Organismos, sem os quais não seria possível alcançar os objetivos propostos.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Instituto Dom Luiz da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa pela possibilidade de utilizar o modelo WRF e efetuar as diversas simulações numéricas que sustentaram os resultados deste trabalho. Nesse sentido, gostaria de mencionar uma palavra de apreço ao Doutor Ricardo Tomé pela orientação técnica na idealização e concretização destas simulações.

Em segundo lugar gostaria de agradecer ao Instituto Hidrográfico, concretamente à equipa do METOCMIL, que em muito contribuíram para a compreensão e reprodução dos dados aqui ilustrados.

Gostaria ainda de agradecer a todos os intervenientes neste projeto que direta ou indiretamente contribuíram para a orientação ao longo deste trabalho, nomeadamente o meu orientador Comandante Carlos Santos Fernandes do Instituto Hidrográfico, o Comandante Álvaro Semedo da Escola Naval, os professores da Faculdade de Ciências Pedro Miranda, Rita Cardoso e Pedro Soares e ao Comandante Alonso Lindo, coorientador, do Instituto Universitário Militar.

Finalmente gostaria de agradecer a todos os meus amigos e familiares pelo apoio e afeto demonstrado nestes últimos nove meses sem os quais não seria possível concluir este projeto. Em particular, agradeço ao Carlos, à minha mãe e aos meus sogros o apoio dado com a Núria e com o Rafael.



Índice

Introdução	1
1. Percurso metodológico da investigação.....	4
1.1. Objeto de estudo e sua delimitação.....	4
1.2. Identificação e classificação das variáveis.....	5
1.3. Objetivos da Investigação	6
1.3.1. Objetivo Geral (OG):.....	6
1.3.2. Objetivos Específicos (OE):	6
1.4. Questões da Investigação e Hipóteses	7
1.4.1. Questão Central (QC).....	7
1.4.2. Questões Derivadas (QD) e Hipóteses (H).....	7
1.5. Metodologia da Investigação	7
1.6. Modelo desenvolvido na investigação	9
2. Processos de interação oceano-atmosfera nas regiões costeiras.....	11
2.1. Formação dos Jatos Costeiros	11
2.1.1. Processos dinâmicos associados à formação dos Jatos Costeiros	12
2.1.2. Critério de deteção de jatos costeiros	14
2.2. Processos de feedback associados à ocorrência de jatos costeiros	14
2.2.1. Afloramento Costeiro	14
2.2.2. Correlação entre os processos de afloramento costeiro e o Vento Costeiro	15
3. Resposta do vento costeiro face a diferentes campos de temperatura à superfície da água do mar	17
3.1. Caracterização sinótica do evento a estudar	17
3.2. Análise dos mecanismos de feedback.....	18
3.2.1. Prescrição dos campos da TSAM.....	19
3.2.2. Análise da relação causa-efeito entre a variação espacial da TSAM e o Vento Costeiro	20



3.2.3. Análise da relação de associação e dependência entre a variação da TSAM junto a costa e a intensificação do Vento Costeiro	25
4. A variação da Temperatura da Água do Mar e o impacto do vento costeiro na condução de operações navais	27
4.1. Meteorologia a Bordo das Unidades Navais.....	27
4.2. Análise do impacto do vento costeiro nas operações navais	28
Conclusões.....	30
Bibliografia.....	32

Índice de Anexos

Anexo A — Estrutura térmica da atmosfera	A-1
Anexo B — Sistemas semipermanentes de Altas Pressões	B-1

Índice de Apêndices

Apêndice A — Síntese Metodológica do Trabalho de Investigação.....	Apd A-1
Apêndice B — Simulações Numéricas: prescrição da Temperatura da Superfície da Água do Mar	Apd B-1

Índice de Figuras

Figura 1 – Formulação do Problema de Investigação	4
Figura 2 – Relação entre as variáveis.	6
Figura 3 - Limites dos domínios utilizados na simulação do modelo WRF com a respetiva topografia (m) com (a) resolução horizontal de 27 km (D01;domínio exterior), 9 km (D02; linha preta) e 3 km (D03, linha azul); (b) Representação da área utilizada para ilustração de resultados (compreendida no domínio mais interno) com representação de 2 pontos chave: P1 (41.96N 10.19W) e P2 (38.32N 9.58W).	9
Figura 4 – Localização das Correntes Oceânicas globais.....	11
Figura 5 – Mapas Globais da Frequência de Ocorrência (%) de jatos costeiros no Verão (a) Boreal (junho, julho e agosto – JJA) e (b) Astral (dezembro, janeiro e fevereiro – DJF).....	12



Figura 6 – Ilustração conceptual dos processos de interação oceano-atmosfera num ambiente similar às regiões costeiras que potenciam a formação de jatos costeiros...	13
Figura 7 – Espiral, camada e transporte de Ekman.	15
Figura 8 – Forçamento Sinótico da (a) Pressão (hPa) ao NMM e da (b) velocidade (ms^{-1}) e direção (vetores representados pelas setas) do vento aos 10 m a cima do NMM obtidos através da <i>Era-Interim</i> referentes a 23 de junho de 2016 às 18.00 (Fuso Zulo).....	18
Figura 9 – Campo da TSAM ($^{\circ}\text{C}$) prescrita em simulação (Testes 0 a 6) como condição de fronteira.	19
Figura 10 – Campo da pressão (hPa) calculado para NMM para os testes 0 a 4.	21
Figura 11 - Campos horizontais da velocidade do vento (ms^{-1}) aos (a) 10 m, (b) ~200 m e (d) ~320 m, acima do NMM, referentes aos testes 0 a 4. As setas representam os vetores da direção do vento.	22
Figura 12 – Perfis verticais da temperatura (K), temperatura potencial (K) e velocidade horizontal do vento (ms^{-1}) referentes ao ponto P2, referentes aos testes 0 a 4.	24
Figura 13 - Campos horizontais da velocidade do vento (ms^{-1}) aos (a) 10 m, (b) ~200 m e (d) ~320 m acima do NMM (as setas representam os vetores da direção do vento) e (b) da pressão (hPa) calculada para o NMM referentes aos testes 5 e 6.....	26
Figura 14 – DIM calculado com base na velocidade horizontal do vento aos 10m acima do NMM obtido nas simulações numéricas (Testes) 1 e 2 para as tarefas RIB, RAS-FS e RAS-FF.....	28
Figura 15 – Estrutura térmica da atmosfera abaixo dos 120 km	A-1
Figura 16 – Médias da pressão (milibares) ao NMM referentes (a) janeiro e a (b) julho. B-1	
Figura 17 – Valores da TSAM nas fronteiras de cada domínio utilizado no modelo WRF em cada simulação (Teste).....	Apd B-1



Resumo

O vento na costa oeste da Península Ibérica, sobretudo no Verão, resulta do efeito do Anticiclone situado sobre os Açores e da depressão térmica no centro da Península. A persistência deste regime de ventos, tipicamente de Norte (normalmente designado por *Nortada*), induz a processos de afloramento costeiro caracterizados pela subida de água fria, rica em nutrientes, das camadas mais profundas do oceano para a superfície junto a costa. Em resposta, gera-se um aumento do contraste térmico junto a costa, entre a relativamente baixa temperatura da superfície da água do mar (TSAM) e as altas temperaturas que se fazem sentir em terra, traduzindo-se num aumento de gradiente horizontal de pressão, e consequentemente num aumento da intensidade do vento junto a costa.

Este trabalho visa estudar a influência da variação da TSAM no vento costeiro, ao longo da costa oeste da Península Ibérica, testando diferentes processos de *feedback* associados. Os resultados obtidos baseiam-se na modelação numérica de um evento de vento forte durante o exercício combinado *Swordfish* 2016, através do modelo atmosférico de circulação regional WRF (*Weather Regional Forecast*) com prescrição de diferentes campos de TSAM. É ainda efetuada uma análise do impacto do vento resultante na condução das operações navais.

Palavras-chave

Nortada; Jato Costeiro da Península Ibérica; Temperatura da Superfície da Água do Mar; Gradiente horizontal de pressão; Interação oceano-atmosfera; Operações Navais



Abstract

The characteristics of Summer western Iberia coastal winds are defined by the Azores high-pressure system and a thermal low pressure inland, in the center of Iberia. The persistence of these winds, often from north (therefore often called Nortada), induces upwelling processes along the coast. In such processes, deep cold nutrient-rich water rises to the surface, lowering sea surface temperature at the coast. As a consequence, the thermal contrast between the ocean surface and land increases, which lead to the sharpening of the cross coastal pressure gradient, further intensifying the coastal wind speeds.

This study aims to explore the interplay of the sea surface temperature variations in the coastal winds characteristics, off western Iberia, testing the concept of a positive feedback between the upwelling system and coastal winds. The results shown on this study were obtained through a set of numerical simulations of a strong wind speed event that took place during the Swordfish 2016 exercise, where the different sea surface temperatures are used to force several WRF (Weather Regional Forecast) model simulations. An analysis of the impact of the wind, resulting from the different simulations, on the conduct of naval operations is also performed.

Keywords

Nortada; Iberian Peninsula Costal Low-level Jet; Sea surface temperature; Horizontal pressure gradient; ocean-atmosphere interaction; Naval Operations



Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos

CLAM	Camada Limite Atmosférica Marítima
DIM	Diagrama de Impacto de Missão
DPM	2017 – <i>Diretiva de Planeamento de Marinha</i> de 2017
HN	Hemisfério Norte
HL	Horas Locais
HN	Hemisfério Norte
HS	Hemisfério Sul
JCPI	Jato Costeiro da Península Ibérica
OG	Objetivos Geral
OE	Objetivo Específico
ON	Operações Navais
QC	Questão Central
PI	Península Ibérica
METOC	Meteorológico e Oceanográfico
NMM	Nível Médio do Mar
RAS – FF	Reabastecimento no Mar com Fragata
RAS – FS	Reabastecimento no Mar com Corveta
RIB	Operações com Semirrígida
SCFC	Sistema de Correntes Frias das Canárias
SST	<i>Sea Surface Temperature</i>
SW 16	Exercício <i>Swordfish</i> 2016
TSAM	Temperatura da Superfície da Água do Mar
UN	Unidades Navais
WRF	Weather Research and Forecasting



Introdução

A costa oeste da Península Ibérica (PI) encontra-se sobre a influência do Sistema Subtropical Semipermanente de Altas Pressões do Atlântico Norte, vulgarmente conhecido por Anticiclone dos Açores ou “Alta” dos Açores. A PI encontra-se igualmente sobre a influência do sistema de correntes frias de fronteira de Leste do Atlântico Norte designado por Sistema de Correntes Frias das Canárias (SCFC). Assim sendo, esta região costeira corresponde a uma zona de transição entre dois elementos muito distintos, oceano e terra, e é palco de diferentes fenómenos meteo-oceanográficos que resultam sobretudo de processos de interação entre o oceano e a atmosfera, e entre o oceano e terra. Um exemplo destes fenómenos são os jatos costeiros que se traduzem pela intensificação do vento costeiro na baixa troposfera¹. A intensificação do vento surge como consequência do forte gradiente horizontal de pressão que se desenvolve junto a costa em resposta ao forte contraste térmico, entre as altas temperaturas que se registam em terra, no Verão, e as temperaturas francamente mais baixas que se registam na superfície do mar.

A baixa temperatura da água do mar junto a costa, em comparação com terra, faz com que haja uma diminuição da evaporação e do teor de vapor de água no ar adjacente da baixa atmosfera. Por outro lado, a persistência de vento moderado a fresco com uma direção paralela a costa, reduz a advecção de ar marítimo húmido para terra junto a costa a baixas altitudes, potenciando que algumas regiões onde ocorrem jatos costeiros (Ranjha et al. 2014) sejam áridas ou mesmo desertas (Warner, 2004, p. 595).

O Jato Costeiro da Península Ibérica (JCPI) ocorre sobretudo durante os meses de Verão pela intensificação do vento na costa oeste da PI, vulgarmente conhecido por *Nortada* (Lopes, et al., 2009). A ocorrência do JCPI em um impacto significativo no clima regional nomeadamente ao nível da nebulosidade e da agitação marítima que se faz sentir na orla costeira de Portugal Continental (Soares, et al., 2014; Semedo, et al., 2017).

Compreender e conhecer as condições meteo-oceanográficas que afetam a orla costeira assume um papel deveras importante e estratégico para o respetivo Estado ribeirinho. O conhecimento científico destes fenómenos, nomeadamente dos jatos costeiros e das condições de vento extremo associado, permite compreender, e de certa forma mitigar, o possível impacto destes fenómenos na sociedade. A título de exemplo referem-se as atividades relacionadas com: a aviação (nebulosidade e vento a baixa altitude), navegação marítima (nebulosidade, vento e respetiva agitação marítima), atividade

¹ A estrutura térmica da atmosfera está detalhada no Anexo A —.



piscatória (processos de afloramento costeiro que potenciam um aumento de pescado), o aproveitamento energético do vento, controlo e gestão de portos e barras (nebulosidade, vento e agitação marítima), e o turismo.

Num contexto militar, o conhecimento científico destes fenómenos constitui um elemento fundamental no apoio à decisão, quer durante o planeamento quer durante a condução de operações militares. O impacto que as condições ambientais (informação geoespacial, meteorológica e oceanográfica) podem ter numa determinada área de operações pode condicionar a execução de qualquer operação militar, constituindo-se por isso um fator crítico no seu sucesso e uma vantagem competitiva para o comando. Por outro lado, a superioridade de informação ambiental nas operações navais completa-se com a integração do conhecimento do espaço geográfico onde estas decorrem, agregando os segmentos que compõem a dimensão física, que inclui a superfície do mar, a coluna de água, o fundo marinho, a topografia da margem terrestre adjacente, bem como o espaço aéreo e espacial circundante (Estado Maior da Armada, 2016).

No âmbito Naval, a *Diretiva de Planeamento de Marinha 2017* (DPM 2017), prevê no seu objetivo estratégico nove «Consolidar o conhecimento e a atuação no quadro das ciências do mar e da cultura marítima» (Ribeiro, 2017, p. 20). Segundo este objetivo, o conhecimento situacional do meio ambiental, nomeadamente com vista ao apoio de operações navais (ON) e marítimas, constituísse como um elemento potenciador e de sustentação da investigação científica, enriquecendo o conhecimento e a compreensão dos assuntos do mar.

O conhecimento e compreensão dos fenómenos que ocorrem no Espaço Estratégico de Interesse Nacional Permanente², nomeadamente na região costeira de Portugal Continental, e que são responsáveis pelo clima neste espaço, justifica de forma abrangente a atenção que este tema merece.

O objeto de estudo foi a interação oceano – atmosfera através da análise da influência da temperatura da superfície da água do mar (TSAM) no vento costeiro, durante um evento de JCPI registado no decorrer do exercício *Swordfish 2016* (SW 16).

O objetivo geral (OG) do trabalho é identificar, caracterizar e avaliar a influência que a variação da TSAM tem na estrutura (horizontal e vertical) do vento costeiro. De forma a

² Corresponde ao território nacional compreendido entre o ponto mais a norte, no concelho de Melgaço, até ao ponto mais a sul, nas ilhas Selvagens, e o seu ponto mais a oeste, na ilha das Flores, até ao ponto mais a leste, no concelho de Miranda do Douro, bem como o espaço interterritorial e os espaços aéreos e marítimos sob responsabilidade ou soberania nacional (Governo, 2013).



operacionalizar este OG foram estabelecidos três objetivos específicos definidos no Capítulo 1. A persecução dos OG e específicos foi alcançada através das questões central e derivadas definidas no mesmo capítulo.

A investigação seguiu as linhas do pensamento crítico definidas por Paul & Elder (2008) sendo que, o processo de investigação seguiu uma estratégia quantitativa utilizando o método experimental para a recolha e análise dos dados. O método utilizado visou responder às questões central e derivadas, de forma a cumprir com os objetivos estabelecidos. A estratégia utilizada teve por base a verificação e validação de conceitos, teorias e estudos prévios sobre o tema em estudo, através da verificação de relação entre variáveis (Creswell, 2013).

O estudo encontra-se organizado em cinco capítulos.

No primeiro capítulo é apresentado o percurso metodológico do trabalho.

No segundo capítulo pretende-se descrever e explicar os principais conceitos inerentes ao objeto de estudo, elencando as principais teorias e hipóteses existentes na relação causa-efeito entre a variação horizontal da TSAM e o campo do vento costeiro. Este capítulo tem como objetivo responder à questão derivada um.

No terceiro capítulo serão apresentados os resultados das simulações numéricas, com o modelo de circulação atmosférico regional WRF (Skamarock, et al., 2008), que refletem os mecanismos de *feedback* entre a variação da TSAM e a variação do vento, elencados no capítulo anterior, respondendo à questão derivada dois.

O quarto capítulo dedica-se à avaliação do impacto do vento costeiro resultante das várias simulações numéricas na condução das ON, nomeadamente as realizadas no âmbito do SW 16. Este capítulo visa responder à questão derivada três.

Na secção final deste trabalho são descritas as principais conclusões que permitiram responder à questão central do trabalho e é efetuada uma análise ao processo metodológico utilizado na recolha e análise de dados.



1. Percurso metodológico da investigação

Neste capítulo pretende-se apresentar o percurso metodológico desenvolvido na presente investigação.

1.1. Objeto de estudo e sua delimitação

O objeto de estudo da investigação é a interação oceano – atmosfera ao largo da costa oeste da PI, delimitado na sua abrangência pela temperatura da água do mar (oceano) e vento costeiro (atmosfera).

A base conceptual e os principais conceitos associados ao objeto de estudo desenvolveram-se a partir da revisão da literatura. Nesse sentido, procurou-se identificar as principais características inerentes à circulação atmosférica ao largo da PI, assim como, os principais pré-requisitos na ocorrência de jatos costeiros e a consequente resposta do oceano face ao estímulo da circulação atmosférica.

Após estabelecidos os principais pressupostos inerentes às variáveis que constituem o objeto de estudo formulou-se o problema a estudar conforme está representado na Figura 1. O problema a estudar é a identificação, caracterização e avaliação da relação de causa-efeito entre a variação da TSAM e o vento costeiro e consequentemente na condução de ON, testando diferentes processos de *feedback* associados.

Após a formulação do problema a estudar foram definidos os objetivos gerais e específicos, assim como, formuladas as questões central e derivadas da presente investigação.

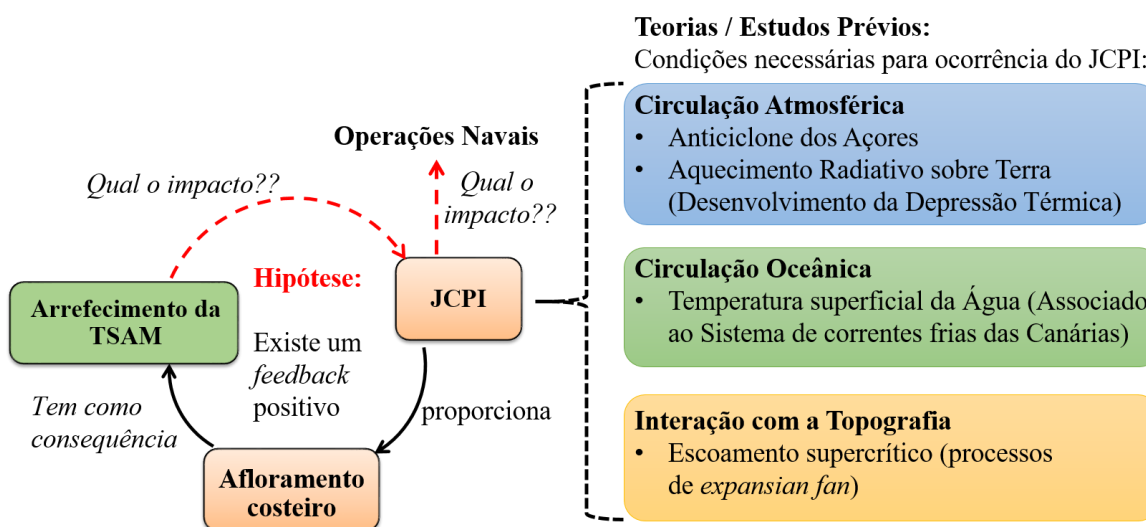


Figura 1 – Formulação do Problema de Investigação

Fonte: (Autor, 2016)

O domínio espacial e temporal da representação, análise e comparação de dados (variáveis) foi confinado à região costeira a oeste da PI durante um evento de JCPI registado no dia 23 de junho de 2016, às 20.00, horas locais (HL). No domínio do conteúdo recorreu-se a simulações numéricas, onde diferentes campos de TSAM foram utilizadas para forçar o modelo WRF, a partir do qual foi analisado o campo do vento.

1.2. Identificação e classificação das variáveis

A relação de causa-efeito que a variação da TSAM tem no vento costeiro, de acordo com o objeto de estudo, restringe-se às seguintes variáveis:

- TSAM (oceano);
- Campo do vento (direção e velocidade) sobre o oceano aos 10 m a cima do nível médio do mar (NMM) e em altura;
- Temperatura atmosférica aos 2 m e em altura;
- Pressão ao NMM;
- Temperatura Potencial em altura;

As relações entre as variáveis acima indicadas estão explanadas na Figura 2, de acordo com a seguinte classificação:

Variável Independente: TSAM. Esta variável é prescrita pelo observador e assimilada no modelo WRF como condição de fronteira³.

Variável Dependente: Campo do Vento. A direção e velocidade do vento são calculadas a partir das componentes transversais e zonais (u, v) extraídas a partir do modelo WRF para os 10 m acima do NMM e para cada nível do modelo.

Variáveis Intervenientes: Temperaturas atmosférica e potencial. Estas variáveis são extraídas diretamente do modelo WRF para os 10 m acima do NMM e para cada nível do Modelo.

Variáveis Contextuais: A Pressão ao NMM calculada a partir dos dados do modelo WRF.

³ As condições de fronteira utilizadas para forçar o modelo, nas diversas simulações numéricas, serão descritas no capítulo 3.

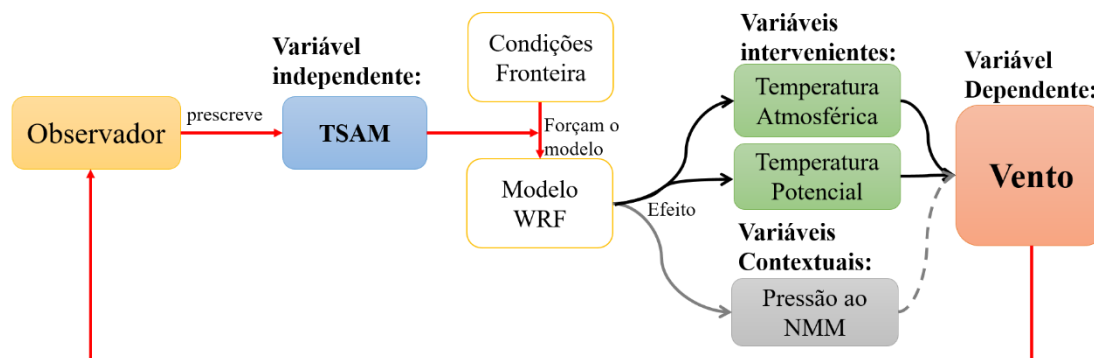


Figura 2 – Relação entre as variáveis.

Fonte: (Autor, 2016)

1.3. Objetivos da Investigação

Com esta investigação pretende-se testar o potencial *feedback* positivo que a variação da TSAM tem na intensificação do vento. A análise efetuada surgiu em função da necessidade de compreender os fenómenos de interação oceano-atmosfera que, em muito, são responsáveis pelo clima na orla costeira de Portugal Continental e, de forma a testar as teorias que lhe estão associadas através da verificação da relação entre as variáveis.

A formulação dos objetivos e hipóteses associados ao objeto de estudo resulta da formulação inicial do problema (ver Figura 1).

1.3.1. Objetivo Geral (OG):

O **OG** do trabalho é identificar, caracterizar e avaliar a influência que a prescrição da TSAM tem na estrutura (horizontal e vertical) do campo do vento, quando ocorrem jatos costeiros a oeste da costa da PI, com recurso à modelação numérica (modelo WRF).

1.3.2. Objetivos Específicos (OE):

De forma a operacionalizar o OG foram definidos os seguintes OE:

OE 1: Identificar os pré-requisitos associados à ocorrência de jatos costeiros e consequentemente de processos de afloramento costeiro.

OE 2: Testar os pressupostos teóricos associados à relação causa-efeito entre a variação espacial do gradiente da TSAM e a intensificação do vento (jato costeiro).

OE 3: Verificar o impacto que o vento costeiro, resultante da prescrição de diferentes TSAM, pode ter na condução de ON.



1.4. Questões da Investigação e Hipóteses

De forma a alcançar o OG e respetivos OE a investigação foi orientada com vista a responder às questões derivadas associadas a cada objetivo. Pretende-se igualmente testar as hipóteses associadas às teorias elencadas na base conceptual.

1.4.1. Questão Central (QC)

QC: Qual a impacto que a variação da TSAM tem na estrutura do vento (velocidade aos 10m e a vários níveis de altura) quando ocorrem jatos costeiros, na região a oeste da PI?

1.4.2. Questões Derivadas (QD) e Hipóteses (H)

QD1: Quais as condições (pré-requisitos) que potenciam a ocorrência de jatos, na costa oeste da PI?

QD2: Qual a correlação entre a distribuição espacial da TSAM e variação do vento costeiro, na costa oeste da PI, face às mesmas condições sinóticas?

H1: O arrefecimento da TSAM junto a costa aumenta o contraste térmico entre o mar e terra, que por sua vez se traduzirá num aumento do gradiente de pressão e consequentemente numa potencial intensificação do vento.

QD3: Qual a correlação que a intensificação do vento costeiro, face à variação da TSAM, poderá ter na condução de ON?

H2: A intensidade do vento tem impacto na agitação marítima e afeta a execução de ON, nomeadamente a utilização de semirrígidas e/ou condução de Reabastecimento no Mar (RAS).

1.5. Metodologia da Investigação

A estratégia e o plano de pesquisa deste trabalho tiveram por base os fundamentos previstos no manual *Orientações metodológicas para a elaboração de trabalhos de investigação* do IESM (Santos, et al., 2015). Foi seguida uma Estratégia Quantitativa através de um Desenho de Pesquisa Experimental assente na verificação da relação entre variáveis (ver Figura 2).



Numa primeira fase, a fase exploratória, efetuou-se a revisão da Literatura e explanaram-se os conceitos inerentes ao objeto de estudo – a interação oceano-atmosfera. A base conceptual desenvolvida identifica e descreve as principais teorias que caracterizam a ocorrência de jatos costeiros e o consequente desenvolvimento de processos de afloramento costeiro. Findada esta primeira fase, são elencadas as principais hipóteses que sustentam a existência de processos de *feedback* entre a ocorrência de jatos costeiros, variação da TSAM e a intensificação do vento junto a costa.

Na segunda fase, Fase Analítica, o processo de investigação foi desenvolvido tendo em conta a obtenção de resultados, que permitam testar as hipóteses elencadas visando responder objetivamente às questões central e derivadas, e cumprir os objetivos referidos anteriormente. Inicialmente foram elencados os principais conceitos estruturantes inerentes ao objeto de estudo que serviram de base para o desenvolvimento das experiências numéricas conduzidas.

Foram realizadas diversas simulações com o modelo WRF, versão 3.8.1, com uma resolução horizontal de 3 km. Cada simulação correspondeu a uma corrida independente do modelo compreendendo o período entre 20 a 26 de junho de 2016, coincidente com o decorrer do SW16.

Em cada simulação o modelo foi forçado com as condições de fronteira provenientes da Reanálise *Era-Interim* (Dee et al, 2009) do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, atualizadas a cada 6 horas. O campo da TSAM foi prescrito e introduzido como uma condição de fronteira diferente para cada simulação de forma fixa e inalterável durante cada corrida do modelo. As simulações foram realizadas a partir do Instituto Dom Luiz da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

Na Figura 3 estão representados os domínios utilizados pelo modelo WRF e a área contida no domínio referente aos 3 km de resolução horizontal, com a respetiva topografia (m) e definição de dois pontos-chave (P1 e P2), para a representação de resultados.

O controlo das experiências foi efetuado a partir de uma primeira simulação com o campo da TSAM contante em toda a área. A relação entre as variáveis, explanada na Figura 2, foi realizada com base na comparação de resultados obtidos em cada simulação, fazendo-se variar o campo da TSAM ao longo dos domínios do modelo WRF.

De forma a otimizar a comparação dos resultados obtidos com os pressupostos associados aos vários mecanismos de *feedback* entre a variação da TSAM e o vento costeiro, foi analisado em detalhe o evento de JCPI identificado (23 de junho de 2016).

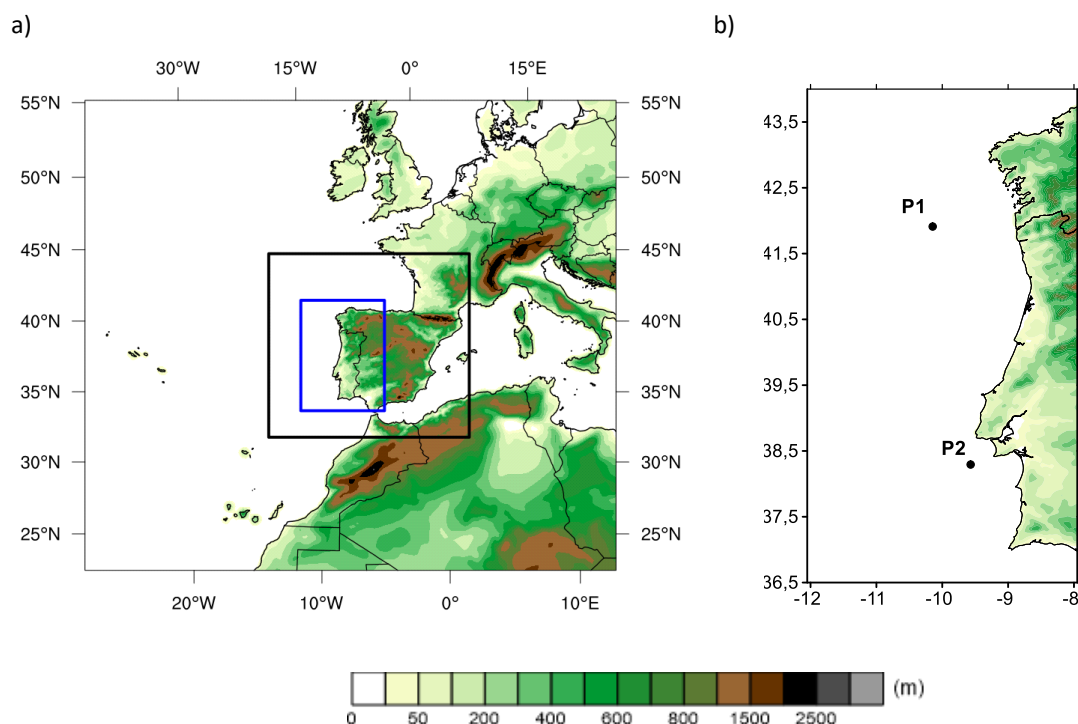


Figura 3 - Limites dos domínios utilizados na simulação do modelo WRF com a respetiva topografia (m) com (a) resolução horizontal de 27 km (D01; domínio exterior), 9 km (D02; linha preta) e 3 km (D03, linha azul); (b) Representação da área utilizada para ilustração de resultados (compreendida no domínio mais interno) com representação de 2 pontos chave: P1 (41.96N 10.19W) e P2 (38.32N 9.58W).

Fonte: (Autor, 2016)

A avaliação do impacto do campo do vento, resultante de cada simulação numérica, nas ON foi efetuada, nesta fase, através da construção de diagramas de impacto de missão tendo em conta as principais séries conduzidas no SW16.

Na Fase Conclusiva é respondida à QC, apresentando-se uma discussão dos resultados obtidos, assim como, uma avaliação à verificação das hipóteses assumidas. Nesta fase, é ainda abordada as eventuais vulnerabilidades associadas ao processo metodológico utilizado e identificam-se possíveis investigações a conduzir de futuro.

1.6. Modelo desenvolvido na investigação

O modelo desenvolvido para estudar a influência que a variação da TSAM tem no vento, junto a costa, encontra-se explanado no Apêndice A. O Desenho Experimental desta pesquisa foi desenvolvido com base na formulação de objetivos que por sua vez orientaram as questões elencadas de acordo com o objeto de estudo definido. O intuito desta investigação visa dar a conhecer como se processam os fenómenos de interação oceano-



atmosfera na região da costa oeste da PI. Posteriormente pretende-se simular, através de experiências numéricas, os processos de interação entre a TSAM e o vento costeiro de forma a avaliar o impacto deste tipo de fenómenos no clima costeiro da PI, concretamente na condução de ON.

2. Processos de interação oceano-atmosfera nas regiões costeiras

Neste capítulo pretende-se responder à QD1: Quais as condições (pré-requisitos) que potenciam a ocorrência de jatos, na costa oeste da PI? Para responder a esta questão é necessário introduzir os conceitos estruturantes referentes aos processos de interação entre o oceano e a atmosfera nas regiões costeiras, nomeadamente na região a oeste da PI, responsáveis pela intensificação do vento costeiro e consequentemente pela ocorrência de jatos costeiros.

Os conceitos abordados neste capítulo resultam da revisão da literatura levada a cabo durante a fase exploratória.

2.1. Formação dos Jatos Costeiros

A formação dos jatos costeiros está associada a um forçamento sinótico característico das latitudes médias, nas regiões a leste das bacias oceânicas pela presença dos sistemas semipermanentes de altas pressões sobre os oceanos e de depressões térmicas sobre terra.

A caracterização dos jatos costeiros foi abordada no estudo dos autores Winant, et al. (1998) e Rogers, et al. (1998) através de campanhas na costa oeste da Califórnia e por Burk & Thompson (1996), Tjernström (1999) e Tjernström & Grisogono (2000) através de modelação numérica. Segundo estes autores os jatos costeiros são essencialmente um fenómeno de verão que ocorrem nas regiões a leste das bacias oceânicas, no flanco leste dos sistemas semipermanentes de altas pressões⁴ e correspondem às regiões das correntes frias dos oceanos. Na Figura 4 estão representados e localizados os principais sistemas de correntes oceânicas.

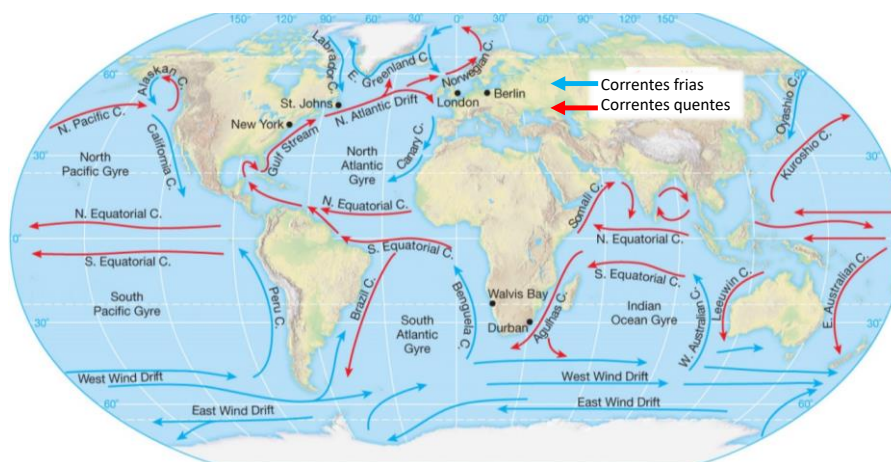


Figura 4 – Localização das Correntes Oceânicas globais

Fonte: (Adaptado de Education, 2013)

⁴ No Anexo B — são identificadas as localizações dos sistemas de semipermanentes altas pressões.

Mais recentemente Ranjha, et al. (2013) efetuou a climatologia global dos jatos costeiros seguindo a metodologia do estudo prévio de Winant, et al. (1988). Neste estudo foram identificados eventos de jatos costeiros no Hemisfério Norte (HN) nas regiões costeiras da Califórnia, Península Ibérica e Noroeste de África e, no Hemisfério Sul (HS) ao longo das regiões costeiras do Perú e Chile, Namíbia e Angola e a oeste da Austrália. A Figura 5 representa a localização global de jatos costeiros com a respetiva frequência de ocorrência, durante o Verão Boreal e Austral nos HN e HS, respetivamente.

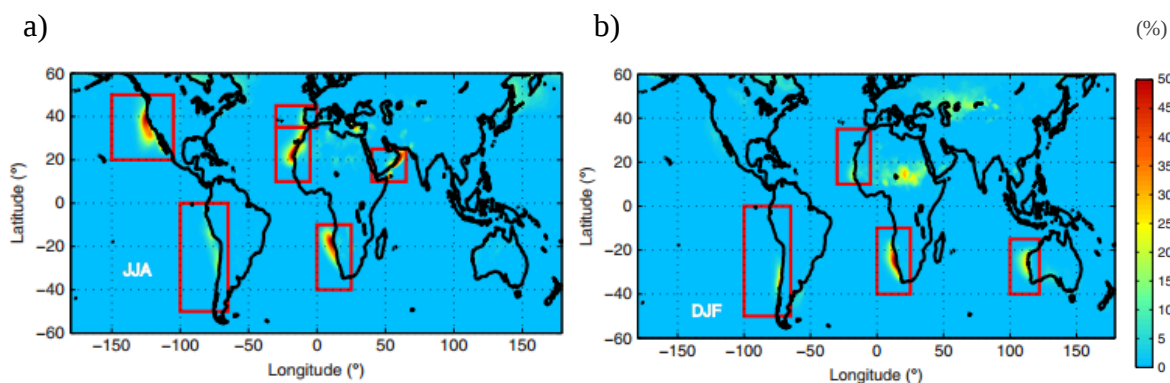


Figura 5 – Mapas Globais da Frequência de Ocorrência (%) de jatos costeiros no Verão (a) Boreal (junho, julho e agosto – JJA) e (b) Austral (dezembro, janeiro e fevereiro – DJF)

Fonte: (Ranjha, et al., 2013)

A climatologia do JCPI foi introduzida por Soares, et al. (2014) com recurso à modelação numérica com uma resolução de 9km através do modelo WRF. Em complemento a este trabalho foi desenvolvida por Rijo, et al. (2016) a caracterização climatológica da estrutura e da variabilidade do JCPI.

2.1.1. Processos dinâmicos associados à formação dos Jatos Costeiros

Os jatos costeiros, nomeadamente o IPCJ, apresentam um máximo na velocidade do vento a uma altitude relativamente baixa (a baixo dos 1000m; Semedo, 2004; Ranjha, et al., 2013; Soares, et al., 2014). A altitude a que ocorre a velocidade máxima do vento corresponde ao nível do jato e está confinada à altura da camada limite atmosférica marítima (CLAM), que por sua vez está circunscrita à zona onde ocorre inversão da temperatura em altura. Esta inversão tem lugar porque existem diferentes temperaturas entre o ar subsidente do Anticiclone dos Açores (mais quente), em altura, e o ar mais frio, junto à superfície, que arrefece pelo contacto com a água fria da superfície do mar (Figura 6).

A diminuição da temperatura da água do mar à superfície em direção a costa faz com a altura da inversão da temperatura e, consequentemente a altura da camada limite, diminua em direção a costa, de oeste para este (ar mais frio e mais denso ocupa menos espaço). Associado a esta diminuição da altura da inversão e da altura da CLAM em direção a costa e ao forte gradiente horizontal de temperatura (e consequentemente de pressão) está a intensificação da velocidade do vento em altura, em resposta ao vento térmico, atingindo o máximo no máximo declive da inversão (Beardsley, et al., 1987).

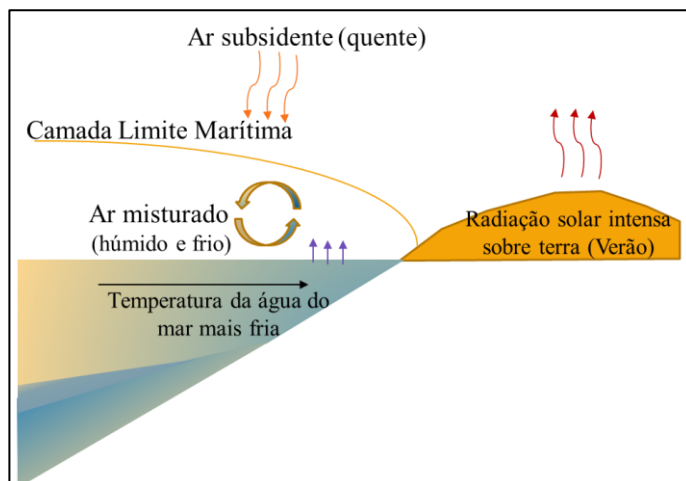


Figura 6 – Ilustração conceptual dos processos de interação oceano-atmosfera num ambiente similar às regiões costeiras que potenciam a formação de jatos costeiros.

Fonte: (Autor, 2016)

A variação diurna no aquecimento radiativo faz com que o gradiente horizontal de pressão atinja o máximo entre o final da tarde e o início da noite, o que implica que haja um aumento significativo na intensidade do vento nesse período (Beardsley, et al., 1987).

Pese embora os jatos costeiros tenham a sua origem à escala sinótica, localmente são intensificados pelo aumento do gradiente horizontal de pressão que se faz sentir junto a costa (em resposta ao aumento do contraste térmico mar-terra) e pela interação do escoamento (vento) com a topografia. Quando o escoamento interage com as zonas proeminentes de costa, como é o caso dos Cabos (por exemplo o Cabo Finisterra, o Cabo da Roca e o Cabo de S. Vicente) são geradas ondas gravíticas que se propagam na camada limite, na zona de inversão. Estas ondas gravíticas são responsáveis pelo ajustamento do vento em termos de direção e velocidade (Winant, et al., 1998; Söderberg & Tjernström 2001). O escoamento designa-se por supercrítico quando as ondas gravíticas se propagam a uma velocidade inferior à do escoamento. Esta situação ocorre quando a linha de costa “fecha” em direção ao escoamento (por exemplo na zona a barlavento do Cabo da Roca) levando ao acumular de massa, ao aumento da altura da camada limite e consequentemente



à formação de nebulosidade. Este aumento “brusco” da altura da camada limite designa-se por *hydraulic jump*. O escoamento diz-se supercrítico quando as ondas gravíticas se propagam a uma velocidade superior à do escoamento. Neste tipo de situações a costa “abre” relativamente ao escoamento (por exemplo nas regiões a sul dos Cabos Finisterra e Roca) e ação das ondas gravíticas resulta numa diminuição da altura da camada limite e consequentemente numa intensificação do vento por efeito de *Bernouli* (Winant, et al., 1998; Rogerson, 1999; Söderberg & Tjernström, 2001), i.e., por diminuição da secção vertical do escoamento. Este processo designa-se por *expansion fan*.

2.1.2. Critério de deteção de jatos costeiros

A deteção da ocorrência de jatos costeiros utilizada no presente estudo baseia-se nos critérios definidos por Ranjha et al. (2013). Estes critérios foram definidos com base na análise dos perfis verticais do vento e da temperatura. Assim sendo, considera-se que os jatos ocorrem se se verificarem, cumulativamente, os seguintes critérios:

- A altura máxima do nível do jato ocorre no 1º km de altura;
- A velocidade do vento ao nível do jato é pelo menos 20% superior à velocidade do vento à superfície;
- A velocidade do vento acima do nível do jato diminui, atingindo pelo menos 80% da velocidade do vento à superfície antes dos 5km acima do nível do jato;
- A temperatura ao nível do jato é inferior à temperatura correspondente ao 2º nível acima do nível do jato (critério da inversão de temperatura);
- O valor do máximo da temperatura não ocorre à superfície (critério de rejeição da inversão de temperatura na base).

2.2. Processos de *feedback* associados à ocorrência de jatos costeiros

2.2.1. Afloramento Costeiro

A contínua ação do vento sobre a superfície do mar induz uma resposta por parte da camada superficial do mar que se traduz por um movimento horizontal da água, ou seja, é induzida uma corrente superficial. Por ação da força de *Coriolis* a corrente à superfície terá

uma direção defletida em cerca de 45° para a direita (no HN) em relação à direção do vento, e um transporte de água resultante total, na coluna de água, de 90° para a direita da direção do vento. O movimento horizontal da água na camada de superfície do oceano, induzido pela ação contínua do vento, propaga-se na vertical para as camadas adjacentes da coluna de água. Esta transferência vertical da quantidade de movimento horizontal tem a designação de tensão do vento.

A circulação (movimento) forçada pelo vento resulta dum equilíbrio entre as forças da tensão do vento, de *Coriolis* e de atrito em que a distribuição vertical das velocidades horizontais, e respetivas direções, seguem o modelo da Espiral de *Ekman* (Figura 7). Como consequência existe uma deslocação resultante total de água numa direção de 90° para a direita (HN) em relação à direção do vento, entre a superfície e a base da camada de *Ekman* que corresponde ao Transporte de *Ekman* (Figura 7).

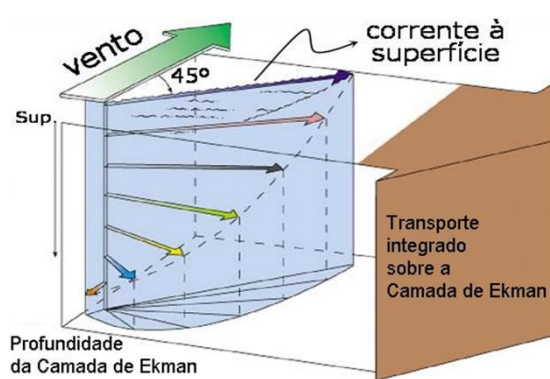


Figura 7 – Espiral, camada e transporte de *Ekman*.

Fonte: (Ríos, 2015)

Os processos de afloramento costeiro são caracterizados pela subida (“*pumping*”) de água oriunda de camadas mais profundas que substitui água de superfície transportada para fora da costa através do transporte de *Ekman*. Esta água profunda que é bombada para a superfície é mais fria e rica em nutrientes (Cushman-Roisin & Beckers, 2011).

2.2.2. Correlação entre os processos de Afloramento Costeiro e o Vento Costeiro

O estudo da interação oceano-atmosfera através da correlação da temperatura da camada superficial do oceano com o campo vento à superfície no sistema da corrente da Califórnia foi levado a cabo por Chelton, et al. (2006). Com base nos resultados deste

estudo os autores mostraram que o desenvolvimento de frentes de afloramento costeiro (“*SST – sea surface temperature – fronts*”) se correlacionam positivamente com o campo de vento à superfície (“*surface wind stress*”). Por outro lado, este estudo revelou que a influência do oceano na atmosfera, por ação da temperatura da água do mar (à superfície), altera a estrutura da camada limite e consequentemente o campo do vento. A influência que o campo da temperatura superficial do oceano tem na CLAM e respetivamente no campo do vento foi alvo de estudo por parte de Perlin, et al., (2014), através de modelação numérica na região da corrente das agulhas. Os resultados deste estudo evidenciaram uma correlação entre a variação do gradiente da temperatura da superfície do mar e a variação do vento costeiro, pese embora com algumas reservas no que diz respeito a um potencial *feedback* positivo entre o afloramento costeiro de água fria e a intensificação do campo do vento.

Como conclusão deste capítulo e em resposta à QD1 consideram-se fatores preponderantes para a ocorrência de jatos costeiros a existência de um padrão de vento predominante de setores de Norte (paralelo a costa) em resultado da presença de um Anticiclone localizado sobre o oceano e uma depressão térmica desenvolvida sobre Terra. São estes fatores que fazem com que ocorra *Nortada* no Verão, ao longo da costa oeste da PI. Não obstante, para que ocorram jatos costeiros é necessário que exista uma intensificação do padrão de vento existente potenciado pela TSAM e pela configuração topográfica da costa.

A TSAM foi apresentada neste capítulo como um contributo para a formação de jatos costeiros, mas também, como uma consequência da ação contínua do vento. Este processo de *feedback* associado à interação oceano-atmosfera que caracteriza a formação de jatos costeiros é aqui elencado como uma hipótese teórica responsável pela potencial intensificação do vento costeiro.

3. Resposta do vento costeiro face a diferentes campos de temperatura à superfície da água do mar

O presente capítulo tem por objetivo responder à QD2: Qual a correlação entre a distribuição espacial da TSAM e variação do vento costeiro, na costa oeste da PI, face às mesmas condições sinóticas?

A resposta a esta questão baseia-se nos resultados obtidos através da realização de experiências numéricas com recurso ao modelo WRF produzindo a reanálise global *Era-Interim* do Centro Europeu para o período entre 20 a 26 de junho de 2016 com uma resolução de 3 km.

Os resultados aqui apresentados visam trazer uma perspetiva de como a TSAM pode influenciar a estrutura do vento sob as mesmas condições de forçamento sinótico. Nesse sentido, foram efetuadas diversas corridas (simulações) através do modelo WRF de forma isolada mas, forçadas com as mesmas condições de fronteira provenientes da reanálise *Era-Interim*, atualizadas a cada 6 horas durante o período de cada simulação.

As diferentes experiências numéricas caracterizaram-se pela introdução do campo da TSAM como uma condição de fronteira fixa e inalterável durante o período de simulação. Para cada experiência foi explorado uma assinatura diferente na distribuição do campo da TSAM, constituindo os testes explanados na Figura 9.

A análise da estrutura do campo do vento e a comparação entre as variáveis envolvidas (Figura 2), resultantes de cada experiência, confinam-se aos resultados do modelo WRF de 23 de junho de 2016 às 20.00 HL (evento de JCPI).

3.1. Caracterização sinótica do evento a estudar

O padrão sinótico que caracterizou o evento de 23 de junho de 2016 encontra-se representado na Figura 8 através de mapas da pressão (hPa) ao NMM (Figura 8a) e do campo do vento aos 10m acima do NMM (Figura 8b) do Centro Europeu *Era-Interim* referente às 18.00 (Fuso Zulo). É perceptível a ligeira deslocação do centro de altas pressões para oeste, em relação ao arquipélago, com configuração bem pronunciada que se estende em crista na direção da Biscaia. Pode-se ainda observar as diferenças de pressão existentes, à escala sinótica, entre o centro do Anticiclone (~1034 hPa) e o centro da PI (~1016 hPa), traduzindo-se numa taxa de variação da pressão (gradiente de pressão) na ordem dos 0,008hPa/km.

Associado às características do Anticiclone, descritas no parágrafo anterior, existe um padrão de vento sinótico (Figura 8b) que caracteriza a circulação atmosférica no Atlântico Norte no dia 23 de junho. Na costa oeste da PI e em consequência do gradiente de pressão existente é visível a predominância de ventos de setores de Norte. É igualmente perceptível uma ligeira intensificação do vento a sul do Cabo Finisterra que pode ser justificada por processos de *expansion fan*. Este padrão do vento está de acordo o processo de formação de jatos costeiros descrito na secção 2.1.

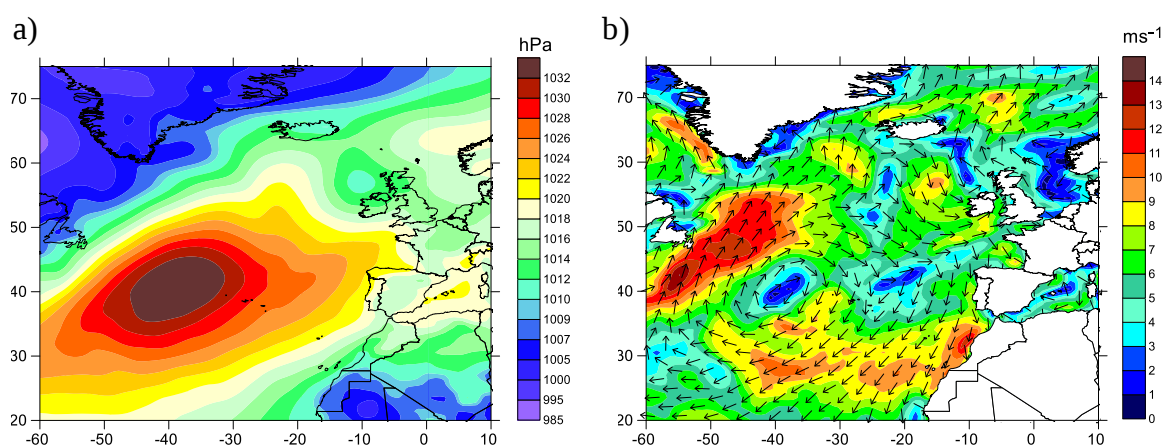


Figura 8 – Forçamento Sinótico da (a) Pressão (hPa) ao NMM e da (b) velocidade (ms^{-1}) e direção (vetores representados pelas setas) do vento aos 10 m a cima do NMM obtidos através da *Era-Interim* referentes a 23 de junho de 2016 às 18.00 (Fuso Zulo).

Fonte: (Autor, 2017)

3.2. Análise dos mecanismos de *feedback*

As simulações realizadas correspondem a diferentes testes com o objetivo de se testar os vários mecanismos de *feedback*, nomeadamente a relação causa-efeito e associação, entre a variação da TSAM e a intensificação do vento costeiro.

A verificação da relação entre variáveis em cada teste inclui:

- Análise do campo do vento horizontal (direção e velocidade do vento) no domínio de estudo, calculado a partir do modelo WRF para os 10 m acima do NMM e para os terceiro e quarto níveis do Modelo WRF (~200 m e ~320 m, respetivamente);
- Análise pressão calculada a partir do modelo WRF para o NMM no domínio de estudo.
- Análise dos perfis verticais das temperaturas atmosférica e potencial e vento (velocidade horizontal) extraídos do modelo para os pontos P1 e P2.

3.2.1. Prescrição dos campos da TSAM

Para se estabelecer uma relação causa-efeito entre a variação da TSAM e o campo do vento foram conduzidas 5 simulações (Testes 0 a 4) com diferentes distribuições de TSAM conforme ilustrado na Figura 9.

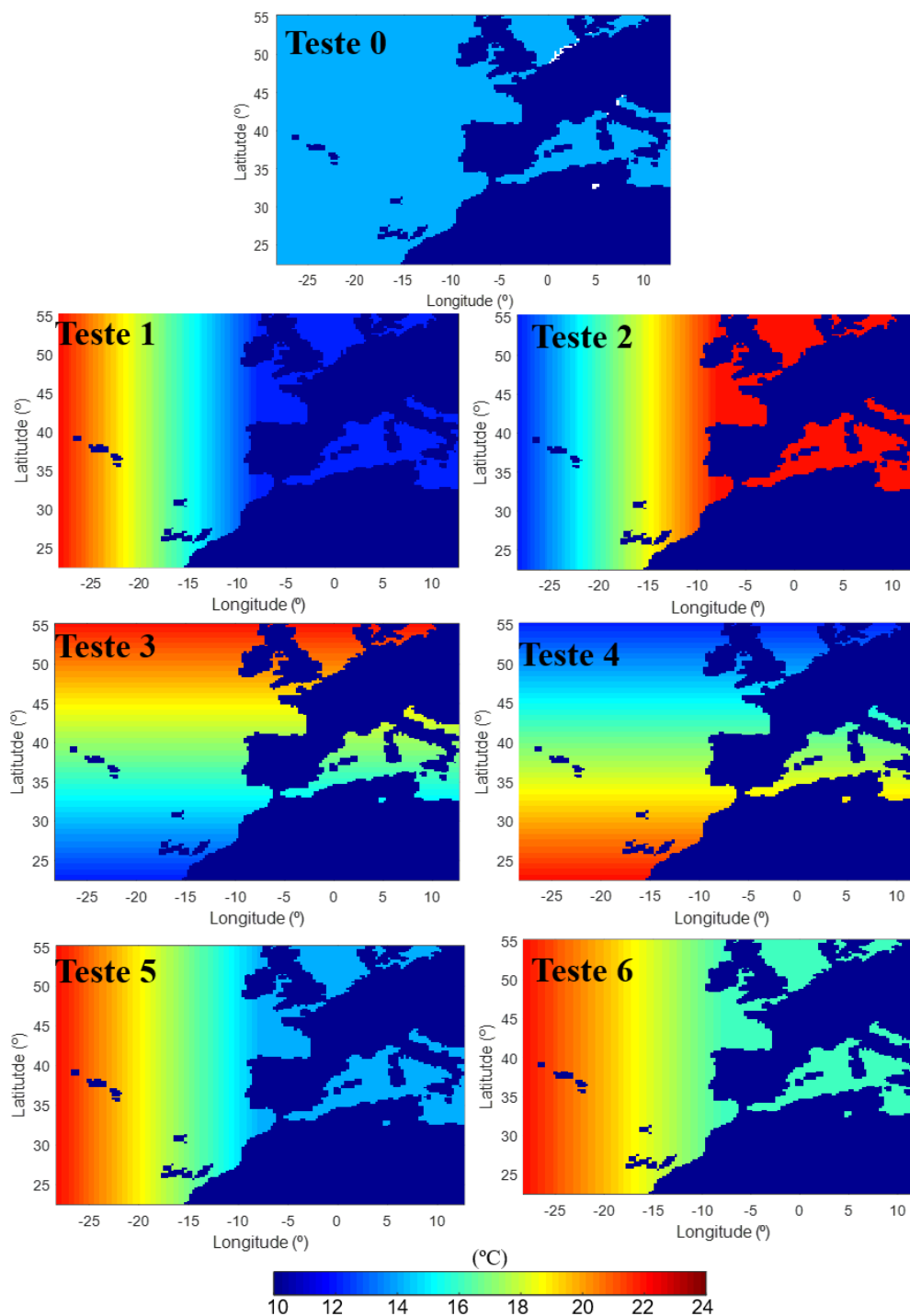


Figura 9 – Campo da TSAM (°C) prescrita em simulação (Testes 0 a 6) como condição de fronteira.

Fonte: (Autor, 2017)

A primeira simulação foi efetuada com a prescrição da TSAM constante com o valor de 14 °C em todo domínio. Esta experiência, intitulada como Teste 0, serviu de controlo para comparação de variáveis em relação às experiências (Testes) 1 a 4.

O Teste 1 consistiu na prescrição da TSAM com uma variação transversal em relação a costa, i.e., segundo uma direção Este – Oeste, em que junto a costa o valor foi de 12°C e no limite oeste de 22°C.

No Teste 2 a distribuição da TSAM foi definida em sentido oposto ao do Teste 1, junto a costa estabeleceu-se o valor foi de 22°C e no limite oeste de 12°C.

O Teste 3 consistiu na prescrição da TSAM com uma variação longitudinal em relação a costa, i.e., segundo uma direção Norte – Sul, com valor no limite norte do domínio de 12°C e a sul de 22°C.

No Teste 4 prescreveu-se a TSAM cuja uma variação foi no sentido oposto ao Teste 3, de forma a que no limite norte foi definido o valor de 22°C e a sul de 12°C.

A análise de associação e dependência entre a variação da TSAM junto a costa e a intensificação do vento foi efetuada com recurso aos Testes 1, 5 e 6. Neste processo de análise privilegiou-se a distribuição do campo da TSAM transversal a costa semelhante ao que foi efetuado no Teste 1, com o valor de 22°C no limite oeste do domínio, mas junto a costa fez-se variar os valores da TSAM para os 14°C (Teste 5) e para os 16°C (Teste 6).

Os valores de TSAM definidos em cada teste nas fronteiras dos domínios utilizados pelo modelo WRF (Figura 3) encontram-se detalhados no Apêndice B.

3.2.2. Análise da relação causa-efeito entre a variação espacial da TSAM e o Vento Costeiro

Nesta secção serão analisados os resultados obtidos nos Testes 1 a 4 por comparação com o Teste 0.

A Figura 10 representa o valor da pressão (hPa) calculado para o NMM, obtido em cada teste, para todo o domínio em estudo. De acordo com a análise efetuada aos resultados obtidos no Teste 0, constata-se que a variação da pressão é bastante notória segundo uma direção transversal (perpendicular) a costa, com maior proeminência na região mais a norte (Cabo Finisterra). Esta variação tão pronunciada deve-se sobretudo ao forçamento sinótico que caracteriza o evento de dia 23 (ver Figura 8). Com um arrefecimento da TSAM junto

a costa (Teste 1) é perceptível um ligeiro incremento na variação da pressão na região de fronteira mar-terra.

Por sua vez, com TSAM mais quente junto a costa (Teste 2) é perceptível a consequente diminuição da variação da pressão na direção transversal (perpendicular) em relação a costa.

A variação longitudinal da TSAM (Testes 3 e 4) suaviza ligeiramente a variação da pressão sendo que, não é tão pronunciada quanto à variação constatada no Teste 2. É ainda alvo de ressalvo que quando se faz variar a TSAM de mais fria para mais quente, no sentido Norte-Sul (Teste 4) a diminuição da variação da pressão segundo a direção Este-oeste é muito ténue, mas a configuração dessa variação no sul da área (região do Cabo da Roca) efetua-se de forma quase paralela em relação a costa.

Os resultados aqui descritos estão de acordo com os pré-requisitos que potenciam os jatos costeiros nomeadamente a existência de um gradiente de pressão com origem sinótica que é intensificado pelo contrastaste térmico entre terra e mar (Teste 1), conforme explanado no capítulo 2.

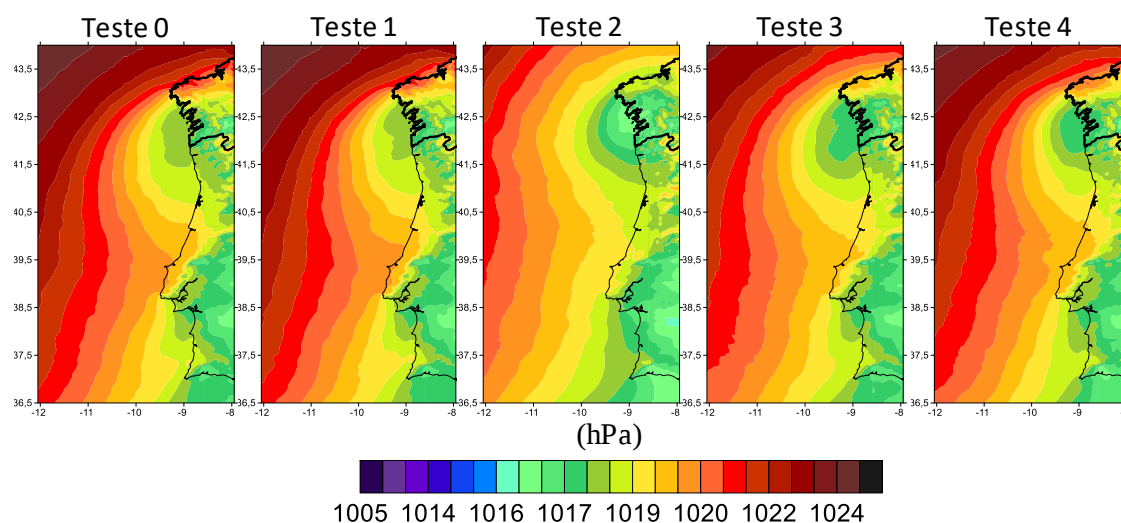


Figura 10 – Campo da pressão (hPa) calculado para NMM para os testes 0 a 4.

Fonte: (Autor, 2017)

A Figura 11 ilustra o campo do vento à superfície (10 m acima do NMM) e para os 3º e 4º níveis do modelo WRF (~200 e 320 m, respetivamente), obtido em cada teste para todo o domínio em estudo. Os níveis escolhidos correspondem à altura (m) onde a velocidade do vento é máxima.

Os resultados obtidos no Teste 0, para o vento à superfície permitem identificar uma aceleração do vento na região a sul do Cabo Finisterra que se estende até zona da Figueira

da Foz e uma segunda aceleração do vento a sul do Cabo da Roca que se estende pela restante região sul do domínio de estudo. Esta segunda aceleração do vento deve-se à interação do escoamento (vento) com o Cabo da Roca sendo explicada pelo processo de *expansion fan* descrito no capítulo 2. A consequente alteração de direção do vento a sul dos Cabos Finisterra e Roca são explicáveis pelo mesmo processo. Em altura verifica-se que a máxima intensidade do vento na região do Cabo Finisterra ocorre aos 320 m e que a sul da Roca ocorre aos 200 m.

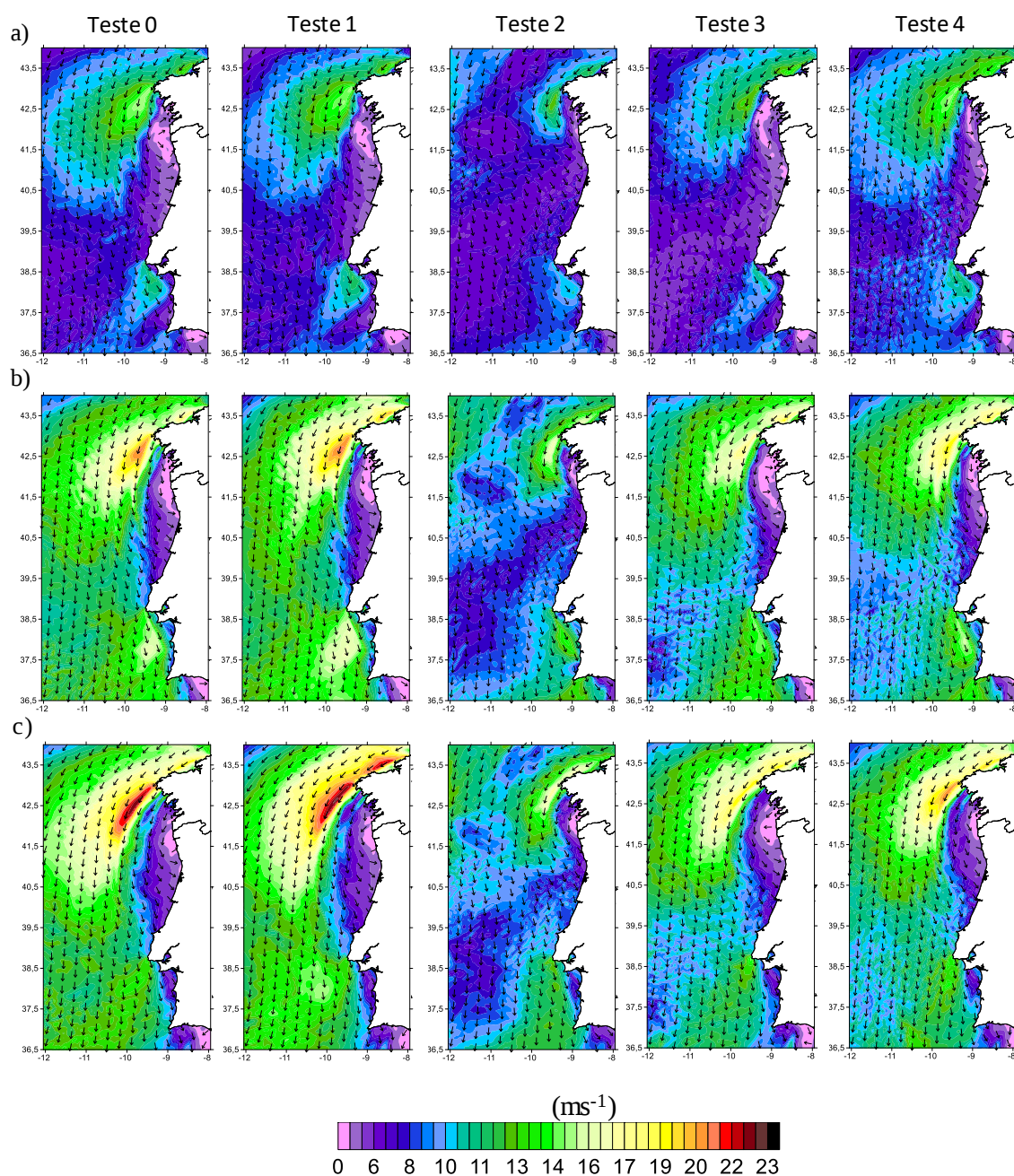


Figura 11 - Campos horizontais da velocidade do vento (ms^{-1}) aos (a) 10 m, (b) ~200 m e (c) ~320 m, acima do NMM, referentes aos testes 0 a 4. As setas representam os vetores da direção do vento.

Fonte: (Autor, 2017)

Quando a distribuição da TSAM varia numa direção Este-Oeste, com temperaturas mais baixas junto a costa (Teste 1), verifica-se um aumento na intensidade máxima do vento, quer na região a sul do Cabo Finisterra quer a Sul do Cabo da Roca.

Em contraposição as temperaturas de água mais altas junto a costa (Teste 2) fazem com que haja uma diminuição significativa da intensidade do vento, sobretudo na região do Cabo Finisterra. Pese embora seja possível verificar uma aceleração do vento a sul do Cabo da Roca (processo de *expansion fan*) constata-se que existe uma diminuição da máxima intensidade do vento quando comparado com os resultados do teste 1.

As variações longitudinais da TSAM (Teste 3 e 4) potenciam igualmente uma diminuição na máxima intensidade do vento, quer na região do Cabo Finisterra quer a sul do Cabo da Roca, no entanto, a distribuição do campo do vento difere de um teste para outro. No teste 4 verifica-se um o aumento da intensidade do vento à superfície numa maior área, principalmente na região mais a sul, ainda que com valores substancialmente menores.

De uma forma geral os resultados demonstram que valores mais baixos da TSAM junto da costa potenciam um aumento no gradiente horizontal de pressão (Figura 10, Teste1) e consequentemente são registados valores mais altos na intensidade do vento (Figura 11, Teste 1).

O efeito da orografia na estrutura do vento demonstra uma sobreposição ao efeito da variação da TSAM junto a costa, justificando a aceleração do vento, em todos os testes, a sul do cabo da Roca, ainda que com valores diferentes de teste para teste.

Como foi referido anteriormente constata-se que em todos os testes a altura a que ocorre a máxima velocidade da aceleração do vento a sul do Cabo da Roca é sempre inferior ao que se verifica na região do Cabo Finisterra. Este facto pode ser justificado pelo processo de *expansion fan* que se caracteriza sobretudo por uma diminuição da altura da camada limite – CLAM – que faz com que intensidade máxima do vento, confinada à altura dessa camada, ocorra em altitudes mais baixas.

A aceleração do vento a sul do Cabo da Roca torna este evento deveras interessante pela correlação dos resultados apresentados com os conceitos teóricos descritos nos processos dinâmicos associados à formação de jatos costeiros (secção 2.1). Nesse sentido, foram analisados os perfis verticais do temperatura, vento horizontal e temperatura potencial referidos ao ponto P2, para os Testes 0 a 4, conforme demonstrados na Figura 12.

A análise dos perfis verticais associados aos Testes 0 e 1 demonstra claramente os critérios associados à ocorrência de um jato costeiro (Ranjha, et al., 2013).

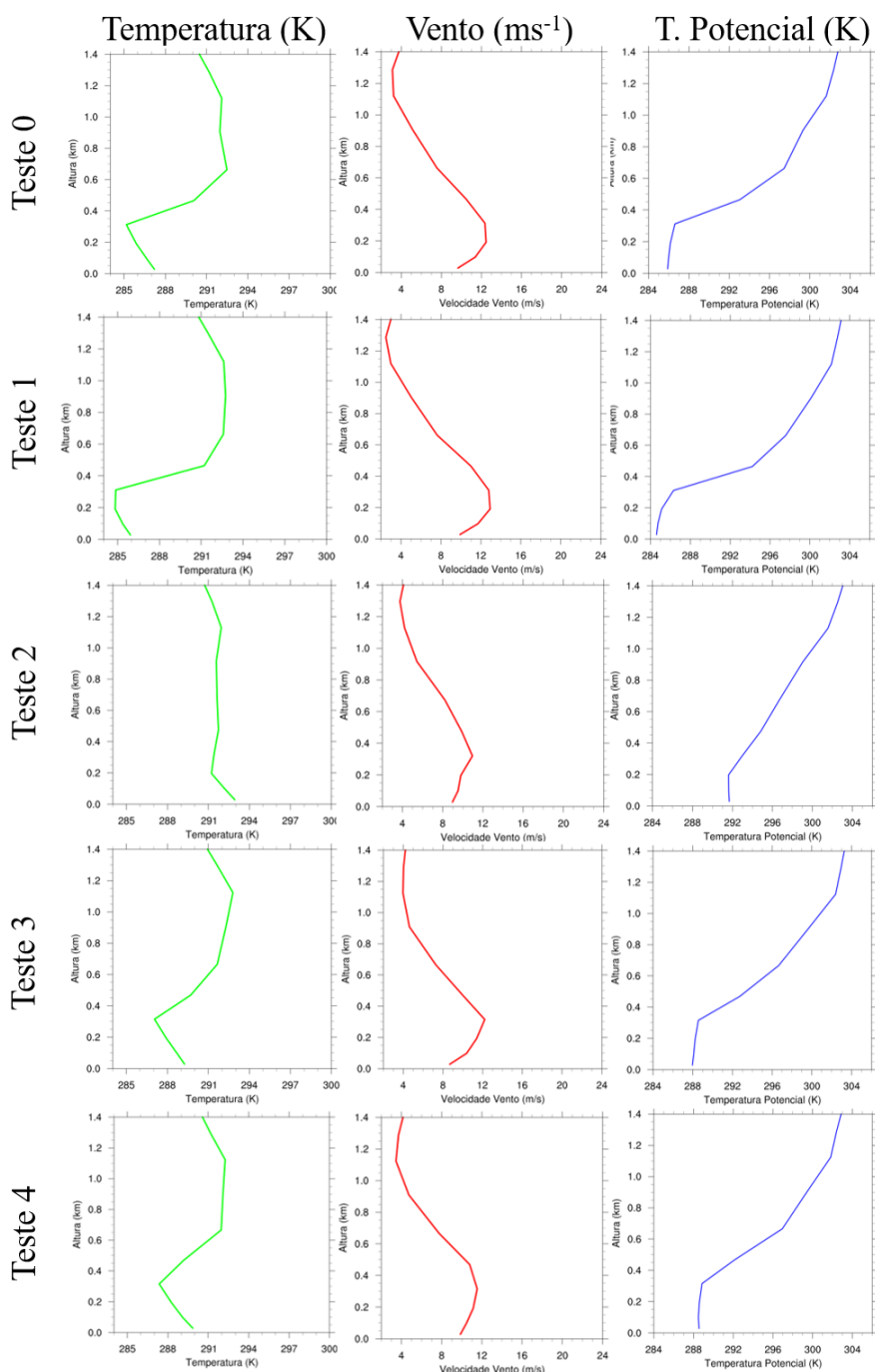


Figura 12 – Perfis verticais da temperatura (K)⁵, temperatura potencial (K) e velocidade horizontal do vento (ms⁻¹) referentes ao ponto P2, referentes aos testes 0 a 4.

Fonte: (Autor, 2017)

⁵ Os dados obtidos diretamente do modelo para as temperaturas estão referidos em graus *Kelvin*. A conversão de graus *Kelvin* (K) para *Celsius* (C) é dada por : $K=C+273,15$.

A altura em que se verifica a máxima intensidade do vento está correlacionada com a base da inversão da temperatura (altura da CLAM). Assim sendo, constata-se que TSAM mais baixas junto a costa potenciam inversões na temperatura mais pronunciadas, como se pode verificar através do perfil da Temperatura no Teste 1 com uma variação de $\sim 6^\circ$ (K) em ~ 80 m.

A estrutura correspondente a um jato costeiro não se verifica quando a TSAM é mais quente junto a costa (Teste 2). Sendo de realçar alguma instabilidade demonstrada no perfil da temperatura Potencial nos primeiros níveis do modelo.

Os perfis demonstrados nos Testes 4 e 5, mostram mais uma vez, a sobreposição do efeito da orografia sobre o efeito da variação da TSAM, e são igualmente mostrados valores ligeiramente mais baixos na máxima intensidade do vento, ou da altura em que ocorre esse máximo. Neste sentido, pode-se concluir que a diminuição da TSAM junto a costa potencia uma diminuição na altura da inversão da temperatura junto a costa e, conseqüentemente na altura da camada limite, tendo como resultado uma maior intensificação da velocidade do vento a uma altura mais baixa.

3.2.3. Análise da relação de associação e dependência entre a variação da TSAM junto a costa e a intensificação do Vento Costeiro

Nesta secção pretende-se avaliar em que medida a variação do gradiente da TSAM (variação da TSAM com temperaturas mais baixas junto a costa) propicia a intensificação do vento. Os resultados referentes aos testes 5 e 6, em comparação com o teste 1, para o campo do vento à superfície e nos 3º e 4º níveis do modelo WRF e para a pressão calculada para o NMM, são alvo de análise, de acordo com as figuras Figura 11 e Figura 13.

O contraste térmico entre mar-terra é potenciado pelos valores mais baixos de TSAM junto a costa, traduzindo-se num aumento do gradiente de pressão Este-Oeste conforme se pode verificar nas figuras supramencionadas.

Os resultados mostram que quanto maior for o gradiente de pressão associado a um maior arrefecimento da TSAM junto a costa (Teste 1) mais altos serão os valores da intensidade do vento máxima. Na situação oposta (Teste 6), quanto menor for a variação da TSAM junto a costa mais baixos são os valores associados ao máximo da velocidade do vento.

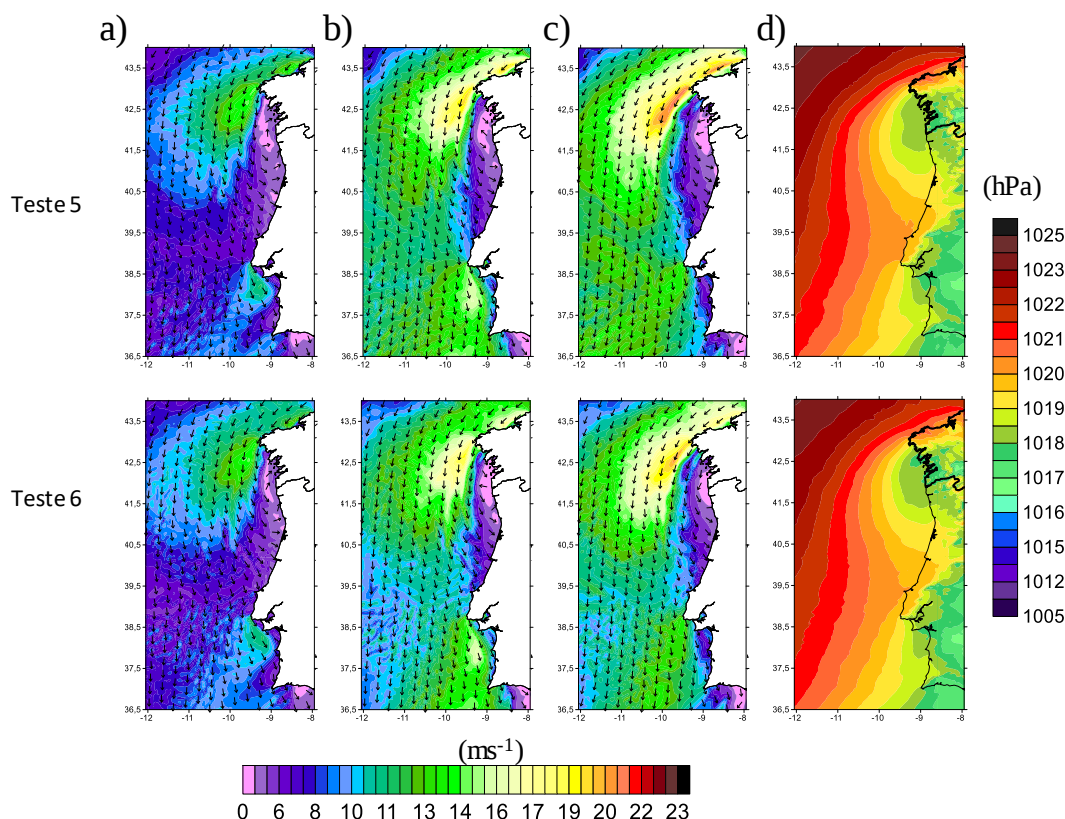


Figura 13 - Campos horizontais da velocidade do vento (ms^{-1}) aos (a) 10 m, (b) ~200 m e (d) ~320 m acima do NMM (as setas representam os vetores da direção do vento) e (b) da pressão (hPa) calculada para o NMM referentes aos testes 5 e 6.

Fonte: (Autor, 2017)

Como conclusão deste capítulo e em resposta à QD2 mostrou-se que a variação da TSAM pode influenciar a estrutura do vento sob as mesmas condições de forçamento sinótico, sobretudo ao nível do valor da máxima intensificação do vento.

A relação entre as várias variáveis, nomeadamente a variável interveniente dada pelo campo da pressão ao NMM, permite validar a H1 em que o arrefecimento da TSAM junto a costa aumenta o contraste térmico entre o mar e terra, que por sua vez se traduz num aumento do gradiente de pressão e consequentemente numa intensificação do vento. A estrutura e variação do campo do vento na região a sul do Cabo Finisterra em função da variação da TSAM permite concluir que existe efetivamente uma relação de causa-efeito entre estas duas variáveis, potenciada pelo gradiente horizontal de pressão (variável interveniente).

Neste capítulo foi possível verificar as condições (pré-requisitos) elencadas no capítulo anterior que estão associadas à formação de jatos costeiros, nomeadamente a interação do escoamento (vento) com a topografia com uma importância preponderante na estrutura do vento a sul do Cabo da Roca.



4. A variação da Temperatura da Água do Mar e o impacto do vento costeiro na condução de operações navais

Neste capítulo é feita uma análise ao potencial impacto do vento costeiro na condução e execução de ON, respondendo à QD3: Qual a correlação que a intensificação do vento costeiro, face à variação espacial da TSAM, poderá ter na condução de ON?

A resposta a esta questão assenta na importância que o processo de apoio à decisão no planeamento e condução de tarefas atribuídas às unidades navais (UN) tem, face a diferentes previsões meteorológicas. Este capítulo justifica por si só parte da investigação realizada.

O elemento meteorológico utilizado como fator de análise foi o vento, resultante das experiências numéricas descritas no capítulo anterior. As tarefas sobre as quais se efetuou uma avaliação sobre o possível o impacto do vento foram: Reabastecimento no Mar com uma Fragata (RAS FF), com uma Corveta (RAS FS) e manobra com semirrígidas (RIB). Estas tarefas foram escolhidas de acordo com o seriado do SW16 para o dia 23 de junho.

4.1. Meteorologia a Bordo das Unidades Navais

A bordo das UN as previsões das condições meteorológicas e oceanográficas (METOC) visam auxiliar e aconselhar o comando sobre a segurança do navio a navegar.

Tendo em conta as características operacionais de cada navio⁶, missão atribuída, área geográfica onde operam e tarefas que executam, a avaliação sobre o eventual impacto das condições METOC no cumprimento dessas tarefas constitui-se como um objetivo operacional de cada navio. De forma a permitir um melhor e mais expedito apoio à decisão no planeamento e condução das tarefas no mar, face às previsões METOC, as UN recorrem a Diagramas de Impacto de Missão (DIM) para refletirem o impacto esperado da meteorologia na concretização dessas tarefas. Através de um código de três cores é avaliado o impacto que um determinado elemento METOC (vento, agitação marítima, etc.) poderá ter na execução de uma determinada tarefa, de acordo com critérios definidos no ATP-32 (NATO, 2016), da seguinte forma:

- VERDE (favorável): impacto mínimo (probabilidade inferior a 10 % de não ser possível executar a tarefa)
- AMARELO (marginal): impacto moderado (probabilidade superior a 50% da tarefa ser realizada com sucesso)

⁶ Dimensões, velocidade, capacidade de manobra, etc.

- VERMELHO (desfavorável): impacto significativo (probabilidade inferior a 50% da tarefa ser realizada com sucesso)

4.2. Análise do impacto do vento costeiro nas operações navais

Nesta secção utilizaram-se os resultados das simulações numéricas para o campo do vento à superfície (10 m acima do NMM) referentes aos Testes 1 e 2 por representarem os extremos opostos de intensidade de vento obtidos, face à variação da TSAM.

Para a representação dos DIM utilizou-se os critérios utilizados no SW16 (ATP-32). Dada a natureza da classificação associada aos critérios serão apenas refletidos os códigos de cores numa perspetiva qualitativa.

A Figura 14 representa o impacto que a intensidade do vento pode ter na execução das tarefas de RIB, RAS-FS e RAS-FF de acordo com o código de cores explanado na secção anterior.

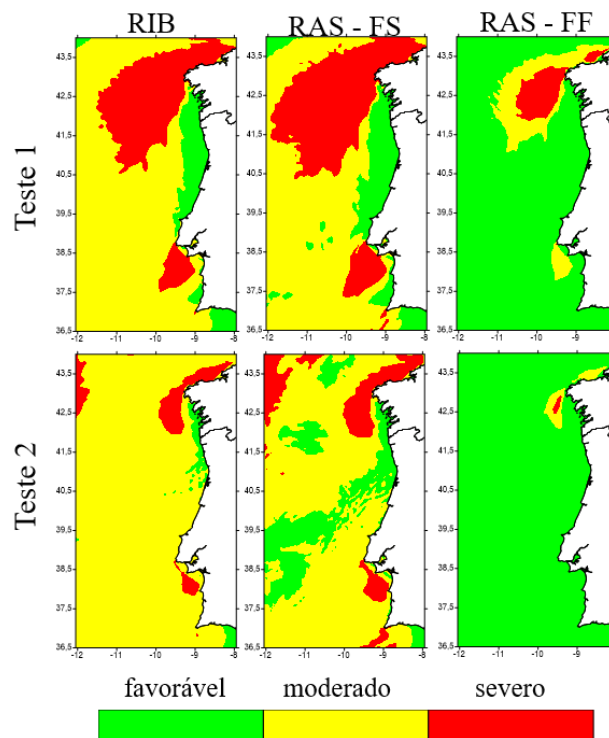


Figura 14 – DIM calculado com base na velocidade horizontal do vento aos 10m acima do NMM obtido nas simulações numéricas (Testes) 1 e 2 para as tarefas RIB, RAS-FS e RAS-FF.

Fonte: (Autor, 2017)

Como fator de decisão verificou-se que com TSAM mais fria junto a costa (Teste 1) está associado um campo de vento costeiro mais intenso (ver Figura 11) que pode afetar a persecução das tarefas RIB ou RAS-FS. Ao longo de toda a costa a realização destas tarefas

podem ser moderadamente afetadas sendo que, nas regiões a sul dos Cabos Finisterra e Roca estão fortemente condicionadas desaconselhando-se a sua realização.

Com TSAM mais quente junto a costa (Teste 2) é esperado uma consequente diminuição da intensidade do vento e como tal uma ligeira melhoria das condições METOC ainda que, seja sempre de considerar um impacto moderado na realização destas tarefas com regiões críticas a sul dos Cabos Finisterra e Roca.

Quando se avalia a viabilidade da realização de RAS-FF pode-se assumir que face ao campo do vento simulado (em qualquer teste) e aos critérios de DIM adotados, o impacto das condições METOC é bastante reduzido, ou seja, praticamente é sempre viável a sua concretização. De realçar que, com TSAM mais fria junto a costa (Teste 1) é de prever um impacto moderado numa pequena região a sul do Cabo da Roca e severo na região a sudoeste do Cabo Finisterra em que não é aconselhado realizar operações RAS-FF. O impacto das condições METOC na condução desta operação praticamente dissipa-se com TSAM mais quente junto a costa (Teste 2) com exceção de uma área muito reduzida a sul do Cabo Finisterra, onde não se aconselha a realização de RAS-FF.

Como conclusão deste capítulo e em resposta à QD 3 pode-se concluir que a variação de TSAM influencia o campo do vento (secção 3.2.2), quando intensificado (TSAM mais fria junto a costa) é de se esperar que haja uma maior probabilidade de afetar a condução e execução de tarefas em sucesso. Por outro lado, com vento menos intenso (TSAM mais quente junto a costa) a probabilidade de as tarefas executadas pelas UN serem afetadas pelas condições METOC diminui.

Pese embora os resultados apresentados estejam condicionados aos critérios adotados no ATP-32 (NATO, 2016) para uma determinada tarefa, é possível estabelecer uma correlação entre a variação da intensidade do vento, influenciado pela a variação da TSAM, e o impacto esperado na execução de tarefas no mar com sucesso.

Os resultados analisados neste capítulo permitem validar a H2 na medida em que a intensidade do vento efetivamente afeta as condições de operabilidade das UN na execução de tarefas no mar.



Conclusões

A investigação desenvolvida pretendeu identificar, caracterizar e avaliar a influência que a variação da TSAM tem no vento costeiro e consequentemente na condução de ON, na região a oeste da PI. A orientação desta investigação seguiu uma estratégia quantitativa através do método experimental para responder à QC elencada: Qual o impacto que a variação da TSAM tem na estrutura do vento (velocidade aos 10m e a vários níveis de altura) quando ocorrem jatos costeiros, na região a oeste da PI?

A resposta à QC é materializada ao longo do trabalho através da análise que foi efetuada aos diferentes processos de *feedback* associados à interação oceano-atmosfera delimitados na sua abrangência pela interação entre a TSAM e o vento costeiro.

A descrição e explicação destes processos de interação foi efetuada no capítulo 2 com particular ênfase às condições necessárias para a ocorrência de jatos costeiros (QD1). Todo o processo metodológico desenvolveu-se a partir das teorias elencadas (QD2 e QD3) e na consequente verificação/validação através de experiências numéricas (H1 e H2, respetivamente).

Os resultados obtidos no Capítulo 3 permitiram constatar a existência de uma relação causa-efeito e de associação entre a variação da TSAM e a intensificação do vento costeiro (QD3), sobretudo a sul do Cabo Finisterra. Este mecanismo de *feedback* é potenciado pela existência de TSAM mais fria (Teste 1) junto a costa, o que se traduz num aumento no gradiente de pressão e consequentemente numa intensificação do vento. Verificou-se também que, em situações em que a TSAM é mais quente junto a costa ocorre uma diminuição do gradiente de pressão e consequentemente existe uma diminuição significativa na área onde ocorre intensificação do vento (Teste 2; região a sul do Cabo Finisterra). Estes resultados são coerentes com os estudos de Perlin, et al., (2014) e permitiram validar a H1 em conformidade com as teorias elencadas nos estudos de Winant, et al. (1998) e Rogers, et al. (1998), Burk & Thompson (1996), Tjernström (1999) e Tjernström & Grisogono (2000).

Os resultados para o campo do vento a sul do Cabo da Roca permitiram estabelecer uma relação de associação entre os valores máximos da intensidade do vento e a variação da TSAM, em que, água mais fria junto a costa (Teste 1) potencia valores de intensidade máxima de vento mais altos e em menor altitude. A intensificação do vento a sul deste cabo deve-se sobretudo a interação do vento com a topografia por processos de *expansion fan* em conformidade com as teorias desenvolvidas por Winant, et al. (1998), Rogerson (1999), Söderberg & Tjernström (2001) e Beardsley, et al. (1987).



Os resultados das experiências numéricas permitem responder quase que na íntegra à QC do trabalho no entanto, a necessidade de compreender os fenómenos de interação oceano-atmosfera, na região da costa oeste da PI, vem refletida no capítulo 4, através da avaliação do impacto das condições METOC na condução de ON (QD3). Nesta secção do trabalho constatou-se que quando a variação da TSAM potencia a intensificação do vento costeiro (Teste 1) existe um impacto na persecução de tarefas, relacionadas com Reabastecimento no Mar e operação com as semirrigidas, com probabilidade moderada a severa de não serem concretizadas com sucesso. Efetivamente, de acordo com os DIM utilizados nas UN (NATO, 2016) estas tarefas são fortemente afetadas pelas condições de vento e agitação marítima. O estudo de Semedo, et al.(2017) faz a ligação entre o vento costeiro e a agitação marítima (vaga) associada que se faz sentir, consubstanciando a validação da H2.

Com este trabalho conclui-se que o padrão sinótico, caracterizado pela localização e configuração do anticiclone dos Açores, condiciona o padrão do vento ao largo da costa da PI. Ainda assim, com o mesmo padrão sinótico foi possível avaliar a influência da variação da TSAM no vento costeiro, estabelecendo-se uma relação direta de causa-efeito (águas mais frias potenciam ventos mais fortes, junto a costa) permitindo responder à QC.

Os resultados explanados permitiram ainda acrescentar um conhecimento situacional do meio ambiental, nomeadamente no apoio de ON, enriquecendo o conhecimento e a compreensão dos assuntos do mar contribuindo para a persecução do objetivo estratégico nove da DPM 2017.

De uma forma objetiva conclui-se que a metodologia levada a cabo com recurso a simulações numéricas pode ser complementada com a análise de um evento de JCPI com recurso a um modelo acoplado (modelo de circulação atmosférica acoplado com um modelo de circulação oceânica) em que os mecanismos de *feedback* sejam testados de forma cíclica entre a ação do vento e a consequente resposta do oceano e entre esta resposta e o respetivo impacto no vento. Paralelamente, como trabalho futuro, sugere-se uma análise do impacto do padrão sinótico na estrutura do vento costeiro e consequentemente na formação de jatos costeiros.



Bibliografia

- Alvarez, I., Gomez-Gesteira, M., Castro, M. d. & Dias, J. M., 2008. Spatio-temporal evolution of upwelling regime along the western coast of the Iberian Peninsula. *Journal of Geophysical Research*, 113(doi: 10.1029/2008JC004744), p. C07020.
- BeaconPMG, 2008. *Atmospheric Pressure, Winds, and Circulation Patterns*. [Em Linha] Disponível em:
http://www.cengage.com/resource_uploads/downloads/0495555061_137182.pdf
[Acedido em 10 janeiro 2017].
- Beardsley, R. C. et al., 1987. Local atmospheric forcing during the coastal ocean dynamics experiment 1: a description of the marine boundary layer and atmospheric conditions over a northern California upwelling region. *Journal of Geophysical Research*, Volume 92, pp. 1467-1488.
- Burk, S. D. & Thompson, W. T., 1996. The summertime low-level jet and marine boundary layer structure along the California coast.. *Monthly Weather Review - American Meteorological Society*, Volume 124, p. 668–686.
- Capet, X. J., Marchesiello, P. & McWilliams, J. C., 2004. Upwelling response to coastal wind profiles.. *Geophysical Research Letters*, 31(doi: 10.1029/2004GL020123), p. L13311.
- Chelton, D. B., Schlax, M. G. & Samelson, R. M., 2006. Summertime Coupling between Sea Surface Temperature and Wind Stress in the California Current System. *American Meteorological Society*, Issue DOI: 10.1175/JPO3025.1, pp. 495-517.
- Creswell, J., 2013. *Qualitative Inquiry & Research Design: Choosing Among Five*. 3.^a ed. ed. Los Angeles: CA: Sage.
- Cushman-Roisin & Beckers, 2011. *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics*. 2nd ed. s.l.:International Geophysics Series.
- Dee, D. P. & Uppala, S., 2009. Variational bias correction of satellite radiance data in the ERA-Interim reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Volume 135, p. 1830–1841.
- Education, P., 2013. *Ocean Currents*. [Em Linha] Disponível em:
<http://mavdisk.mnsu.edu/larsop2/geog101/gencirculation/ocean.currents.jpg>
- Estado Maior da Armada, 2016. IOA 108 - *Conceito Operacional Do Centro Meteorológico E Oceanográfico Naval (CMETOC)*. Lisboa.
- Governo de Portugal 2013. *Conceito Estratégico de Defesa Nacional*. Lisboa.



- Hoinka, K. P. & Castro, M., 2003. The Iberian Peninsula Thermal Low. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume 129, pp. 1491-1511.
- Lopes, A. et al., 2009. *Wind risk assessment in urban environments: the case of falling trees during windstorm events in Lisbon*, In: *Bioclimatology and Natural Hazards*. Pol'ana nad Detvou, Slovakia, ISBN 978-80-228-17-60-8.
- Miranda, P. M. A., Alves, J. M. R. & Serra, N., 2013. Climate change and upwelling: response of Iberian upwelling to atmospheric forcing in a regional climate scenario. *Climate Dynamics*, 40(doi: 10.1007/s00382-012-1442-9), pp. 2813-2824.
- NATO, 2016. *ATP- 32: NATO Military Oceanographic And Rapid Environmental Assessment Support Procedures*.
- Paul, R. & Elder, L., 2008. *The Miniature Guide to Critical Thinking. Concepts and*. s.l.:s.n.
- Pedro, M. M. A., 2011. *Curso de Introdução à Meteorologia*. Versão 1 Dez 2011 ed. Lisboa: IDL, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa.
- Peliz, A., Rosa, T., Santos, A. M. P. & Pissarra, J., 2002. Fronts, jets, and counter flows in the Western Iberian upwelling system. *Journal of Marine Systems*, Volume 35(1-2), pp. 61-77.
- Perlin, N. et al., 2014. Modeling the Atmospheric Boundary Layer Wind Response to Mesoscale Sea Surface Temperature Perturbations. *American Meteorological Society*, 142 (DOI: 10.1175/MWR-D-13-00332.1), pp. 4284-4306.
- Portela, A. & Castro, M., 1996. Summer thermal lows in the Iberian peninsula: A three-dimensional simulation.. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume 122, pp. 155-163.
- Ranjha, R., Svensson, G., Tjernström, M. & Semedo, A., 2013. Global distribution and seasonal variability of coastal low-level jets derived from ERA-interim reanalysis.. *Tellus A*, Volume 65, p. 20412.
- Ribeiro, A. A. S., 2017. *Diretiva de Planeamento da Marinha 2017*. Lisboa: s.n.
- Rijo, N. et al., 2016. Spatial Variability of the Iberian Peninsula Coastal Low-Level Jet. *International Journal of Climatology*, Issue submitted.
- Ríos, G. N., 2015. *Programa de Agricultura, Mercadeo y Recursos Naturales*, Puerto Rico: Departamento de Educación Agrícola.
- Rogers, D. P. et al., 1998. Highlights of coastal waves. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume 79, pp. 1307-1326.



- Rogerson, A. M., 1999. Transcritical flows in the coastal marine atmospheric boundary layer.. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Volume 56, pp. 2761-2779.
- Santos, L. A. B. d. et al., 2015. *Orientações Metodológicas para a Elaboração de Trabalhos de Investigação*. Pedrouços (Lisboa): IESM.
- Semedo, A., 2004. *Measurements of the California low level costal jet using radiosondes. Cruise report*, Monterey, USA : Naval Postgraduate School (http://www.weather.nps.navy.mil/*psguest/OC3570/CDROM/summer2004/Semedo/report.pdf).
- Semedo, A., Soares, P. M. M. & Lemos, G., 2017. Waves Along Eastern Boundary Currents - The Regional Winds Effects. *Submitted to Ocean Modelling*.
- Serge, C. H. H., 2012. *La nouvelle structure 2012 de DG HR*. [Em Linha] Disponível em: www.cmrhg.be/doc/hrnew2012.pdf [Acedido em 21 dezembro 2016].
- Skamarock, W. C. et al., 2008. *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*, s.l.: NCAR Technical Notes.
- Soares, P. M. M. et al., 2014. The Iberian Peninsula coastal low level jet.. *Tellus A*, Issue doi:10.3402/tellusa.v66.22377..
- Söderberg, S. & Tjernström, M., 2001. Supercritical channel flow in the coastal atmospheric boundary layer: idealized numerical simulations. *Journal of Geophysical Research*, 106(doi:10.1029/2001JD900195.), pp. 17811-17829.
- Tjernström, M., 1999. Sensitivity of coastal atmospheric supercritical flow to ambient conditions. *Tellus 51*, Volume 51, p. 880–901.
- Tjernström, M. & Grisogono, B., 2000. Simulations of supercritical flow around points and capes in the coastal atmosphere.. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Volume 57, p. 108–135.
- Warner, T. T., 2004. *Desert Meteorology*. Boston, MA: Cambridge University Press.
- Winant, C. D., Dorman, C. E., Friehe, C. A. & Beardsley, R. C., 1998. The marine layer off northern California: an example of supercritical channel flow.. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Volume 45, p. 3588–3605.

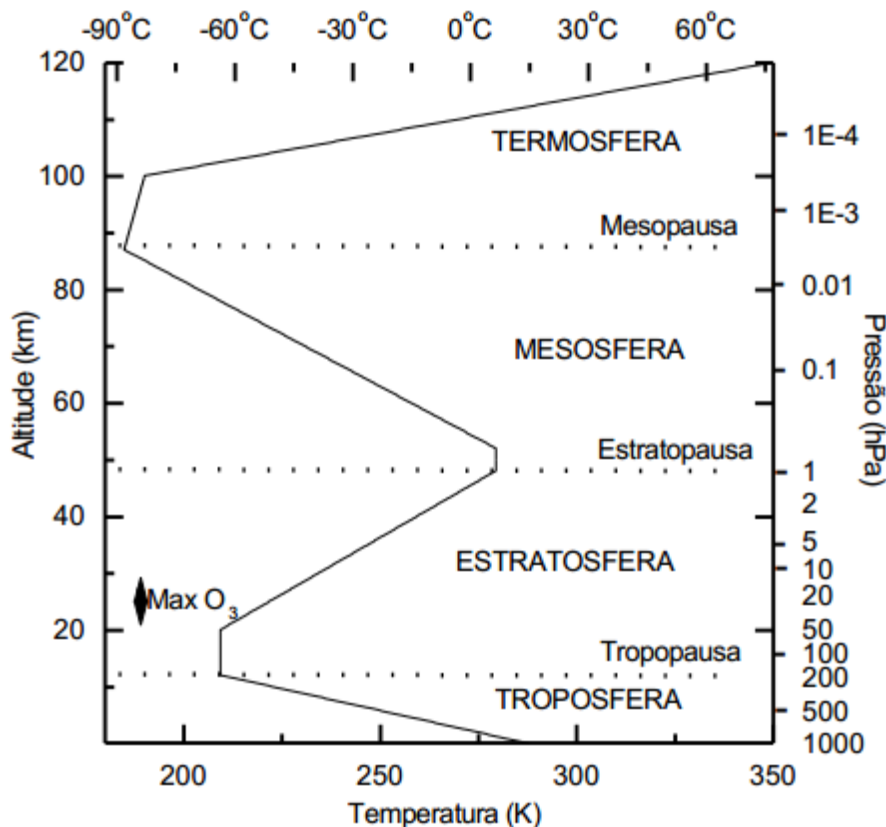
Anexo A — Estrutura térmica da atmosfera

Figura 15 – Estrutura térmica da atmosfera abaixo dos 120 km

Fonte: (Pedro, 2011)

“A temperatura varia de forma mais complexa que a pressão. Junto da superfície observa-se um decréscimo da temperatura com a altitude, na camada entre cerca de 10 e 50 km de altitude o gradiente inverte-se observando-se uma subida de temperatura, entre os 50 e os 90 km há um novo decréscimo de temperatura com a altitude, acima dessa altitude a temperatura cresce rapidamente.

Na alta atmosfera, acima dos 120 km, aproximadamente, a temperatura depende da actividade solar, sendo muito mais elevada quando o Sol se encontra mais activo, i.e. em período de máximo do número de manchas solares.”

“A zona de decréscimo da temperatura junto da superfície é designada por Troposfera, estendendo-se até cerca de 12 km, onde se encontra a Tropopausa. Acima da Tropopausa a temperatura cresce com a altitude, na Estratosfera, limitada superiormente pela Estratopausa, situada a cerca de 50 km de altitude. Acima da Estratopausa estende-se a Mesosfera onde a temperatura decresce com a altitude, até à Mesopausa, a cerca de 90 km. Acima deste nível a temperatura cresce rapidamente na Termosfera.” (Pedro, 2011)



Anexo B — Sistemas semipermanentes de Altas Pressões

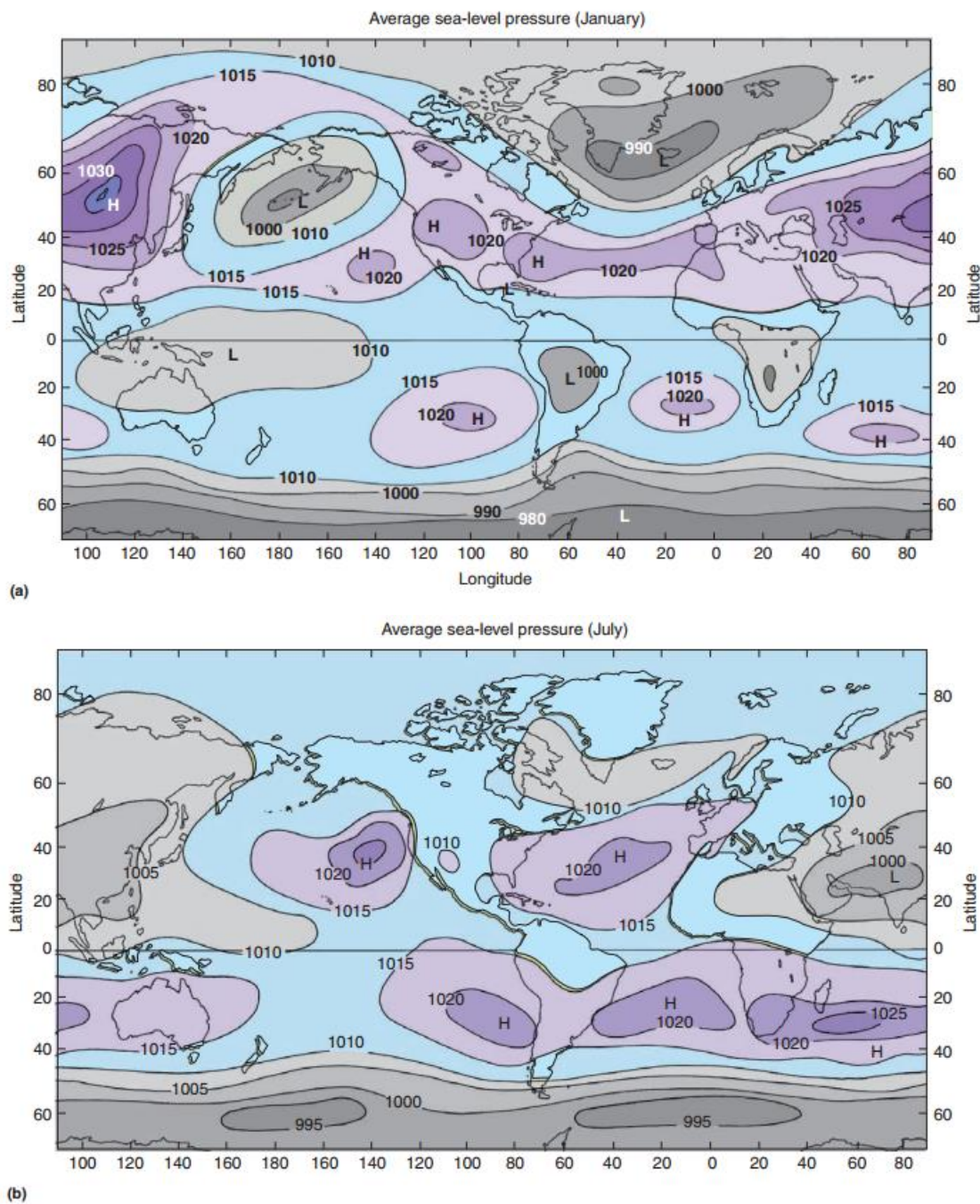


Figura 16 – Médias da pressão (milibares) ao NMM referentes (a) janeiro e a (b) julho.

Fonte: (BeaconPMG, 2008)



Apêndice A — Síntese Metodológica do Trabalho de Investigação

Organização do Trabalho	Método e Recolha de Dados	Objetivos da Investigação	Objeto da Investigação	Questão Central	Questões Derivadas
Introdução: Contextualização os processos inerentes à interação oceano-atmosfera ao largo da costa oeste da PI.	- Pesquisa bibliográfica e documental	OG: identificar, caracterizar e avaliar a influência que a prescrição da TSAM tem na estrutura (horizontal e vertical) do campo do vento, quando ocorrem Jatos costeiros a oeste da costa da PI, com recurso à modelação numérica (modelo WRF)	interação oceano-atmosfera ao largo da costa oeste da PI, delimitado na sua abrangência pela temperatura da água do mar (oceano) e vento costeiro (atmosfera). domínio espacial: Região costeira a oeste da PI (Figura 3) domínio temporal: Evento de IPCJ ocorrido no dia 23 de junho de 2016, às 20.00, horas locais (HL) domínio do conteúdo: simulações numéricas, onde diferentes campos de TSAM são utilizadas para forçar o modelo de circulação atmosférica regional WRF, a partir do qual é analisado o campo do vento.	Qual o impacto que a variação da TSAM tem na estrutura do vento (velocidade aos 10m e a vários níveis de altura) quando ocorrem jatos costeiros, na região a oeste da PI?	
1º Capítulo Apresentação do percurso metodológico utilizado;	- Pesquisa bibliográfica e documental				
2º Capítulo Descrever e explicar os principais conceitos inerentes ao objeto de estudo	Método Experimental: - Base conceptual e Estado da Arte	OE1: Identificar os pré-requisitos associados à ocorrência de jatos costeiros e consequentemente de processos de afloramento costeiro			QD1: Quais as condições (pré-requisitos) que potenciam a ocorrência de jatos, na costa oeste da PI?
3º Capítulo Resultados das simulações numéricas: mecanismos de <i>feedback</i> entre a variação da TSAM e a variação do Vento Costeiro	Método Experimental: - Representação, análise e comparação de dados (variáveis) - Teste de hipóteses H1: O arrefecimento da TSAM junto a costa aumenta o contraste térmico entre o mar e terra, que por sua vez se traduzirá num aumento do gradiente de pressão e consequentemente numa potencial intensificação do vento.	OE2: Testar os pressupostos teóricos associados à relação causa-efeito entre o a variação espacial do gradiente da temperatura da superfície da água do mar e a intensificação do vento (Jato Costeiro).			QD2: Qual a correlação entre a distribuição espacial da TSAM e variação do vento costeiro, na costa oeste da PI, face às mesmas condições sinóticas.
4º Capítulo Avaliação do impacto do vento costeiro resultantes das várias simulações numéricas na condução das operações navais (SW16)	Método Experimental: - Representação de DIM a partir resultados obtidos no capítulo 3. - Teste de Hipóteses H2: A intensidade do vento tem impacto na agitação marítima e afeta a execução de operações navais	OE3: Verificar o impacto que o vento costeiro, resultante da prescrição de diferentes TSAM, pode ter na condução de operações navais.			QD3: Qual a correlação que a intensificação do vento costeiro, face à variação espacial da TSAM, poderá ter na condução de operações navais?
Conclusões	Informação contida nos Capítulos Anteriores Perspetiva de futuras investigações	Responder à QC			

Apêndice B — Simulações Numéricas: prescrição da Temperatura da Superfície da Água do Mar

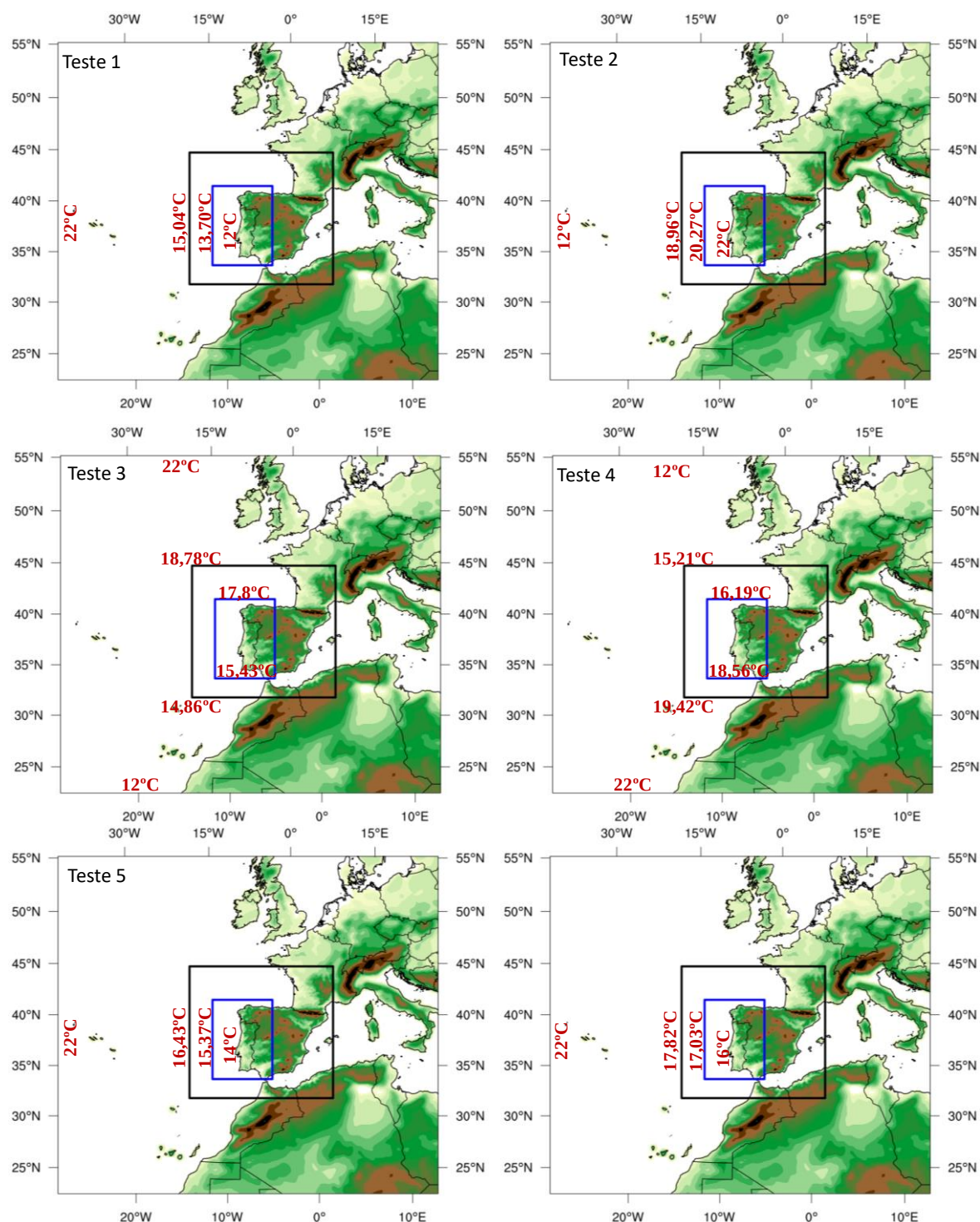


Figura 17 – Valores da TSAM nas fronteiras de cada domínio utilizado no modelo WRF em cada simulação (Teste).

Fonte: (Autor, 2017)