

ESCOLA NAVAL

DEPARTAMENTO DE MARINHA



**Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento.
Aplicação prática ao N.R.P. "Sagres".**

José Maria Sasseti da Mota

MESTRADO EM CIÊNCIAS MILITARES NAVAIS

(MARINHA)

2014



Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento.
Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

ESCOLA NAVAL

DEPARTAMENTO DE MARINHA

TESE DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MILITARES NAVAIS

**Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento.
Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”**

O Mestrando,

(assinado no original)

O Orientador,

(assinado no original)

Co Orientador

(assinado no original)

ASPOF Sasseti da Mota

1TEN Quaresma dos Santos

CFR Maurício Camilo



Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento.
Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

Ao Avô Bernardo,
Ao Avô Henrique.



AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, 1TEN Luís Quaresma dos Santos. Sem ele, não só este projeto não teria sido possível, como eu não me teria divertido tanto a fazê-lo.

Ao meu co-orientador, CFR Maurício Camilo, pela disponibilidade que desde o primeiro dia dedicou a esta ideia.

À Divisão de Oceanografia do Instituto Hidrográfico, por me terem acolhido como um de vocês desde a primeira vez que me propus trabalhar nesta tese.

Ao Comando e à Câmara de Oficiais do N.R.P. “Sagres”, que me proporcionaram um estágio de embarque muito completo e que sempre me incitaram a avançar com este empreendimento.

A todos os antigos Comandantes e Oficiais Navegadores da Barca que, com os seus concelhos, sabedoria e experiência me ajudaram e incentivaram a criar trabalho que pudesse ser útil para o navio.

Aos Índios, pelos cinco anos fantásticos que passámos na *Alma Mater*.

A todos os meus amigos, em especial ao Jair e ao Duarte, pela paciência que sempre tiveram neste último ano para me ouvir falar nesta tese.

À Susana e ao Isaac, pelo entusiasmo constante destes últimos cinco anos.

Aos meus irmãos, Kiko, Ika, António e Carmo, por me mostrarem que podemos ser completos nas diferenças uns dos outros.

Aos meus Pais, Ana e Henrique.

Ao Avô Capucho, por me ter ensinado a gostar de andar no mar.



RESUMO

A presente tese, proposta pelo Instituto Hidrográfico (Marinha), teve como objetivo dar início ao desenvolvimento de uma capacidade no campo da otimização de derrotas dos navios que integram o dispositivo naval da Marinha Portuguesa, em função das previsões meteo-oceanográficas previstas.

Este trabalho dividiu-se em três partes: a primeira focou a revisão do estado da arte do roteamento meteorológico, com uma introdução histórica, uma apresentação dos diferentes conceitos de roteamento existentes na literatura e uma exposição dos dois modelos de roteamento mais frequentemente utilizados.

Da análise feita na primeira parte, chegou-se à conclusão que nenhum programa de roteamento meteorológico é genérico, ou seja, alheio às características singulares de cada navio (e aqui reforça-se que não é de um tipo de navios, mas sim de um navio em particular). Desta forma, o algoritmo de otimização a desenvolver teve que focar um objeto de estudo real, para desta forma ser parametrizado e validado. Foi então decidido que esta tarefa iria incidir sobre o N.R.P. “Sagres”, um tall-ship da Marinha Portuguesa que funciona como navio-escola. A escolha de um veleiro como objeto de estudo teve como principal razão o desafio que este traz, visto que um veleiro está totalmente dependente das condições climáticas para se movimentar.

A segunda fase deste trabalho foi então a parametrização do rendimento do N.R.P. “Sagres” em função da marcação do vento verdadeiro. Esta parametrização foi feita através da análise estatística de um conjunto alargado de registos efetuado a bordo, quando o navio navegava exclusivamente à vela. Esta base de dados foi agrupada em intervalos de marcações, para análise e obtenção de uma correlação entre a velocidade do navio e o vento verdadeiro que se fez sentir. A partir desta correlação alcançaram-se os diferentes coeficientes de rendimento para cada um dos intervalos de marcação. Este objetivo foi alcançado com sucesso.

A terceira e última fase deste projeto foi a participação no desenvolvimento de um primeiro esboço de algoritmo de roteamento meteorológico, o qual teve apenas em



Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento. Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

consideração, nesta fase, o fator predominante num veleiro: o vento. Este algoritmo foi testado num cenário verosímil, focado num trânsito no NRP Sagres, entre a Ilha Terceira, nos Açores, e Lisboa, em Portugal Continental. As derrotas otimizadas obtidas pelo algoritmo foram também bastante satisfatórios.

Por fim, são sugeridas algumas linhas de ação possíveis para futuros trabalhos, as quais passam tanto pela melhoria da parametrização feita para o N.R.P. “Sagres” como para a melhoria do algoritmo de otimização, em desenvolvimento no Instituto Hidrográfico.

Palavras-chave: *otimização de derrota, previsões METOC, curvas polares, curvas de rendimento e N.R.P. “Sagres”.*



ABSTRACT

The present dissertation, as per suggestion of the Portuguese Hydrographical Institute, sought to develop the Institute’s skills in the area of the optimal weather routing of the vessels which integrate the naval fleet of the Portuguese Navy, according to the expected meteorological-oceanographic estimations.

Generally speaking, the work is composed of three sections. The first one offered a state of the art of weather routing, with an historical introduction to it; a presentation of the various notions of weather routing existent in the specialized literature and of the kinds of weather routing themselves; and – finally – an exposition of the two most commonly used weather routing systems.

From the analysis undertaken in the first section, it was concluded that no weather routing method can be generalized, i.e., applied regardless of the idiosyncrasies of each vessel – note, of each vessel and not of each type of vessels. Therefore, and in order to study efficiently the optimization algorithm that was to be produced, a study case had to be defined. The decision was made to use the N.R.P. “Sagres”, a tall-ship of the Portuguese Navy that operates as a school-vessel. Choosing a tall-ship as a study case was due to the particular challenges brought by it, as a sailing ship depends absolutely on weather conditions to navigate.

The second phase of the present work consisted in measuring the performance of the N.R.P. “Sagres” based in real wind conditions. Unlike the usual analysis methods, based in polar curves, the one here offered followed the statistic observation of a data set, which was divided in several other intervals, according to the different true wind bearings of each observation. The data was therefore plotted in scattering graphics, from which was extracted a correlation line and, therefore, a coefficient of performance was possible to calculate to each bearing intervals. Theoretically, if one multiplies these coefficients for a wind speed, it would be possible to estimate the expected ship's velocity. This objective was successfully achieved.



Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento.
Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

The third and last section of the project entailed the elaboration of a first draft for a weather routing algorithm, for which only the most relevant element for a sailing-ship’s navigation was considered: the wind. This algorithm was tested in a highly probable passage between Ilha Terceira, in Azores and Lisbon, in Portugal mainland. The results obtained using the algorithm were highly satisfactory.

Lastly, some future lines of action for future works like this one are suggested, relating especially to the measuring of the N.R.P. “Sagres” and to the improving of the algorithm being developed in the Portuguese Hydrographical Institute

Key-words: *weather route optimization, METOC forecasts, polar curves, performance curves and N.R.P. “Sagres”.*



ÍNDICE GERAL

FRONSTISPÍCIO	III
DEDICATÓRIA.....	IV
AGRADECIMENTOS.....	V
RESUMO.....	VI
ABSTRACT	VIII
ÍNDICE GERAL.....	X
ÍNDICE DE IMAGENS	XII
GLOSSÁRIO DE ACRÓNIMOS.....	XIII
ABERTURA.....	XIV
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Âmbito	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. N.R.P. “Sagres” – o objeto de estudo	3
2. ROTEAMENTO METEOROLÓGICO	7
2.1. Breve Introdução histórica	7
2.2. A “meteo-climatologia” no roteamento de navios	10
2.3. Conceito de roteamento	14
2.4. Esquemas de otimização de rota.....	17
3. DESENVOLVIMENTO DO CONHECIMENTO DO RENDIMENTO DO OBJETO DE ESTUDO	22
3.1. Metodologia	22
3.1.1. Curvas Polares	23



Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento.
Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

3.1.2.1. Recolha de informação, dados e testemunhos	28
3.1.2.2. Análise dos dados	32
3.1.3. Curvas de rendimento	40
4. CONSTRUÇÃO DE UM ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO DE ROTAS	45
4.1. Conceito da otimização do rendimento	46
4.2. O algoritmo	48
4.3. Soluções	54
5. RESULTADOS	61
5.1. Investigação futura	63
5.2. Nota final	65
EPÍLOGO	66
BIBLIOGRAFIA	67



ÍNDICE DE IMAGENS

Imagem 1: Exemplo de uma grelha de pontos para uma otimização de Bellman (HINNENTHAL, 2008).....	19
Imagem 2: Exemplo de otimização isócrona no Mar do Japão (HAGIWARA <i>et al</i> , 1999)....	21
Imagem 3: Forças atuantes num veleiro.	26
Imagem 4: Perfil de rendimento do N.R.P. “Sagres” estimado pelo CMG Proença Mendes aquando da volta ao mundo em 2010	28
Imagem 5: Curva polar empírica do N.R.P. “Sagres”	29
Imagem 6: Esquema exemplificativo dos intervalos de marcações utilizados.	35
Imagem 7: Distribuição dos dados em função da velocidade do navio.	35
Imagem 8: Rendimento vs Marcação Vento Verdadeiro 1.5σ	42
Imagem 9: Rendimento vs Marcação Vento Verdadeiro σ	42
Imagem 10: Rendimento vs Marcação Vento Verdadeiro 1.5σ (ajustada).....	43
Imagem 11: Rendimento vs Marcação Vento Aparente (ajustada).	44
Imagem 12: Ciclo de construção da base de dados do algoritmo.	47
Imagem 13:Exemplo de uma grelha de 3x3 pontos.	47
Imagem 14: Funções utilizadas na procura de rotas.....	53
Imagem 15: Derrota otimizada (campo de vento nº13/velocidade mínima 0 nós)	55
Imagem 16: Derrota otimizada (campo de vento nº13/velocidade mínima 1 nó)	56
Imagem 17: Derrota otimizada (campo de vento nº13/velocidade mínima 2 nós)	56
Imagem 18: Derrota otimizada (campo de vento nº13/velocidade mínima 3 nós)	57
Imagem 19: Derrota otimizada (campo de vento nº13/velocidade mínima 4 nós)	58
Imagem 20: Derrota otimizada (campo de vento nº13/velocidade mínima 5 nós)	58
Imagem 21:Derrota otimizada (campo de vento nº134/velocidade mínima 5 nós)	59
Imagem 22: Derrota otimizada (campo de vento nº139/velocidade mínima 5 nós)	60
Imagem 23: Derrota otimizada (campo de vento nº212/velocidade mínima 5 nós)	60



GLOSSÁRIO DE ACRÓNIMOS

IH: Instituto Hidrográfico

IMO: *International Maritime Organization*

IMV: *International Meteorological Vocabulary*

M^{VA} : marcação do vento aparente, em graus;

M^{VV} : marcação do vento verdadeiro, em graus;

M_{360}^{VA} : marcação em 360° do vento aparente, em graus;

M_{360}^{VV} : marcação em 360° do vento verdadeiro, em graus;

METOC: *Meteorological and Ocean*

PNT: Previsão Numérica do Tempo

ROMS: *Regional Ocean Model System*

SOA: *Speed of Advance*

SPP: *Shortest Path Problems*

V_S : velocidade de superfície do navio, em nós;

V^{VA} : velocidade do vento aparente, em nós;

V^{VV} : velocidade do vento verdadeiro, em nós;

V_{vc} : velocidade verdadeira do navio calculada, em nós;

V_V : velocidade verdadeira do navio, em nós;

VPP: *Velocity Profile Program*

WMO: *Weather Meteorological Organization*

WW3: *Wave Watch 3*



Nós, sócios da fraternidade dos pilotos, somos encadeados aos nossos deveres e jurámos não deixar nunca os nossos navios, até ao seu fim fatal. Nós, pilotos, subindo a bordo dos navios, ligamos com eles a nossa vida e sorte. Se se salva, nós também nos salvamos; se perece, com ele morremos.

Buzurg ibn-Chahriiär, in *As maravilhas da Índia*



1. INTRODUÇÃO

1.1 Âmbito

“A capacidade de otimização gerou a Humanidade.”

Não sendo, é certo, uma célebre frase de algum famoso escritor, as palavras acima não são ocas de significado. Na verdade, é de fácil compreensão que foi (e continua a ser) a capacidade de otimização que trouxe a civilização aos dias de hoje.

Mas afinal, o que é otimização?

A resposta pode ser dada como sendo o processo de realização de uma tarefa da forma mais conveniente, rentável e/ou eficaz, utilizando da melhor forma possível os fatores que são preponderantes à sua prossecução.

É certo que muitas vezes existe a tendência de pensar na otimização de uma ação apenas pelo tempo que esta tomará ou pelo custo que terá. Mas, na verdade, nessa equação podem entrar outros parâmetros: o conhecimento, a segurança ou a qualidade, por exemplo. Senão, veja-se: não terá sido certamente a escassez de tempo que levou o homem a ter necessidade de dominar o fogo, outrossim a sensação de segurança e poder que este passo lhe trouxe; nem muito menos foi a inexistência de um sistema monetário que o levou a inventar a roda, mas antes a qualidade de vida que esta lhe proporcionou nas suas deslocações.

Ainda que estes exemplos possam parecer banais, eles têm o condão de mostrar que em tudo o homem de hoje em dia pode ser diferente do homem que dominou o fogo, exceto no aspeto mais resiliente do seu ser: o homem continua, diariamente, a querer desempenhar as suas tarefas de uma forma mais eficiente e capaz. Por outras palavras, de um modo otimizado.

Por analogia, a relação do homem com o mar também sempre se revestiu deste pressuposto, com uma contínua busca do que ainda precisava de descobrir e um



desenvolvimento não menos constante do que já havia alcançado. E é desta forma que continua a pensar. Longe de ser já conhecedor de toda a ciência necessária para enfrentar os desafios que este meio adverso nos traz, este mar que cada vez mais “une e não separa” continua a ser para o homem foco de grande interesse e estudo, devido sobretudo às vantagens comerciais que dele podem advir.

O interesse no roteamento meteorológico é assim explicado pela necessidade de dar resposta a um conjunto de questões cada vez mais presente nos dias de hoje nas travessias marítimas (tempo, segurança, eficiência de consumos, rentabilização da permanência no mar), sendo o culminar de duas áreas que cada vez mais são conhecidas e dominadas: a capacidade de prever com grande grau de certeza as condições meteorológicas e a competência de antecipar a performance de um navio em determinado estado de condições meteorológicas.

1.2. Objetivos

Esta tese foi proposta pelo Instituto Hidrográfico (IH), que pretende com ela dar início ao desenvolvimento de um algoritmo de otimização de derrotas face às previsões meteo-oceanográficas (por si produzidas) dos navios que integram o dispositivo naval da Marinha.

Desta forma, a tese foi desenvolvida na Divisão de Oceanografia do IH, onde o autor foi integrado a trabalhar com a equipa que constitui a célula de oceanografia militar deste Instituto.

A tese começou por explorar o conceito de roteamento meteorológico e o estado da arte das ferramentas que lhe podem dar resposta de uma forma operacional.

Depois da pesquisa inicial chegou-se à conclusão de que para a elaboração de um produto deste tipo era essencial dispor de uma base de dados que integrasse as informações relativas à rentabilidade da navegação dos navios face às diferentes condições climatéricas.



Habitualmente, esta informação é traduzida por curvas polares de rendimento, onde as características direcionais dos parâmetros meteorológicos e oceanográficos são representados face à sua marcação no navio em deslocamento. Para cada marcação surgem então valores de velocidade ou rendimento do navio resultantes da força motriz do agente propulsor (exemplo: o vento) e/ou da resistência imposta pelo meio onde o navio se desloca (exemplo: o vento, a agitação marítima e/ou a corrente à superfície).

No entanto, e por ser essencial que exista um avaliador do programa, considerou-se como objeto de estudo o N.R.P. “Sagres”. Esta escolha teve fundamento em dois factos: o primeiro é que a maior parte dos algoritmos de roteamento meteorológico existentes estão vocacionados para, genericamente, navios-cargueiro (a motor); o segundo é que o roteamento meteorológico é muito mais determinante num veleiro que num navio a motor (visto que o primeiro está totalmente dependente destas condições para que se possa deslocar), daí que seja mais desafiante a construção de um algoritmo para este tipo de navios.

Desta forma, a elaboração de uma ferramenta que permita parametrizar o aproveitamento do N.R.P. “Sagres” em função do vento, tornou-se o objetivo base desta tese.

Paralelamente o autor participou na arquitetura e desenvolvimento de uma primeira abordagem de um algoritmo de otimização de derrotas. Neste processo, foi possível no final da tese a avaliação desta ferramenta através da sua utilização e análise das suas soluções quando aplicado ao caso prático do N.R.P. “Sagres”. Aqui, utilizou-se para tal, a base de dados de rendimento deste navio face à intensidade e direção do vento real à superfície aqui desenvolvida.

1.3. N.R.P. “Sagres” – o objeto de estudo

A escolha do N.R.P. “Sagres” como objeto de estudo não foi feita imparcialmente. Por ser um navio forte e bem construído e possuidor de uma carga simbólica e cultural muitíssimo grande não só para a Marinha, mas também para Portugal, a *Sagres*, com os



Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento. Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

seus 77 anos, é um navio que poderá ainda estar a navegar por daqui a tanto tempo como aquele que já tem de vida. E é principalmente desta assunção que a sua escolha como objeto de estudo foi feita, pois as ilações que forem retiradas deste trabalho poderão vir a ser testadas e melhoradas ao longo dos próximos anos.

Mas o atual N.R.P. “Sagres” é, na realidade, o terceiro navio-escola da Marinha com este nome. O primeiro foi uma corveta em madeira construída em 1858 em Inglaterra, a qual armava em galera, que fundeada no rio Douro, serviu como navio-escola para alunos marinheiros, entre 1882 e 1898.

O segundo, já construído em ferro e aço, também armava em barca, tendo sido construído na Alemanha em 1896. Primeiramente, até 1916, serviu como navio mercante à marinha alemã, altura em que foi apresado na Horta, decorrente dos apresamentos de navios alemães feitos por Portugal na primeira guerra mundial. Apesar disso, apenas começou a servir na Marinha Portuguesa a partir 1924, altura em que foi batizado com o nome desse promontório situado na ponta SW de Portugal. Já como navio-escola fez a sua última viagem em 1961, altura em que passou a ser utilizado como navio-depósito da Marinha, o Santo André. Por fim, com quase 80 anos de mar, foi abatido ao efetivo dos navios da Armada, em 1975.

Mas a importância dos navios-escola numa Marinha estava há muito comprovada, tendo levado Portugal a procurar um novo veleiro que lhe permitisse colmatar a vaga deixada em aberto pela segunda *Sagres*. O navio ideal encontrava-se no Brasil e era o terceiro de uma série começada pelos alemães durante a segunda grande guerra, precisamente para funcionarem como navio-escola.

A grande mais-valia desta embarcação como navio-escola estava na segurança que esta oferecia, derivado do seu modelo de construção: dez anteparas estanques, quatro delas com portas hidráulicas também estanques (com comando local ou à distância), as quais garantem a estanqueidade entre compartimentos anexos¹. Também as características do navio, em quase tudo semelhantes às da segunda *Sagres*, permitiram às

¹ Foi, na verdade, esta característica que permitiu que o navio não se afundasse num acidente posterior.



Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento. Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

primeiras guarnições um processo de adaptação mais simples e intuitivo, não dando lugar a perdas de tempo com o enquadramento no navio.

Deslocamento máximo	1950 tons
Deslocamento leve	1576 tons
Comprimento fora-a-fora	89,5 m
Comprimento à linha de água	70,0 m
Boca	12,0 m
Pontal	7,55 m
Calado	5,5 m
Altura dos mastros redondos	45,5 m / 39,4 m (a)
Altura do mastro da mezena	39,5 m
Comprimento das vergas de papafigos	24 m

Tabela 1: Características N.R.P. “Sagres”.

Este navio, construído entre 1937 e 1938, nos estaleiros *Blohm & Voss*, com o nome *Albert Leo Schlageter*, então com bandeira alemã, fez uma série de viagens de instrução ainda antes da guerra, tendo em 1944, durante uma travessia do Báltico, embatido com uma mina, o que lhe provocou grandes danos na proa, levando-o a ter que arribar ao porto de Bremerhaven onde haveria de ser capturado pelos americanos no fim da guerra.

Em 1948 a América cede o navio ao Brasil, onde é incorporado na Armada Brasileira com o nome *Guanabara*. É curioso que, apesar de ter estado três anos na posse dos americanos, o navio nunca tenha arvorado a bandeira desse País.

E é assim que chega 1960, ano em que começam as negociações entre Portugal e Brasil para a cedência do então *Guanabara*. Seria então a 8 de Fevereiro de 1962, no Arsenal da Marinha do Rio de Janeiro, que o navio viria a ser batizado com o mesmo nome dos seus antecessores, navio-escola *Sagres*, sendo aumentado ao efetivo da Marinha Portuguesa em cerimónia presidida pelo Embaixador de Portugal naquele país.

Desde então a *Sagres* tem feito todos os anos viagens de instrução, exceto em 1987 e em 1991, anos em que se procedeu esteve docada para reparações de maior



Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento. Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

envergadura. Para além das viagens de instrução, o navio tem como especial missão a representação de Portugal e da Marinha Portuguesa, funcionando como embaixada itinerante.

Cumprindo as suas missões o N.R.P. “Sagres” já efetuou inclusivamente três circum-navegações (1978/79, 1983/84 e 2010) e outras viagens de duração superior a oito meses, tendo já visitado 45 países. Analogamente (e não menos importante) o navio já conquistou também marcos emblemáticos da navegação mundial, como o canal do Panamá, o cabo da Boa Esperança, o Cabo Horn e o Estreito de Magalhães.

No que toca a prémios há a destacar a vitória na regata de grandes veleiros realizada entre Bermuda e Nova Iorque, em 1964; a vitória na regata transatlântica de grandes veleiros entre Newport (EUA) e Lisboa, em 1982; a vitória no *Boston Teapot Trophy* (prémio atribuído pela Sail Training International ao *tal-ship* que percorre mais milhas à vela num período de 124 horas) em 2009.

Já no plano militar, no que diz respeito a condecorações, foram duas as distinções que o Estandarte Nacional da *Sagres* já recebeu. A primeira foi a Medalha da Ordem do Infante D. Henrique² e a segunda foi a Medalha Naval de Vasco da Gama³.

²Esta condecoração visa distinguir os que prestaram serviços relevantes a Portugal, no País e no estrangeiro, de expansão da cultura portuguesa ou para conhecimento de Portugal, sua história e seus valores

³Destinada essencialmente a galardoar aqueles que se têm distinguido quer pelos seus atos, quer pelos serviços prestados no mar ou em atividades com ele relacionadas



2. ROTEAMENTO METEOROLÓGICO

2.1. Breve Introdução histórica

Quando se fala naquilo que terá sido a origem do roteamento, é imperativo que se assuma que este era feito segundo uma perspetiva local (conceito explanado mais à frente, no capítulo “2.4. Esquemas de Otimização de Rota”). E os primeiros avanços ter-se-ão dado sem dúvida com a perceção de que havia certos fenómenos locais que eram constantes (como é o caso das marés, ou de certos ventos em determinadas alturas do ano e regiões do globo). Ainda que pudesse não haver um domínio teórico destes acontecimentos, a experiência dos marinheiros ia passando de pais para filhos, permitindo que as gerações vindouras pudessem aprofundar estas matérias.

Foi assim que, já numa fase avançada do conhecimento, terão surgido no Mediterrâneo as cartas de portulano, assunções empíricas dos navegadores, em que estes, ao terem compilado o saber de centenas de anos, verteram os seus conhecimentos em cartas representativas das regiões em que navegavam e nas quais sabiam que para ir de um ponto ao outro deveriam seguir determinado rumo.

Com a difusão da imprensa e da possibilidade quase infinita que esta proporcionava em agregar conhecimento através da produção de livros, inicia-se a produção de roteiros. Estes roteiros não eram mais que, grosso modo, a imortalização em papel de conhecimentos centenários. Fontoura da Costa (*apud* BROCHADO, 1959⁴), numa síntese que faz daquilo que a humanidade ficou a dever aos Portugueses no que tocou a fazer da navegação uma ciência, refere que “a *literatura portuguesa dos Roteiros* constitui um monumento que nação alguma possui”.

Ainda assim, é difícil afirmar que os roteiros portugueses tenham sido os primeiros a serem produzidos. A epopeia dos descobrimentos apoiou-se não só em dezenas de anos de tentativas de chegar mais longe no desconhecido (e consequente

⁴ In O Piloto Árabe de Vasco da Gama.



Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento. Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

recolha de informações por navegadores mais ou menos afamados), mas também nos conhecimentos que foram transmitidos pelos nativos aos nautas portugueses, nos diferentes lugares por onde estes foram passando. Neste caso, os sábios árabes com que os primeiros intrépidos marinheiros portugueses se depararam no Índico são, indubitavelmente, prova de que também nessa região do globo há muito se havia percebido a necessidade de preservar o conhecimento acumulado ao longo de gerações e gerações. O exemplo maior desta afirmação está na obra do almirante da frota imperial otomana Sidi’Ali Tchelebi, que em 1554 compilou todos os escritos conhecidos relacionados com a navegação no Índico, na obra a que chamou *Muhit*, ou seja, “o que contém tudo”.

Estas obras, ainda que parcas em observações científicas como as que conhecemos hoje, demonstram que os pilotos conheciam os ventos e as correntes dominantes e expectáveis para as diferentes alturas do ano, permitindo-lhes assim planear as suas viagens com mais rigor. No entanto, não é nenhuma das obras anteriores aquela que é considerada como a primeira a produzir um roteamento meteorológico, quiçá talvez à semelhança daquilo que acontece com o tratado do Padre Fernando Oliveira⁵.

Diz a história da oceanografia que é necessário recuar ao século XVIII para que se possa encontrar aquilo que é considerado como o primeiro roteamento climatológico. Terá sido Benjamin Franklin, ainda antes da independência dos EUA, que constatou que os navios que se aproximavam da costa leste dos Estados Unidos da América por rotas mais a norte demoravam cerca de mais duas semanas que aqueles que o faziam por rotas mais a sul. Desta forma, pediu aos comandantes dos navios que comesçassem a observar e a anotar de forma sistemática a direção e intensidade da corrente, ao fazerem esta aproximação. Foi desta maneira que conseguiu juntar elementos suficientes que lhe

⁵ “A Arte da Guerra no Mar”, da autoria do Padre Fernando Oliveira, é por muitos considerado como o primeiro tratado de tática naval alguma vez escrito. No entanto, esta afirmação não é consensual entre os historiadores, sendo a razão desta discordância apontada pelo facto da obra nunca ter sido produzida em devida altura numa das línguas fortes (inglês ou francês). Desta forma, tendo ficado perdida no esquecimento do idioma português, nunca teve a notoriedade que lhe seria inteiramente merecida.

O caso dos roteiros apresenta-se como um dilema idêntico: serão ou não os roteiros portugueses e árabes os primeiros a terem sido produzidos na história?



Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento. Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

permitiram compilar uma primeira carta da corrente do Golfo, com a ajuda da qual a travessia do Atlântico Norte passaria daí em diante a ser feita em aproximadamente menos catorze dias que o normal até então. Este foi, sem dúvida, o primeiro estudo que se revestiu de algum cariz científico, com observações climatológicas cuidadas e registadas que permitiram retirar ilações para o futuro.

Mais tarde, no século XIX, seria então o Tenente Fontaine Maury que, como responsável do Depósito de Cartas e Instrumentos Náuticos da Marinha Americana compilou, a partir dos diários náuticos dos navios americanos, o *“The physical geography of the sea”*, atlas com a representação da climatologia de ventos e correntes, que foi de grande utilidade durante o séc. XIX. Maury dedicou grande parte da sua vida à uniformização da recolha de dados, por forma a facilitar o seu posterior tratamento, assim como à recolha de dados em si. Foi ele o responsável pela organização da primeira conferência de meteorologia que se realizou no mundo, em Berlim, no ano de 1853.

É já na segunda metade do século XX que esta ciência se reveste de maior exatidão, com os desenvolvimentos nas áreas da navegação (que permitiram chegar aos sistemas de posicionamento automático) e da matemática e computação (com os quais foi possível alcançar os complexos algoritmos que alicerçam os modelos de previsão meteorológica e da sua integração na definição de uma determinada rota em função das características de um navio).

Ainda assim, este problema continua muitas vezes a ser tratado como um mero problema teórico (ALLSOPP *et al*, 2000⁶; LINDBERG, 2003⁷), tendo no entanto os investigadores já chegado à conclusão de que não é possível fazer um roteamento meteorológico preciso que não tenha em linha de conta as características de um navio em específico, fazendo assim com que cada roteamento seja exclusivo para um e um só navio.

Será legítimo afirmar que é neste ponto que esta ciência se encontra hoje em dia. Se, por um lado, a coerência das teses nesta área desponta no princípio da década de 80

⁶ *In Optimal Sailing Routes with Uncertain Weather*

⁷ *In Optimizing Yacht Routes using Dynamic Programming*



(MOTTE, 1981⁸), por outro a evolução tem sido abissal (SKOGLUND *et al*, 2012⁹), devido sobretudo ao melhoramento das previsões METOC e à capacidade de acesso e atualização de informação praticamente em tempo real.

2.2. A “meteo-climatologia” no roteamento de navios

Ao leitor familiarizado com esta temática terá o título deste capítulo causado, eventualmente, alguma estranheza, na medida em que a “meteo-climatologia” é um conceito inexistente. Mas por tudo aquilo que já foi dito, a esse leitor ser-lhe-á também facilmente perceptível que o roteamento de um navio poderá ser feito tanto recorrendo à meteorologia, como à climatologia, daí a pertinência do nome. Preliminarmente convém destrinçar estes dois conceitos, climatologia e meteorologia.

Ambos os conceitos mencionados estão, obviamente, relacionados com as condições climatéricas residindo a sua diferença, essencialmente, na escala temporal a que se referem.

Segundo o International Meteorological Vocabulary (IMV) da Weather Meteorological Organization (WMO), por meteorologia entende-se:

“O estudo da atmosfera e os seus fenómenos.”¹⁰

E por climatologia:

“O estudo do estado físico da atmosfera, em conjunto com as suas variações estatísticas no espaço e no tempo que reflitam o comportamento do tempo atmosférico num período de muitos anos.”¹¹

⁸ *In Ship Based Weather Routeing (using Dynamic Meteorology)*

⁹ *In A new method for robust route optimization in ensemble weather forecasts*

¹⁰ *In METEOTERM*, entrada nº 1605 (wmo.multicorpora.net/MultiTransWeb/Web.mvc, consultado a 3 de maio de 2014).



Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento. Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

Se a semelhança destas duas ciências reside no facto de ambas estudarem (e com isso tentarem prever) o tempo atmosférico através da análise dos mesmos elementos (pressão atmosférica, temperatura, humidade, precipitação, radiação, etc.), a sua diferença está na escala temporal a que se referem. Enquanto que a meteorologia pretende, através de uma análise cuidada, prever o estado do tempo atmosférico o mais precisamente possível num curto espaço temporal (no máximo, dez dias), a climatologia tem um prazo muitíssimo mais alargado (é normal nas comunidades científica e marinheira este período ser definido em 30 anos (Bowditch, 2002¹²), mas sem razão oficial para que assim o seja¹³).

De forma resumida podemos definir a climatologia como a previsão do estado do tempo numa região abrangente do globo para uma dada altura do ano, baseada numa série de observações daquela mesma região num intervalo de tempo alargado. Já a meteorologia, através da Previsão Numérica do Estado do Tempo (PNT), pretende através do “(...) potencial de cálculo dos computadores (...) produzir uma estimativa do estado futuro da atmosfera utilizando os designados “modelos de previsão numérica do tempo”, (...) [que se] baseiam num conjunto de equações que traduzem leis da física para descrever o comportamento dinâmico da atmosfera.”¹⁴.

Tendo estes dois conceitos esclarecidos podemos dizer que, na história existem três fases distintas do roteamento de navios, devidamente apoiadas pela ciência existente à data.

¹¹ In *METEOTERM*, entrada nº 503 (wmo.multicorpora.net/MultiTransWeb/Web.mvc, consultado a 3 de maio de 2014).

¹² In “The American Practical Navigator – an epitome of navigation”, capítulo 35, pág. 514.

¹³ No mais recente *Guide to Climatological Practices* da WMO, é referido que é difícil estabelecer um período de tempo para que uma série de dados possa ser considerada para efeitos climatológicos (daí que a própria definição oficial seja vaga ao ponto de apontar “muitos anos”), visto que esta definição depende do elemento que está a ser observado. A mesma publicação refere que, para a maioria dos elementos, dez anos são suficientes para que possam ser estabelecidas séries de dados, embora para o caso da precipitação devam ser considerados, no mínimo, 30 anos. No entanto, as recentes alterações climáticas, bem como a instabilidade de certas áreas do globo no último século aconselham a que as séries de dados sejam construídas com o maior espaço temporal disponível, daí os 30 anos normalmente considerados.

¹⁴ In <https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/otempo/previsao numerica/index.html>, consultado a 3 de maio de 2014.



À primeira época, que se inicia quando o homem começou a navegar e se estende até ao séc. XVIII (altura em que, como já foi visto, Franklin elabora em 1770 o primeiro produto climatológico, com a produção da carta da corrente do Golfo), pode ser dado o nome de “meteorologia empírica”, pois não só não havia registos climatológicos, como a capacidade de previsão era apoiada meramente no conhecimento que os marinheiros haviam acumulado ao longo da sua experiência. Ainda assim, os primeiros escritos específicos sobre meteorologia surgem muito mais cedo do que aquilo que se possa imaginar, nomeadamente com Hipócrates em 400 AC, com o livro *Ar, Água e Lugares*. No entanto, será, porventura, o livro *Meteorologica* de Aristóteles, escrito cinquenta anos depois, em 350 AC, aquele que é tido como o primeiro tratado de meteorologia.

Também os roteiros referidos anteriormente, quer os portugueses quer os árabes, não poderão, à luz das definições atuais, ser considerados para o efeito da climatologia, por não se fundamentarem em amostras de dados, mas apenas no conhecimento empírico dos navegadores. Frases como “E seguindo Djavzã navega-se na direção de Samatra. Se o teu vento for tórrido, mortífero, dá fundo no baixio arenoso que se encontra ao teu lado (...)”¹⁵ demonstram que as previsões eram, efetivamente, empíricas, pois o piloto não sabia o que iria o navegador encontrar naquela área, apenas que, se se deparasse com aquela realidade, então deveria proceder de determinada forma.

A segunda época, que se pode convencionar que seja entre 1770 e a década de 20 do século XX, poderá ser apelidada de “climatologia experimental”. Esta época (que começa com a carta da corrente do Golfo de Franklin e termina no final da Primeira Guerra Mundial, com a introdução de boletins meteorológicos nas radiodifusões navais, permitindo aos comandantes dos navios tomarem decisões levando em linha de conta a previsão meteorológica) foi pródiga não só em tentativas ousadas¹⁶ de obter informação

¹⁵ In Três Roteiros Desconhecidos de Ahmad ibn-Mādjid.

¹⁶ Em 1869 o navio inglês H.M.S. Brisk foi destacado para a entrada do canal da Mancha como coordenador de uma frota de navios espaçados entre si por 500 milhas náuticas, entre Inglaterra e os Estados Unidos da América, que deviam fazer medições periódicas dos elementos ambientais e enviá-los até terra. O problema desta ideia é que os navios se encontravam ligados entre si por telégrafo, o que, no meio do oceano acarretava grandes complicações de operações. Ao fim de seis semanas o projeto foi cancelado, por ser considerado ineficiente e extremamente dispendioso.



Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento. Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

mas também na sistematização dos processos de recolha de dados que, iniciada por Maury, permitiu o início da climatologia como forma de roteamento.

Foi ainda durante este período que, em 1882, o *Meteorological Council of the Royal Society* (Inglaterra) organizou uma recolha de dados que em muito contribuiu para os primórdios da climatologia: durante treze meses, cerca de 3000 navios, aquando das suas travessias do Atlântico Norte, recolheram uma média diária de 700 observações, levando a que daqui se tenham produzido as primeiras cartas climatológicas deste oceano.

Este período é assim um tempo em que os navios, ao saírem para o mar, ainda que não pudessem contar com informações precisas das condições ambientais, podiam inferir, pela zona do globo em que se encontravam e pela altura do ano, o que iriam encontrar.

Por fim, a terceira e última época, que se estende até aos dias de hoje, combina o uso dos potentes algoritmos de PNT com os dados de climatologia recolhidos desde Maury. O roteamento dos navios pode mesmo hoje em dia ser feito no mar, onde os navios recebem informação meteorológica muitíssimo precisa e quase em tempo real (*nowcasting*). Esta evolução dá-se, sobretudo, devido a duas razões:

- A evolução tecnológica de que os equipamentos de comunicações foram alvo. Os navios são, hoje em dia, capazes de comunicar em MF, HF e VHF; receber dados por *fac-simile*; enviar e receber pacotes de dados móveis via satélite, entre outros. Por outro lado, também os serviços em terra são cada vez mais abundantes e precisos, em qualquer parte do mundo;
- O desenvolvimento dos modelos de previsão atmosférica e oceânica, os quais aliados à capacidade da tecnologia existente hoje em dia potenciam em muito a constante evolução desta área.

Ainda assim, os dados climatológicos não foram desconsiderados, continuando mesmo a ser recolhidos de forma cada vez mais sistemática, densa e global. Estas séries



de dados vêm assim complementar e desconflitar algum eventual erro que as previsões meteorológicas possam trazer, tornando-as desta forma mais fiáveis e robustas. Ainda assim, por este cruzamento de dados poder ser moroso, a principal ferramenta de roteamento é a meteorologia.

Não obstante e face a tudo o que foi exposto neste capítulo, à época dos roteamentos em que vivemos hoje em dia, já não será descabido dar-lhe o nome que, no início do mesmo se apresentava como um conceito inexistente: a época da “meteo-climatologia”.

2.3. Conceito de roteamento

Ainda que dentro da área náutica, o termo traduzido “roteamento” tem, hoje em dia, diferentes significados na literatura técnica e científica internacional, cada um deles associado a interpretações e objetivos específicos.

Se na língua portuguesa, mesmo sendo o conceito ainda pouco explorado, poderão subsistir algumas dúvidas acerca da utilização da palavra, na congénere inglesa é ainda mais ambígua a utilização do termo, pois tanto se encontra “*routing*” como “*routeing*”. Ora, na verdade, existem três conceitos distintos que importa salientar, sendo os últimos dois homógrafos:

- 1) *Routeing*: prende-se com o conceito atribuído pela IMO, na sua publicação *Ship’s Routeing*, onde o seu objetivo é claramente identificado: “*The purpose of ship’s routeing is to improve the safety of navigation in converging areas and in areas where the density of traffic is great or where freedom of movement of shipping is inhibited by restricted searoom (...). Ship’s routeing may also be used for the purpose of preventing or reducing the risk of pollution (...).*”. O termo é ainda utilizado com o mesmo significado numa publicação (BR 45(4)) do Almirantado Inglês, de carácter



restrito. Uma definição semelhante é ainda sugerida por Bowditch¹⁷, ainda que o termo utilizado seja “*routing*”.

2) *Routing*: perspectiva atribuída ao planeamento das escalas a efetuar por um navio mercante (CHRISTIANSEN *et al.*, 2004). Neste caso a otimização do roteamento prende-se com a forma mais eficiente de um armador conseguir obter o maior lucro possível ao jogar com os custos de deslocação e paragem em cada porto versus carga a vender e comprar. Poder-se-ia, em português, designar este conceito acertadamente por planeamento de frota.

3) *Routing*: conceito de roteamento meteorológico tal como é conhecido e irá ser tratado neste trabalho, na vertente meteorológica ou climatológica. É também conhecido como “*environmental routing*”. Talvez a melhor definição seja mesmo a de Bowditch¹⁸: “*Ship weather routing develops an optimum track for ocean voyages based on forecasts of weather, sea conditions, and a ship’s individual characteristics for a particular transit.*”

Dentro do conceito de roteamento existem ainda três vertentes diferentes (HINNENTHAL, 2008):

1) Roteamento de curta duração: destinado a retratar as ações a tomar nos próximos minutos ou horas, de acordo com as condições que se fazem sentir no local e que podem variar nesse curto período de tempo.

¹⁷ In “The American Practical Navigator – an epitome of navigation”, capítulo 27.

¹⁸ in “The American Practical Navigator – an epitome of navigation”, capítulo 37.



- 2) Roteamento de média duração: tem o intuito de validar uma viagem particular, segundo as previsões meteorológicas existentes para aquela zona em que se irá navegar

- 3) Roteamento de longa duração: tem em vista o planeamento de frota, utilizando para isso previsões estatísticas baseadas em séries temporais longas (climatologia). É normalmente utilizado para grandes viagens, para determinar qual a altura mais propícia para se passar numa zona meteorologicamente delicada.

Bowditch enumera os seguintes fatores como preponderantes à realização de um roteamento meteorológico:

- 1) Vento;
- 2) Altura significativa das ondas;
- 3) Nevoeiro (ou altura da base das nuvens);
- 4) Efeito da parede norte¹⁹ (quando no Atlântico);
- 5) Correntes oceânicas²⁰;
- 6) Gelos;
- 7) Latitude;

¹⁹ O efeito da parede norte acontece no outono e inverno no hemisfério norte, no Atlântico. Nesta altura, enquanto as águas a norte da corrente do Golfo estão à sua temperatura mais baixa, as águas da corrente do Golfo permanecem relativamente quentes. Desta forma, depois da passagem de uma frente fria, existem por vezes massas de ar do Ártico que descem até latitudes mais baixas que, ao passar por cima da corrente da Golfe são aquecidas, resultando em rápidas e intensas baixas de pressão que provocam distúrbios nos ventos de superfície. Por sua vez, estes resultam também em ondas maiores e numa agitação marítima mais irregular.

Acontecem fenómenos semelhantes no Pacífico Norte (corrente de Kuroshio) e no Índico Sul (corrente das Agulhas).

²⁰ Provavelmente, se Bowditch tivesse enumerado estes fatores hoje, não teria usado o termo “correntes oceânicas”, mas sim “circulação oceânica” (nomeadamente no que respeita às correntes à superfície do mar).



Subsiste a dúvida da intencionalidade da ordem destes fatores, visto que esta não é especificada por Bowditch. No entanto e na literatura técnica atual, quando se fala em roteamento meteorológico refere-se ao roteamento de cargueiros e navios de passageiros. Ora, neste tipo de navios (e também segundo a literatura), o principal fator condicionante é o estado do mar. É este fator que vai determinar qual a rota mais segura e/ou mais confortável. Por seu turno, no roteamento meteorológico de um veleiro, o fator determinante já não é a agitação marítima, mas sim o vento (direção e intensidade).

É assim determinante marcar esta diferença: a primeira condicionante no roteamento meteorológico de um veleiro é, necessariamente, o vento. Ainda que o vento e a agitação marítima estejam intimamente ligados (como nos demonstra SEMEDO *et al*, 2009²¹), um veleiro sem vento consegue-se movimentar apenas recorrendo ao motor, não se estando assim a cumprir o objetivo primordial de um navio deste tipo: andar à vela.

Neste trabalho irá abordar-se o roteamento meteorológico como produto resultante de uma análise operacional, baseada exclusivamente no efeito dos campos de vento à superfície do mar no rendimento de um navio à vela.

2.4. Esquemas de otimização de rota

Matematicamente, quando se fala de otimização, é imperativo referir a necessidade de uma função objetivo. A barreira principal de qualquer problema de otimização é conseguir estabelecer esta função que, genericamente, é dada por:

$$O = f(\bar{Y}, \bar{A})$$

em que O é a solução da otimização e f a função dessa otimização, de que depende um conjunto de variáveis de decisão \bar{Y} para um dado conjunto de parâmetros \bar{A} que podem impor o(s) máximo(s) ou mínimo(s) da função.

²¹ In “Wave-Induced Wind in the Marine Boundary Layer”



O conceito de otimização tem estado intimamente ligado ao cálculo, quer este seja linear ou dinâmico. Podemos distinguir estes dois conceitos de uma forma simples, mas perceptível: enquanto que o cálculo linear se ocupa em chegar à solução ótima apoiado apenas numa restrição (tempo ou distância ou custo, por exemplo), o cálculo dinâmico (ou multimodal), tentativamente, otimiza baseado na combinação de restrições. Ou seja, o primeiro terá como resultado um único ótimo, um ótimo global, enquanto o segundo poderá ter sub-ótimos, conhecidos como locais, que são extremos da mesma magnitude e que nascem do facto de estarmos a maximizar (ou minimizar) várias restrições em simultâneo. Obviamente, as funções multimodais também podem ter ótimos globais, em que a solução foi encontrada potenciando da melhor forma as várias restrições.

A principal implicação desta diferença de ótimos múltiplos reside na robustez da otimização. Este conceito representa a capacidade de um sistema se manter otimizado se algum dos seus parâmetros essenciais for alterado. Desta forma, num sistema linear, se algum dos parâmetros for alterado aquele irá calcular um novo ótimo, mas continuará sempre a existir apenas uma solução. Já num sistema multimodal, ao alterarmos uma das variáveis de entrada, o conjunto de soluções poderá ser totalmente distinto.

Ao falar de otimização de caminho, de uma forma simples este conceito está ligado aos *Shortest Path Problems* (SPP), mais comumente, ao algoritmo de Dijkstra. Este é utilizado quando o custo associado aos arcos é não negativo e vai, de uma forma sistemática, calcular qual o caminho mais curto (seja esta dimensão qual for: custo, distância, tempo, etc...) entre dois pontos. Já quando o assunto se refere a mais que uma variável entra-se no campo do cálculo dinâmico e o que este vai fazer é, grosso modo, escolher a melhor solução através de cálculos iterativos e da minimização ou maximização de funções calcular diversas iterações para que destas se possa escolher a melhor solução.

No que toca ao conceito de otimização de rotas de navios, este tem sido refinado ao longo dos últimos anos mas, normalmente, é determinado por:

- 1) Máxima segurança dos viajantes (tripulação e passageiros) e da carga transportada;



- 2) Máximo conforto dos viajantes;
- 3) Gasto mínimo de combustível;
- 4) Tempo mínimo de viagem;

Obviamente que, como visto já em cima, a este conceito pode também estar associado qualquer combinação de qualquer dos fatores acima mencionados.

Várias foram as abordagens que foram surgindo ao longo destes últimos anos, mas aquelas que, de uma perspetiva histórica, mais interessam para este estudo são as duas que deram origem à maior parte dos modelos existentes hoje em dia, a saber: o modelo da programação dinâmica de Bellman e o modelo isócrono, inicialmente apresentado por James em 1957²² e melhorado por Hagiwara em 1989²³.

De uma forma concisa, pode-se explicar o método de Bellman como o redesenhar de uma rota inicialmente estabelecida, uma possibilidade inicial que é definida pelo utilizador (para o caso do roteamento de navios e a título de exemplo, considere-se uma loxodrómia). A partir desta derrota inicial é construída uma grelha ortogonal de pontos equidistantes.

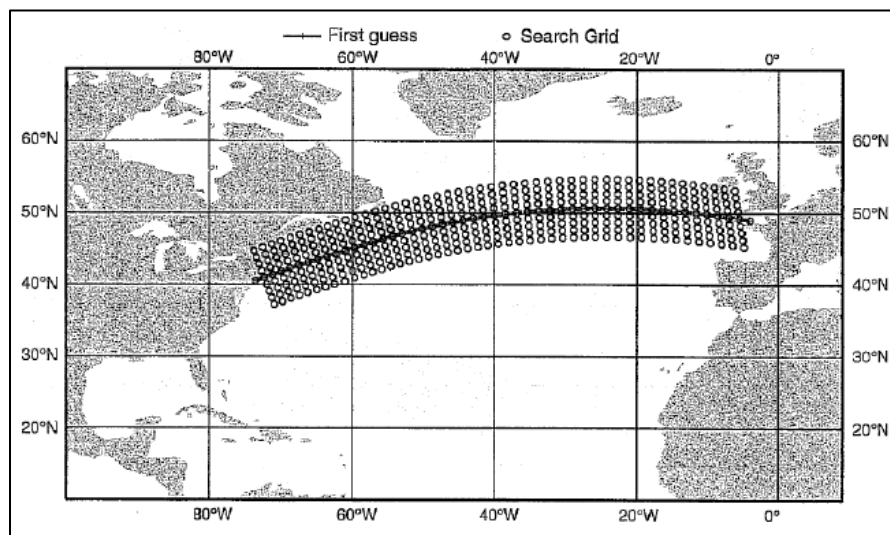


Imagem 1: Exemplo de uma grelha de pontos para uma otimização de Bellman (HINNENTHAL, 2008).

²² In Application of wave forecasts to marine navigation, US Naval Oceanographic Office

²³ In Weather routing of (sail-assisted) motor vessels



O que este tipo de otimização irá fazer é correr consecutivamente os pontos da grelha adjacente, de uma coluna para a seguinte, otimizando a derrota em função das condições meteorológicas e oceanográficas (METOC) previstas para cada ponto. A derrota vai assim sendo sucessivamente otimizada a partir da última iteração calculada, tendo esta tantas iterações quantas as que se desejem. De qualquer forma, é fácil perceber que quantas mais colunas ortogonais tiver a grelha de pontos (maior detalhe), mais iterações serão necessárias para se chegar a uma solução ótima.

Este tipo de análise tem como vantagens a possibilidade de usar a derrota inicial que quisermos (como por exemplo, uma que seja sugerida no *Ocean Passages for the World*) e o delimitar do espaço em que o roteamento meteorológico ocorre (pois irá apenas acontecer dentro da grelha definida). Ainda que raras vezes, esta última vantagem poderá também ser uma desvantagem, na medida em que ao delimitarmos a área do roteamento, pode-se também estar a restringir as alternativas de forma negativa, cortando a possibilidade do navio se deslocar para uma zona que lhe seja mais favorável mas que está fora dos limites estabelecidos.

Já o modelo isócrono, como o nome indica, representa um modelo baseado em linhas de tempo, linhas essas que estão igualmente espaçadas no tempo²⁴ (podendo esse período ser ajustado nos parâmetros iniciais, por exemplo, seis horas). Este modelo é corrido com apenas uma velocidade base (que é introduzida pelo utilizador) e preocupa-se com a minimização do tempo de uma viagem, de acordo com as previsões meteorológicas existentes.

²⁴ Uma forma simples de perceber este conceito é fazer uma analogia com um tronco de uma árvore que seja cortado transversalmente. Nessa secção podem ser observadas vários anéis concêntricos respeitantes ao crescimento da árvore, correspondendo cada uma dessas linhas a um ano de crescimento da árvore.

Nem sempre esses anéis estão igualmente espaçados, visto que em determinado ano poderá ter havido melhores condições de crescimento, ou que as condições climáticas onde a árvore se desenvolve potenciam o seu crescimento mais para um lado que para outro.

Assim funciona também o modelo isócrono: as linhas estão igualmente espaçadas no tempo, sendo a distância depois dada pela combinação dos fatores da velocidade própria do navio e das condições climáticas presentes na área.



Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento.
Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

Cada linha representa assim a fronteira espacial que o navio consegue alcançar com a velocidade que tem disponível (a tal que é introduzida pelo utilizador) e com as condições METOC que, previsivelmente, se farão sentir na área.

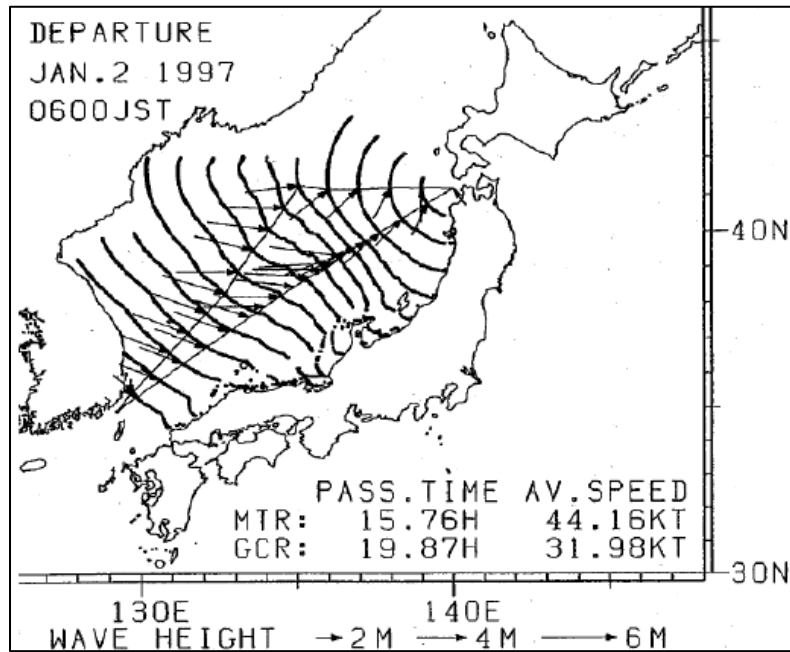


Imagem 2: Exemplo de otimização isócrona no Mar do Japão (HAGIWARA *et al*, 1999).

Se se pensar numa outra perspetiva, este modelo é ainda capaz de calcular otimizações de combustível, tendo para isso que introduzir a velocidade de menor consumo do navio, a qual deverá ser previamente conhecida.

Note-se que, para qualquer um destes modelos, é essencial saber as características do navio, quer físicas, quer de comportamento no mar. Esta necessidade será abordada mais à frente, no capítulo “3.1. Metodologias”.



3. DESENVOLVIMENTO DO CONHECIMENTO DO RENDIMENTO DO OBJETO DE ESTUDO

3.1. Metodologia

Qualquer problema de roteamento meteorológico de navios é feito, invariavelmente, recorrendo a duas ferramentas. A primeira é o algoritmo de otimização em si (quer os *inputs* que este recebe sejam meteorológicos ou climatológicos). A segunda tem que ver com as características do navio e o seu comportamento sob diferentes estados de tempo. Por outras palavras, será uma espécie de bilhete de identidade da atitude do navio, conferindo por isso a cada projeto de roteamento uma unicidade própria, desenvolvido à medida de cada embarcação. O exemplo mais evidente desta afirmação é a fácil constatação de que um programa desenvolvido para um veleiro de cinquenta pés não poderá ser utilizado por um navio mercante com duzentos metros, pois as particularidades de cada um destes navios vão resultar em respostas totalmente diferentes aos forçamentos neles introduzidos pelas condições meteorológicas.

Desta forma, a mera aplicação de um algoritmo de otimização redundaria apenas num trabalho teórico e sem grande interesse prático. Assim, a escolha de um objeto de estudo pretendeu precisamente avaliar os resultados obtidos e tornar este projeto mais interessante e objetivo.

Mas para que tal fosse possível era necessário obter as curvas de rendimento de um navio. Se, por um lado, havia a intenção de trabalhar sobre um veleiro (devido aos desafios que um navio deste tipo traz), pelo outro não havia as tais curvas de rendimento de nenhum veleiro da Marinha Portuguesa. Contudo, existem estudos (FONSECA *et al*, 2010²⁵) que permitiam alimentar a ideia de que, recorrendo a aproximações e à experiência, se poderia obter uma curva bastante bem ajustada para um navio à vela, tendo-se então optado por trabalhar a *Sagres*.

²⁵ *in* “Sailing Characteristics of a Sixteenth Century Portuguese Nau”



Desta forma começou-se a trabalhar tendo em vista o desenvolvimento das curvas polares de rendimento relativas às diferentes marcações e intensidades do vento para o N.R.P. “Sagres”, tal como explicitado em “3.1.1. Curvas Polares” .

Tendo, no entanto, surgido um conjunto de dados considerável optou-se por fazer uma modelação do objeto de estudo através de uma abordagem estatística a qual, por se basear em dados recolhidos, poderá sempre ser melhorada, recorrendo a novos registos de forma a aumentar a significância estatística da base de dados.

Importa no entanto referir que, quer se tivesse enveredado por um caminho ou por outro, o objetivo desta primeira tarefa foi criar as bases para alimentar um futuro algoritmo de otimização de derrotas, sendo assim a modelação da barca a tarefa base deste trabalho (ainda que essencial para a validação do modelo, é verdade). Assim sendo, querendo-se obviamente que esta seja o mais exata possível, não é descabido afirmar que o rigor de uma aproximação conseguida estatisticamente e bem construída e fundamentada será essencial para a validação do modelo.

3.1.1. Curvas Polares

É hoje em dia comum que os veleiros modernos tenham de fábrica uma curva polar de rendimento. Esta curva não é mais que uma visualização gráfica daquilo que é, teoricamente, a velocidade do navio em função da intensidade e marcação do vento.

Esta curva é obtida através de uma de três maneiras: ou com recurso à modelação numérica; ou recorrendo à realização de modelos físicos das embarcações (quer hidro, quer aerodinâmicos), os quais são testados e avaliados em tanques e túneis de vento; ou, por fim, considerando a recolha de testemunhos²⁶.

Na primeira opção, a dos métodos numéricos, baseados nas séries de Delft, começam a proliferar uma série de programas mais ou menos fidedignos desenhados

²⁶ Esta aproximação permite a construção de uma curva polar empírica, podendo ser mais ou menos consensual entre os velejadores que conhecem determinada embarcação. Para o caso do objeto de estudo, faremos essa abordagem no capítulo “3.1.2.1. – Recolha de Dados e testemunhos”.



pelas empresas de equipamentos náuticos e por faculdades de arquitetura naval de todo o mundo. São exemplos disto o *KiwiTech* (que mais recentemente passou a fazer parte da multinacional *Raytheon Marine Ltd.*, também conhecida como *Raymarine*), o *The Sailing GPS*²⁷ (um GPS onde é possível inserir os dados do navio e que vai tentar otimizar os bordos em função dessas características), o *Sailsim* (um VPP desenhado com base no cálculo dinâmico onde se entra com a geometria do casco e das velas que foi utilizado com sucesso por OLSSON, 2005 (este software não foi considerado para esta tese por não se encontrar disponível gratuitamente, mas para efeitos de estudos futuros será uma boa ferramenta a ter em consideração)) e, por fim, o *PCSAIL 2.5* (um VPP desenvolvido pelo *Marine Engineering Department*, da Universidade do Michigan). Uma cópia deste último programa foi gentilmente cedida ao autor pelo professor Robert Beck, responsável pelo desenvolvimento do projeto naquela universidade, que também o alertou para o facto de o *software* estar desenhado para veleiros que armassem apenas com latinos (“*slope rigged yachts*”) e que, provavelmente, nem iria correr com dados de veleiros de pano redondo como o N.R.P. “Sagres”, o que acabou por ser o caso.

Já com a segunda opção, a dos modelos físicos, dado os avanços tecnológicos que esta área tem vindo a observar, é-nos hoje possível dizer que as relações entre as maquetes e os navios reais são muito fiáveis. Prova disso é o artigo de DEAKIN, 2002, em que este conclui que, em águas calmas, as correlações da manobrabilidade e andamento a motor entre o modelo e o veleiro são excelentes, ficando o andamento à vela ligeiramente aquém do previsto (como justificação, supõe que o velame estaria mal mareado). Por outro lado, também CAMPBELL, 2013, propõe que os estudos em túneis de vento estão cada vez mais fiáveis e aproximados da realidade, o que aliado a um tanque de testes, proporciona ao desenvolvimento deste modelos um ambiente perfeitamente controlado, tanto ao nível aerodinâmico (o vento é totalmente controlado pelo utilizador, direção e intensidade), como ao nível hidrodinâmico (no início do teste as águas do tanque estão paradas, começando a gerar-se agitação à superfície apenas pela energia

²⁷ Consultado em 10 de junho de 2014 em: <http://www.thesailinggps.com/>.



Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento. Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

induzida pelo vento), facultando assim uma ótima capacidade de recolha de dados. Obviamente que a validade destes dados está também dependente das maquetes dos modelos em si, as quais devem ser construídas com o maior grau de fiabilidade agregado possível, tanto ao nível das proporções (dimensões e deslocamento), como das qualidades náuticas do navio.

Na teoria, aquilo que estes modelos almejam é calcular o equilíbrio de forças a que o navio está sujeito quando a andar à vela. A performance do navio a navegar à vela, a velocidade esperada em função da direção e intensidade do vento, é passível de ser alcançada ao resolver as equações que traduzem o equilíbrio estático entre o conjunto de forças hidro e aerodinâmica nas diferentes direções de um sistema de coordenadas cartesiano.

Considerem-se estas forças constantes ao longo do tempo e que as velas do navio estão bem mareadas, assumindo assim que o navio avança a direito, sem qualquer influência do leme. As forças são assim representadas num sistema de eixos com origem no centro de gravidade do navio, com o vetor velocidade da plataforma a coincidir com o eixo horizontal longitudinal, os vetores das forças hidro e aerodinâmica no outro eixo horizontal e o vetor da impulsão no eixo vertical. Teoricamente devem ser consideradas estas três forças ao longo de cada um dos eixos. No entanto, é comum considerar apenas o equilíbrio de forças entre o plano horizontal e o momento inclinante, assumindo que as pequenas variações de calado (derivadas do caturrar do navio) podem ser desconsideradas, por não provocarem variação significativa no vetor de impulsão. Desta forma, aquilo que os modelos pretendem resolver são as seguintes três forças:

Força Aerodinâmica = Força Hidrodinâmica

Força Propulsiva = Resistência Hidrodinâmica

Força lateral Aerodinâmica= força lateral Hidrodinâmica

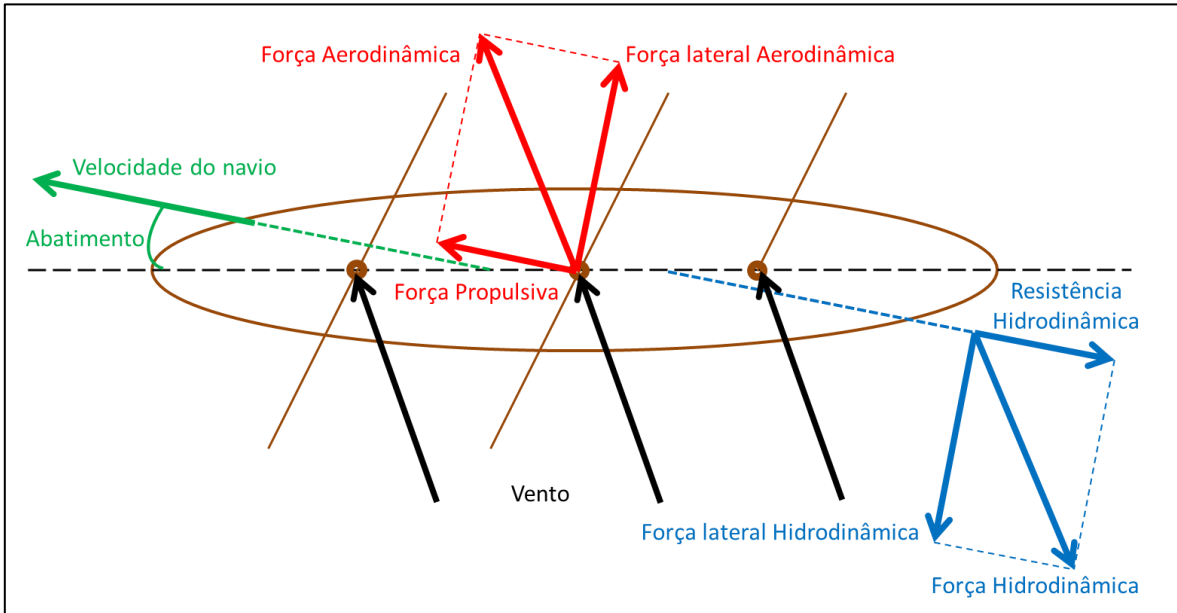


Imagem 3: Forças atuantes num veleiro.

O que nos leva a chamar a esta abordagem modelos é o facto de estas forças serem necessárias para calcular a solução, ao mesmo tempo que dependem dela. Ou seja, as equações acima devem ser calculadas por um processo iterativo que procure a solução correta.

É assim, através da resolução das equações acima descritas, que em função da direção e intensidade do vento seria possível prever a velocidade do navio.

Desta forma, e tendo em vista o desenvolvimento de uma solução para este trabalho, seria praticável, através dos modelos da *Sagres*, calcular a sua curva polar. Acontece que a construção destes modelos é dispendiosa e morosa, constituindo, por si só, objeto para uma outra tese.

Existe, no entanto, uma abordagem alternativa, a qual afirma poder-se desenhar a curva polar de um navio recorrendo a dados obtidos noutros testes, com modelos de navios diferentes daquele que queremos delinear.

Mas afinal, como vem isso a ser possível, utilizar dados de protótipos diferentes do objeto de estudo, se a curva polar é uma característica tão própria de cada navio? A resposta é relativamente simples, sendo no entanto necessário compreender primeiro o objetivo de uma modelação deste tipo. Como explanado em cima, o objetivo final de um



problema deste género prende-se com o cálculo das vertentes hidro e aerodinâmica de cada navio. Mais especificamente, na vertente hidrodinâmica aquilo que os modelos pretendem alcançar é o coeficiente efetivo de forma e o fator de eficiência de Oswald²⁸ de cada embarcação, enquanto que na vertente aerodinâmica o intuito é obter os coeficientes de resistência e de sustentação para esse mesmo navio.

Ora, em qualquer um dos casos, independentemente do navio, aquilo que é afirmado por FONSECA *et al*, 2010, é que o que torna possível a aplicação dos fatores calculados através dos protótipos às embarcações reais é a semelhança de formas e não de dimensões entre o modelo e o navio. Ou seja, se a forma do casco e a armação/área vélica do objeto de estudo forem semelhantes em forma aos do modelo, então os resultados obtidos podem ser aplicados livremente (sempre com um eminente fator de erro associado).

É da conjugação de constatações como as de DEAKIN, 2002, e de FONSECA *et al*, 2010, que nos é permitido dizer que também para o caso da *Sagres* seria possível recorrer a este método para a determinação do seu gráfico de curvas polares (a título de exemplo, para a vertente hidrodinâmica, poder-se-ia utilizar os coeficientes calculados num dos modelos retratados por HARRIES *et al*, 2001, para daí estimar as forças que atuam no casco do N.R.P. “Sagres”; isto porque, apesar de os navios abordados no estudo em cima terem dimensões muito diferentes do objeto de estudo, geometricamente as formas são semelhantes, tornando assim possível a utilização dos mesmos coeficientes de forma). No entanto, apesar de se ter iniciado o estudo para se enveredar por este caminho, acabou-se por não lhe dar seguimento devido a ter surgido um conjunto de registos recolhidos a bordo²⁹ que permitiu, de forma bastante satisfatória, dar seguimento ao projeto.

²⁸ Estes dois conceitos são usados mais vulgarmente na aeronáutica, pretendendo definir as forças que sustentam uma plataforma num determinado meio. O coeficiente efetivo de forma, neste caso, refere-se à razão entre o comprimento do navio e a sua boca, enquanto que o fator de eficiência de Oswald é um número que representa uma correção entre a resistência e a impulsão do navio quando comparados com um casco perfeito, com o mesmo coeficiente efetivo de forma, mas em que a impulsão é distribuída igualmente, de forma elíptica.

²⁹ Estes registos foram recolhidos pelo CFR Maurício Camilo aquando da sua passagem do navio, entre 2007 e 2008. Quando começou a recolher estes dados, a intenção do CFR Camilo era precisamente a construção de uma curva polar de rendimento do N.R.P. “Sagres”.



3.1.2.1. Recolha de informação, dados e testemunhos

Por não existir nenhum estudo deste tipo a bordo, a investigação começou por se questionar antigos Comandantes e Oficiais Navegadores do navio, a fim de perceber, através da intuição e experiência destes, qual o comportamento expectável do navio a navegar à vela, sob diferentes marcações de vento.

Embora as opiniões não sejam unânimes, de um modo geral, são concordantes em relação a um quadrante, mais propriamente o compreendido entre a marcação 90° e 135° e, mais especificamente, entre as marcações de vento aparente 90° e 120°.

Sendo este o testemunho real de muitos oficiais que passaram pelo navio, a evidência porventura maior e que, de alguma forma, é até semelhante ao estudo que apresentaremos no capítulo “3.1.3. – Curvas de rendimento”, é a assunção vertida pelo CMG Proença Mendes (aquando do seu comando do navio na volta ao mundo em 2010) no perfil de velocidade abaixo ilustrado, o qual foi construído para servir de apoio a um programa de roteamento climatológico comumente utilizado no navio, o *Visual Passage Planner*³⁰.

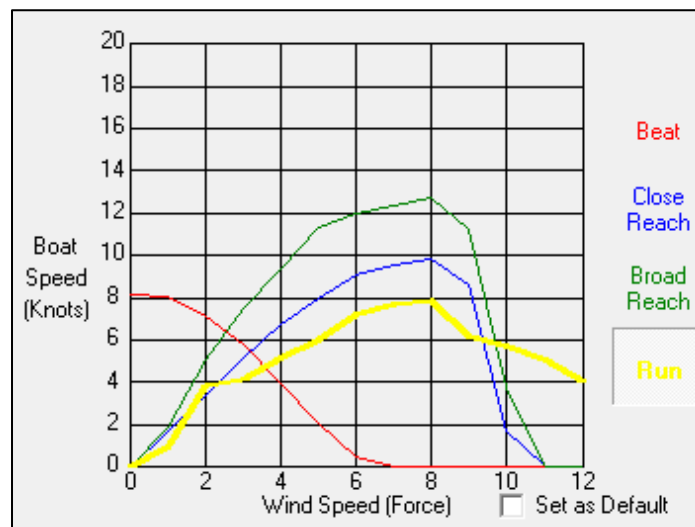


Imagem 4: Perfil de rendimento do N.R.P. “Sagres” estimado pelo CMG Proença Mendes aquando da volta ao mundo em 2010

³⁰ Visual Passage Planner™, by Digital Wave



Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento. Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

Na imagem é possível observar quatro linhas. A primeira, a vermelho, é referente às marcações de vento entre os 0° e os 45°; a segunda, a azul, entre os 45° e os 90°; a terceira, a verde, entre os 90° e os 135°; e, por fim, a amarelo, a curva representativa dos 135° aos 180°. Esta divisão é obviamente imposta pelo próprio programa, mas ainda assim dá uma ideia bastante clara de que, para a mesma intensidade de vento, o rendimento do navio pode ser muito diferente. Neste caso, a curva a vermelho é explicada pelo facto de se considerar que quando o vento está pelos sectores de proa (0° a 45°) o navio está a navegar a motor, vindo a decrescer com o aumento do vento, visto a máquina do navio não ter potência para lhe imprimir uma velocidade superior à resistência do vento quando este alcança força sete na escala de Beaufort. Esta informação foi adaptada a uma rudimentar curva polar, como se demonstra em baixo. Cada linha representa uma força de vento, devendo a velocidade do navio, em função da marcação no *plot*, ser lida no eixo vertical.

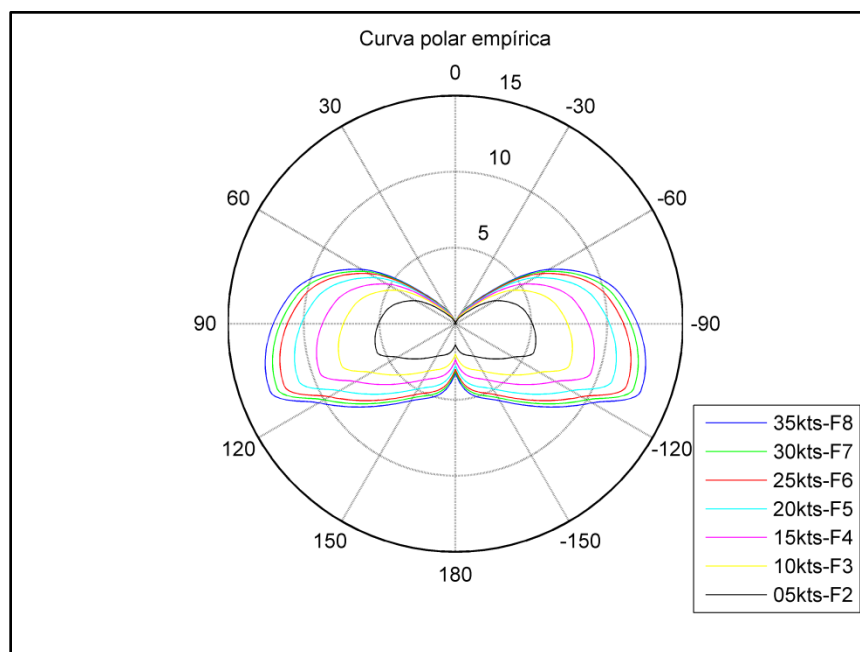


Imagem 5: Curva polar empírica do N.R.P. “Sagres”.

Não havendo disponível nenhum tipo de gráfico de curvas polares da *Sagres* tornou-se necessário recorrer a outros meios para cálculo do mesmo. Tendo a primeira



abordagem sido a da utilização de informação recolhida através de modelos (como explicado em 3.1.1.) e não tendo sido encontrados também estudos suficientes de navios semelhantes à barca, a investigação focou-se nas informações recolhidas pelo testemunho e experiência de antigos comandantes e oficiais navegadores do navio.

Embora não sendo um arquivo oficial nem fazendo parte dos registos do navio, no ano de 2008, durante a operação “Mar Aberto”, com uma duração total de seis meses, o CFR Maurício Camilo construiu um formulário de registo de informação para quando o navio navegava exclusivamente à vela. Dessa forma foram recolhidas 1357 entradas horárias (correspondendo aproximadamente a 56,5 dias de navegação contínua) de dados relativos ao comportamento do navio (a navegar somente à vela) e das condições ambientais que se faziam sentir. O presente trabalho apenas foi possível devido a esta iniciativa, pelo que o autor pretende, de forma inequívoca, deixar o seu profundo agradecimento ao CFR Maurício Camilo pela cedência destes dados.

Cada uma destas entradas é constituída pela seguinte informação: rumo do navio, velocidade ao fundo, velocidade de superfície e marcação e intensidade do vento aparente.

Se é verdade que parte desta informação poderá ser encontrada abundantemente nos diários de navegação do navio, a pertinência deste conjunto de dados reside no facto de estas entradas, seguramente, terem sido recolhidas com o navio apenas a movimentar-se à vela (e é este pressuposto essencial que não é garantido pelos diários, pois mesmo tendo a informação de que o navio estaria a velejar, nada nos diz que não estivesse igualmente a utilizar o motor para auxílio na propulsão).

Desta forma, será da análise deste conjunto de dados que surgirá o modelo de rendimento do N.R.P. “Sagres” utilizado neste estudo³¹. Este modelo (cujo processo de obtenção e desenvolvimento será desenvolvido no capítulo seguinte, “3.1.2.2. Análise de

³¹Ainda assim, a utilização destes dados para modelação do rendimento do N.R.P. “Sagres” a navegar à vela não dispensará em caso algum o saber acumulado e a experiência de navegação que compilados durante anos pelos ditos comandantes e demais oficiais que tenham prestado serviço no navio. Este conhecimento (ainda que empírico) servirá para, de certa forma, validar e ajustar o modelo obtido pelos dados



Dados”) poderá ser assumido como um protótipo fiável do rendimento do navio que pode (e deve) ser naturalmente afinado com a recolha de mais dados ao longo dos próximos anos e futuras navegações. No entanto, nunca é de mais reforçar que este modelo se baseia em três pressupostos:

- 1) Rendimentos que dele podem ser inferidos referem-se exclusivamente ao período em que o navio navega à vela;
- 2) Considera-se que o fator vento é dominante no rendimento do navio face a outros fatores, como a agitação marítima e a corrente à superfície;
- 3) Por fim, que o navio terá navegado com a maré mais propícia à rentabilidade do navio, face às condições METOC.

Com estas três assunções, pode o leitor facilmente identificar a existência de uma zona escura neste modelo, nomeadamente no que se refere à influência dos outros elementos meteorológicos no rendimento do navio e às alturas em que, por força da falta de vento, o navio se vê obrigado a fazer a sua propulsão a motor.

Quanto à primeira lacuna, podemos afirmar que as futuras recolhas de dados poderão colmatar esta falha. Será, essencialmente, a ter em conta a influência da agitação marítima e as correntes oceânicas que se façam sentir à superfície. Ainda assim, embora estes fatores sejam preponderantes no vetor propulsão do navio, a maior influência meteorológica num veleiro é o vento, pelo que, para efeitos de um estudo preliminar da matéria, esta seja uma boa aproximação.

Já no que toca à propulsão a motor, embora não haja dados do comportamento do navio no mar estando sujeito a diferentes perturbações meteorológicas, assumir-se-á (visto que esta ferramenta visa o auxílio ao planeamento de viagens) que sempre que as condições previstas dos campos de vento, aliadas ao diagrama de rendimento do navio não ofereçam uma garantia de velocidade superior a cinco nós, o programa permitirá



contemplar uma velocidade mínima quando o navio não encontrar ventos favoráveis à sua deslocação no rumo pretendido, cuja velocidade pode ser ajustada consoante o planeamento da viagem

De qualquer das formas, é importante sublinhar que esta é uma aproximação inicial e que deverá, com o tempo, ser refinada à medida que for estando disponível mais e mais informação para alimentar esta base de dados.

3.1.2.2. Análise dos dados

Como referido no capítulo anterior, o rendimento do N.R.P. Sagres (objeto de estudo neste trabalho) foi caracterizado através da análise de um conjunto³² de registos composto por 1357 observações horárias recolhidas durante a operação “Mar Aberto”, em 2008.

O aspeto mais importante relativamente a estes dados (e que, de alguma forma, os torna únicos) é a garantia de que estes foram obtidos criteriosamente, dando garantias de que se referem ao navio a navegar exclusivamente à vela. Garantimos assim que, ao não ter o motor a influenciar a propulsão, se estão a minimizar os erros inerentes à modelação do rendimento da *Sagres* à vela. Por outro lado, quando em viagem, o objetivo do navio passa por maximizar o tempo de navegação exclusivamente à vela, indo assim também esta modelação de encontro às necessidades do navio.

Como referido anteriormente, cada uma das entradas do banco de dados trabalhado é constituída pela seguinte informação:

- Rumo do navio
- Velocidade ao fundo
- Velocidade de superfície
- Vento aparente (marcação e intensidade);

³² Estes dados podem ser encontrados em forma de tabela no Subanexo A1 - “Volume de dados inicial”.



Antes de se ter dado início ao tratamento dos dados, tornou-se necessário refletir acerca da forma como estes seriam analisados de forma a alcançar a informação necessária ao algoritmo de otimização. Para esta primeira abordagem o único fator meteorológico que foi tido em conta na influência desta otimização foi o vento, ficando a agitação marítima e as correntes de parte. Consequentemente, a velocidade de superfície do navio não será um elemento que vá ser utilizado neste estudo³³.

Um segundo aspeto a ter em conta é o facto de se saber de antemão que o que irá alimentar o algoritmo de otimização são previsões de campos de vento verdadeiro. Desta forma, foi necessário adaptar os dados disponíveis aquilo que era pretendido, o vento verdadeiro³⁴. Para o cálculo do vento verdadeiro é necessário, além do rumo e da velocidade do navio, o vento aparente. No entanto, o vento aparente é normalmente retirado relativamente à proa da embarcação. Como tal, foi necessário (devido a uma lacuna na recolha dos dados) fazer uma outra inferência: que a proa do navio era igual ao rumo. Esta suposição será, assumidamente, aquela que mais erros irá trazer à modelação do navio, não podendo, no entanto, ser superada de outra forma.

O vento verdadeiro foi assim calculado através das fórmulas:

$$M^{VV} = 90 - \left[\arctan\left(\frac{V^{AP} \times \cos(M^{VA}) - V_V}{V^{AP} \times \sin(M^{VA})} \right) \right]$$

³³ Ainda que possa haver situações em que, efetivamente, existam fenómenos meteorológicos que tenham tido influência no andamento do navio (quer por condições de agitação marítima fora do normal quer por correntes fortes que imprimam maior ou menor velocidade do que seria esperado no navio), as entradas de dados que refletem essa influência foram devidamente filtradas, como se explica mais à frente.

³⁴ Este aspeto poderá causar alguma contestação, na medida em que, a partir do momento em que um veleiro tem seguimento, este passa a ser influenciado pelo próprio vetor de vento que gera, o vento aparente. No entanto é conveniente não esquecer que todo este estudo se baseia na assunção de que o navio estará sempre mareado da melhor forma possível para a situação em que se encontra. Se se partir deste princípio, para o vento aparente que se faz sentir em determinado momento (o que compreende velocidade e marcação), pode ser afirmado que existe para esse mesmo vento aparente um respetivo vento verdadeiro que influencia a plataforma.

Desta forma, ainda que a otimização da mareação do pano seja um grau de liberdade do problema incontroável, é perfeitamente legítimo utilizar como argumento para cálculo de rendimento do navio o vento verdadeiro.



$$V^{VV} = \sqrt{[V^{AP} \times \cos(M_{360}^{VA}) - V_V]^2 + [V^{AP} \times \sin(M_{360}^{VA})]^2}$$

Em que M^{VV} e V^{VV} representam, respetivamente, a marcação e a velocidade do vento verdadeiro.

Com a aplicação destas fórmulas aos dados preenche-se uma lacuna de informação, sendo a partir de agora possível parametrizar o rendimento da *Sagres* através da análise da velocidade do navio em função da velocidade e marcação do vento verdadeiro.

O objetivo final desta análise de dados é obter um rendimento tipificado do navio em função da velocidade do vento verdadeiro. Se V_V for a velocidade verdadeira do navio, então R (o rendimento do navio) será dado por:

$$R = \frac{V_V}{V^{VV}}$$

Ou seja, se para determinada marcação de vento o rendimento calculado do navio for de 0,4 e se estiverem 10 nós de vento a entrar por essa marcação, então, teoricamente, o navio estará a andar à velocidade de quatro nós (relembrando, uma vez mais, que o navio se está a movimentar exclusivamente à vela).

A análise dos dados começou então com o agrupamento dos mesmos em conjuntos³⁵, relativamente à sua marcação. Estes intervalos têm uma amplitude de dez graus, começando na marcação 71° (ou seja, o primeiro grupo compreende as entradas entre os 71° e os 80°, o segundo entre os 81° e os 90° e por aí em diante), perfazendo assim um total de onze grupos de marcações que foram analisados. A razão do primeiro conjunto começar nos 71° é (como evidenciado pelos dados) por o navio não ter capacidade de andar exclusivamente à vela entre os 0° e os 70° de marcação do vento verdadeiro, aproximadamente.

³⁵ Estes dados podem ser encontrados em forma de tabelas no Subanexo A2 - “Tabelas auxiliares de cálculo para verificação da pertença a determinada distribuição”.



Otimização de rotas ao campo sinóptico do vento. Aplicação prática ao N.R.P. "Sagres".

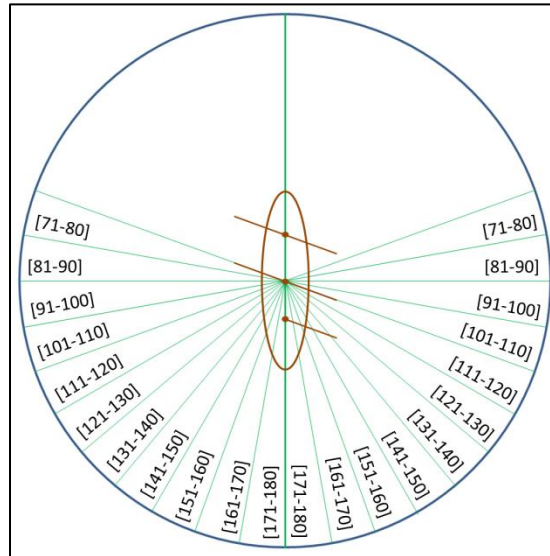


Imagem 6: Esquema exemplificativo dos intervalos de marcações utilizados.

Ao longo dos próximos parágrafos em que se irá desenvolver a metodologia utilizada ir-se-á usar como exemplo o conjunto [171-180], por visualmente, ser um bom exemplo do processo adotado.

De seguida, houve necessidade de verificar que tipo de distribuição seguiam estas relações entre a intensidade e a direção do vento verdadeiro e a velocidade do navio (para cada grupo de marcação). Através de graficação foi possível constatar que estas relações seguem uma distribuição aproximadamente normal.

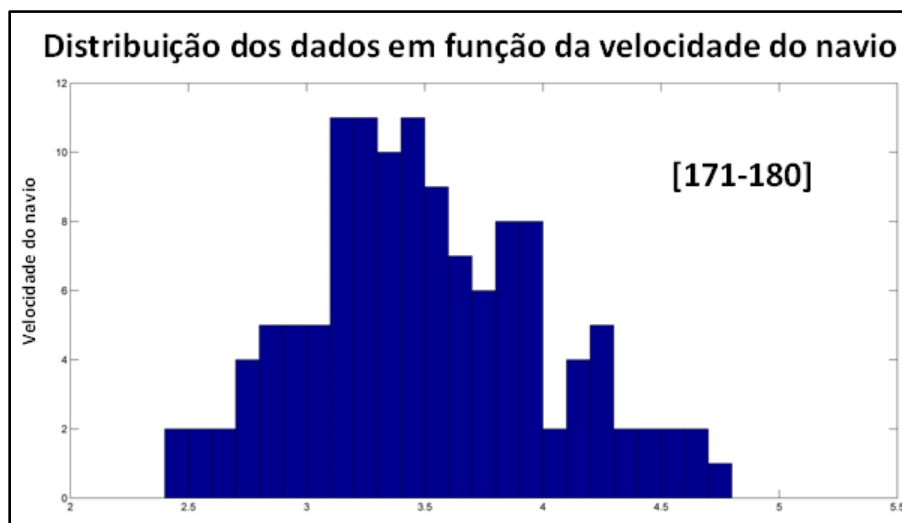


Imagem 7: Distribuição dos dados em função da velocidade do navio.



Ainda que a distribuição não esteja perfeitamente centrada e não seja absolutamente simétrica é possível constatar que os pontos giram em torno de um valor médio próximo da moda, pelo que quando chega a altura de selecionar dados, esta seleção pode ser feita recorrendo à fórmula do desvio padrão comum, em que os dados giram em torno do seu ponto médio.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

Caso houvesse uma grande discrepância, então poder-se-ia ter recorrido à mesma fórmula do desvio padrão, mas fazendo com que os pontos girassem em torno da moda e não da média.

Ainda assim, houve necessidade de fazer uma filtragem dos dados, na medida em que poderiam existir dados erróneos redundantes de erros de registo ou de situações de navegação adversa, onde a influência da agitação marítima ou da corrente de superfície possam ter suplantado a influência do vento. Esta filtragem foi feita seguindo o método que abaixo se descreve.

Dentro de cada um destes conjuntos a análise começou por ser feita com um gráfico de dispersão que teve como entradas a velocidade verdadeira do navio e a velocidade do vento verdadeiro (em que $x=V_v$ e $y=V^{VV}$), tendo nesse gráfico sido desenhada uma reta de correlação que passasse na origem do gráfico³⁶.

³⁶ Esta determinação assume que, quando não há vento, o navio também não tem seguimento, minimizando já que se assumiu previamente que os efeitos da agitação marítima e das correntes serão desconsiderados deste trabalho.

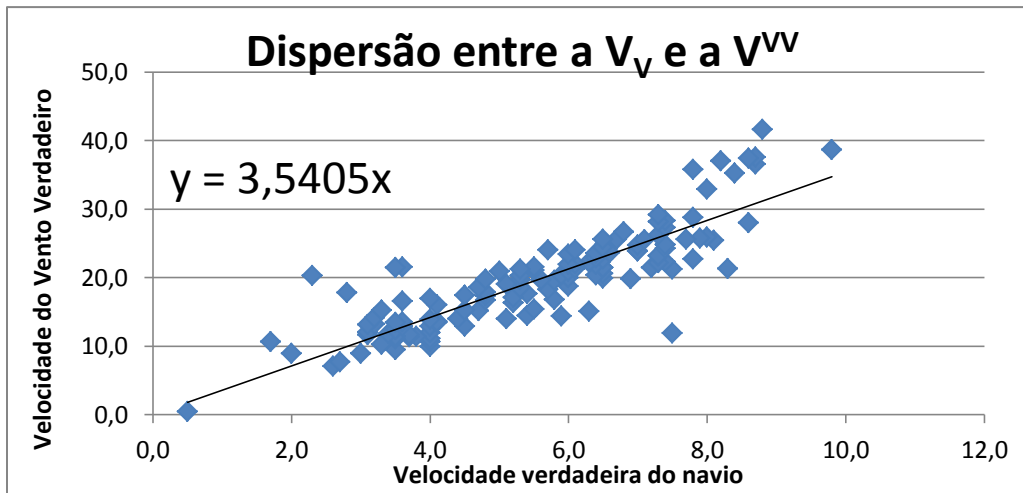


Gráfico 1: Dispersão entre a Velocidade Verdadeira e a Velocidade do Vento Verdadeiro

Ao assumir que a reta de correlação indica a distribuição certa entre o vento e a velocidade do navio, sendo a velocidade do vento imutável, então a velocidade do navio deveria ser dada em função do declive por:

$$V_{vc} = \frac{V^{VV}}{m}$$

Será a diferença (em módulo) da velocidade verdadeira medida e da velocidade verdadeira calculada que dirá se determinada entrada estará ou não dentro do desvio padrão estabelecido. Assim:

$$\Delta V_V = |V_V - V_{vc}| \leq x\sigma$$

Assim sendo, tendo calculado os diferentes desvio padrão, assumiu-se que os valores que ultrapassavam esses mesmo desvios padrão foram considerados como dados erróneos, tendo-se estes sido excluídos e feito novas relações apenas com os dados que se encontravam dentro desse intervalo. A validação dos dados acaba por ser feita com a própria utilização do desvio padrão, na medida em que acabam por apenas ser utilizadas as entradas que se encontram dentro dos valores calculados de σ . No entanto, e para que,



Otimização de rotas ao campo sinóptico do vento.
Aplicação prática ao N.R.P. "Sagres".

tentativamente, se usasse o maior número de dados possível, além de σ foram também calculados os desvios para $1,5\sigma$ e 2σ , sendo os resultados apresentados em baixo.

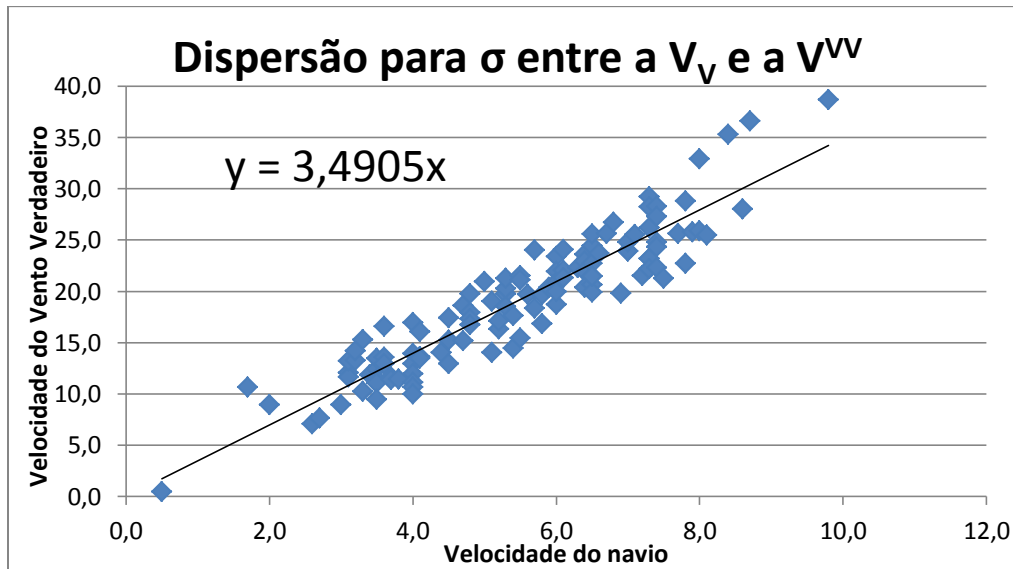


Gráfico 2: Dispersão para σ entre a Velocidade Verdadeira e a Velocidade do Vento Verdadeiro

Para este caso específico (conjunto [171-180]), o total da amostra de dados era de 133 valores, tendo sido usado para a distribuição de σ 120 entradas, para $1,5\sigma$ 130 entradas e para 2σ 132.

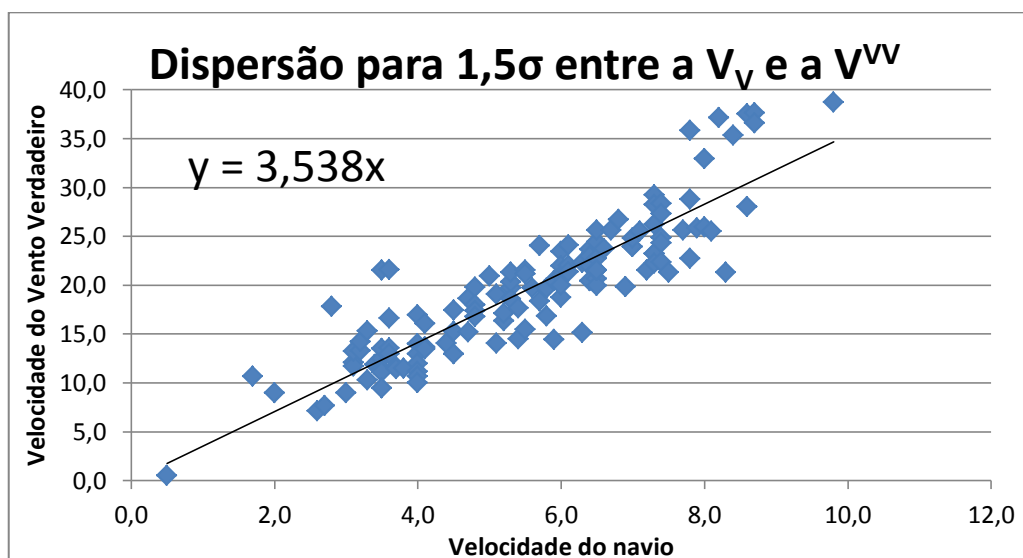


Gráfico 3: Dispersão para $1,5\sigma$ entre a Velocidade Verdadeira e a Velocidade do Vento Verdadeiro



Tal como referido anteriormente, ainda que para efeitos de exemplo se tenha usado neste capítulo o intervalo [171-180], os restantes intervalos de dados foram analisados recorrendo ao mesmo método, tendo-se chegado às mesmas conclusões³⁷.

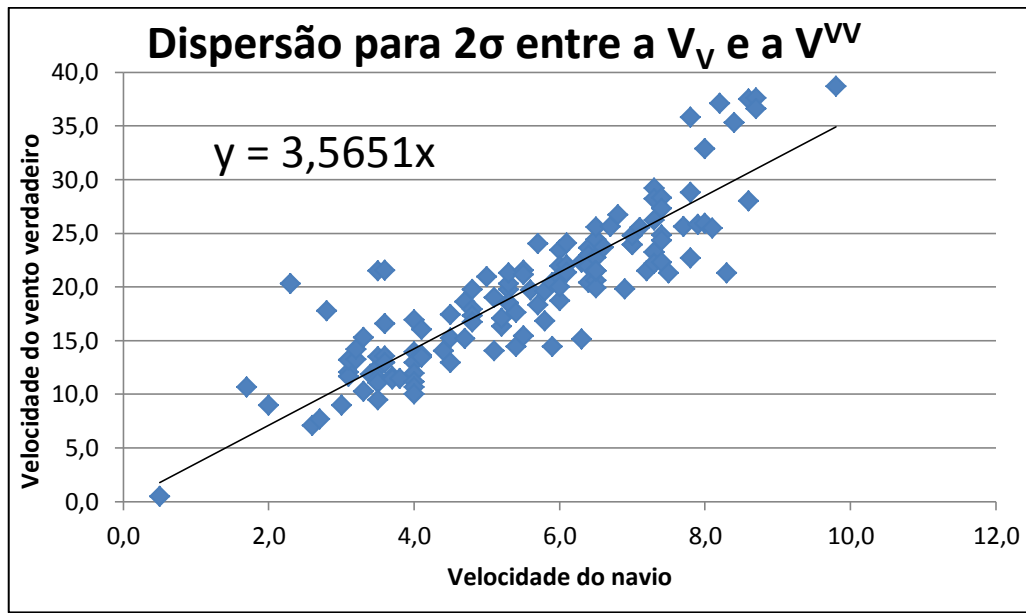


Gráfico 1: Dispersão para 2σ entre a Velocidade Verdadeira e a Velocidade do Vento Verdadeiro

Tendo então o declive de cada uma das retas da distribuição a utilizar, sabe-se que a velocidade do navio será dada por:

$$V_V = \frac{V^{VV}}{m}$$

É da constatação do facto de a dispersão de relação entre a intensidade do vento real e a velocidade do navio (para cada intervalo de marcação) se concentrarem essencialmente ao longo de uma reta que intersecta a origem que pode ser considerado

³⁷ Os gráficos de dispersão dos restantes intervalos poderão ser encontrados no Subanexo A3 - “Gráficos de dispersão linear para os diferentes valores de desvio padrão”.



que o coeficiente de correlação (inversamente, o coeficiente de rendimento) é válido para as diferentes velocidades registadas do navio³⁸.

É da verificação anterior que se admite que $\frac{1}{m}$ é nada mais que o rendimento do navio para cada intervalo de marcações.

3.1.3. Curvas de rendimento

Depois de no capítulo anterior se ter apresentado a metodologia usada para a análise dos dados recolhidos, no presente capítulo descreve-se a forma como os resultados foram aplicados.

Como apresentado em “3.1.1. – Curvas polares”, modernamente a curva que parametriza a velocidade dos navios baseia-se numa intensidade de vento fixa, da qual se irá inferir graficamente qual a velocidade do navio para determinada marcação.

No entanto, este trabalho socorreu-se de uma abordagem mais ousada, na medida em que procurou tipificar a velocidade esperada de um navio para qualquer intensidade de vento, vindo de qualquer marcação. Desta forma, é da análise explanada no capítulo anterior que surgem as curvas de rendimento que a seguir se expõem.

Depois de efetuados os cálculos para os diferentes valores de σ (1, 1,5 e 2), a fim de perceber quais os coeficientes a utilizar, fez-se uma comparação entre os dados utilizados em cada uma das distribuições e os resultados obtidos, podendo concluir-se conforme a tabela seguinte:

³⁸ No entanto, chama-se a atenção para os desvios acentuados das observações relativamente a esta reta nas velocidades acima de 8 nós, o que poderá traduzir uma relação já não linear



Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento.
Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

Marcação	σ		$1,5 \sigma$		2σ	
	Nº registos validados	Coef.	Nº registos validados	Coef.	Nº registos validados	Coef.
[71-80]	64	0,347766	65	0,345328	66	0,34339
[81-90]	98	0,374125	134	0,377017	151	0,37073
[91-100]	128	0,405039	139	0,403015	145	0,39931
[101-110]	107	0,389166	110	0,383789	112	0,37938
[111-120]	118	0,392065	128	0,385773	129	0,38369
[121-130]	114	0,381971	115	0,381476	116	0,38385
[131-140]	97	0,386772	97	0,386772	97	0,38677
[141-150]	96	0,371858	100	0,369645	104	0,36152
[151-160]	162	0,331477	163	0,330568	167	0,32491
[161-170]	107	0,307465	114	0,307059	116	0,30443
[171-180]	120	0,286492	130	0,282646	132	0,2805
Total de registos validados	1211		1295		1335	
% de registos validados face ao total dos dados	89,24097		95,4311		98,37878	

Tabela 2: Coeficientes de rendimento N.R.P. “Sagres” para diferentes valores de σ

Ao analisar a tabela acima é perceptível que as diferenças entre os coeficientes obtidos da distribuição de σ e de $1,5\sigma$ não são consideráveis, sendo no entanto significativa a diferença de dados utilizados numa e noutra (mais de 6%). Desta forma, optou-se por utilizar os coeficientes obtidos a partir da distribuição de $1,5\sigma$.

Tendo então definidos os valores a utilizar, à semelhança das curvas polares, desenhou-se um diagrama do rendimento do navio, ao qual se deu o nome de curva de rendimento. Esta curva é desenhada em função do valor médio da rentabilidade do navio no intervalo de marcações correspondente. Ou seja, se no intervalo [171-180] o coeficiente de rendimento calculado é de 0,5, então o gráfico irá ter por coordenada polar (0,5;175). Os pontos coordenados por esta análise permitem assim traçar a curva polar de rendimento do navio.



Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento. Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

Para a curva de $1,5\sigma$ tem-se então:

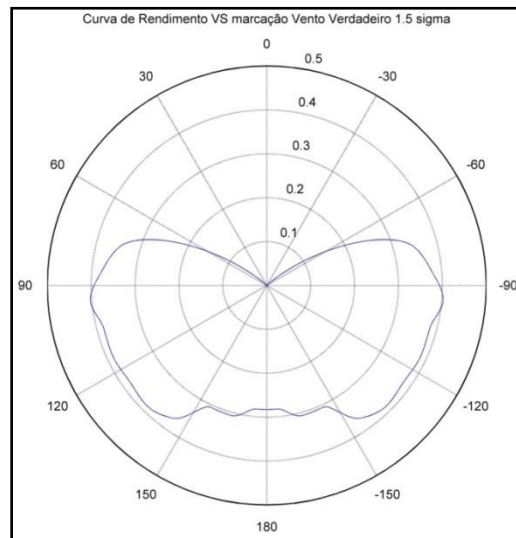


Imagem 8: Rendimento vs Marcação Vento Verdadeiro 1.5σ .

Comparando com a curva de σ :

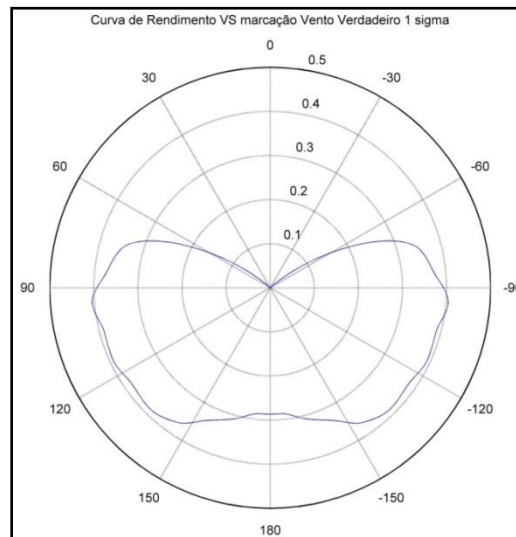


Imagem 9: Rendimento vs Marcação Vento Verdadeiro σ .

Como é possível constatar as diferenças não são grandes, com exceção talvez dos sectores de ré. Ainda assim, a diferença nesta zona não chega a ser de 0,001, o que é insignificante. As diferenças são assim de uma ordem de grandeza tão pequena que é



Otimização de rotas ao campo sinóptico do vento. Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

preferível dar primazia à robustez do ensaio usando um maior número de dados, com a distribuição de $1,5\sigma$.

As variações de pequena escala que se observam em torno da curva de rendimento resultam do limitado número de intervalos de marcação adotados, pelo que se procedeu a uma interpolação (cúbica) da solução por forma a aumentar os pontos que descrevem essa mesma curva e assim suavizar a resposta do navio às mudanças de marcação. Assim, para $1,5\sigma$:

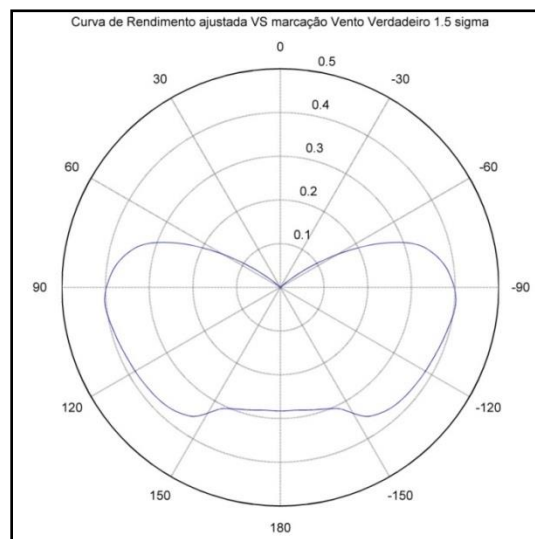


Imagem 10: Rendimento vs Marcação Vento Verdadeiro 1.5σ (ajustada).

Ao analisar a curva chega-se à conclusão que o sector onde o navio retira maior rendimento do vento se situa aproximadamente no intervalo de marcações [85;105]. A título de curiosidade, calcularam-se também os coeficientes de rendimento para as marcações de vento aparente, sem que a estes tenham sido aplicados quaisquer cortes resultantes da utilização do desvio padrão como fator de seleção de dados. A curva que se demonstra a seguir é, desta forma, meramente indicativa:



Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento. Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

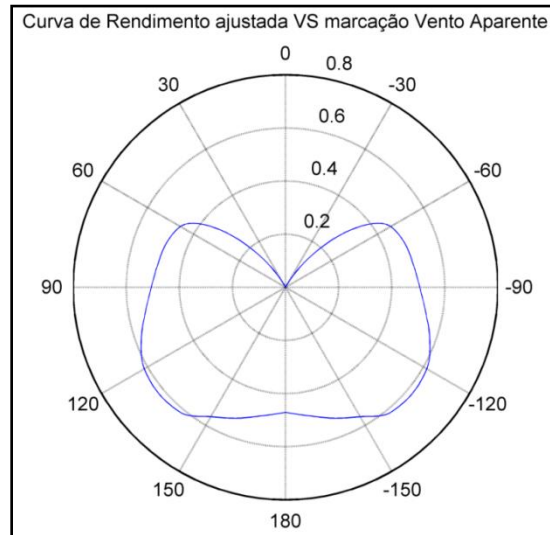


Imagem 11: Rendimento vs Marcação Vento Aparente (ajustada).

As ilações tiradas da análise desta curva vêm corroborar as informações da curva anterior, uma vez que para as marcações mais rentáveis para o vento verdadeiro se deslocam para sectores mais a ré quando transformamos esse impulso em vento relativo.

Esta modelação do navio que irá agora começar a ser testada a fim de garantir a sua veracidade tem, essencialmente, uma forma de ser melhorada: com a recolha de mais observações e aumento de registos criteriosos focados nos parâmetros que podem condicionar o rendimento do navio a navegar.

Pode-se tornar o modelo mais preciso através da criação de intervalos de dados mais pequenos. No limite, deixariam de existir intervalos e passaria a haver coeficientes relativos a cada grau de marcação. No entanto, para que se possa fazer uma análise robusta é necessário que existam dados em número suficiente que proporcionem essa divisão, de forma a que cada análise seja significativa.



4. CONSTRUÇÃO DE UM ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO DE ROTAS

Se no capítulo “2.1. Esquemas de otimização de rota” foram referidos os dois modelos que deram origem à maior parte dos programas de otimização de derrotas utilizados hoje em dia (modelo da cálculo dinâmico de Bellman e o modelo isócrono), não será descabido afirmar que, de alguma forma, o algoritmo que aqui vai ser apresentado tenha também as suas semelhanças com estes modelos, mais especificamente com o de Bellman, na medida em que se trata também ele de um algoritmo dinâmico.

De uma forma clara e concisa, o cálculo dinâmico pode ser definido como uma forma de resolver problemas de otimização recorrendo à utilização de resultados parciais (quer eles sejam ótimos locais ou não) a fim de obter, com a junção de todos estes resultados, um output final que seja um ótimo global.

Matematicamente, estando na presença de um conjunto de pontos z_0, z_1, \dots, z_f espalhados ao longo de uma trajetória a percorrer, recorre-se ao cálculo sequencial das funções que nos dão, por exemplo, o tempo intercalar entre estes pontos $t(z_k, z_{k+1})$ e, por fim, escolhe-se a trajetória que minimiza a integração da solução do ponto de partida ao ponto de chegada.

Ou seja, de forma progressiva, à medida que os pontos vão sendo percorridos no espaço, a função irá escolher os semi-percursos entre pontos que melhor se adaptam ao objetivo de minimizar o tempo total de viagem.

Ainda que, como já foi referido, uma otimização meteorológica possa visar vários objetivos, para o efeito desta tese é necessário referir que o algoritmo até agora desenvolvido minimiza somente o tempo de viagem entre dois pontos selecionados no espaço. Além deste aspeto, também como referido no capítulo “3.1.2.2. Análise dos dados”, a agitação marítima e a corrente não são tidas em linha de conta neste algoritmo.

Um outro fator que não será levado em consideração é a possibilidade de se restringir o percurso de determinado roteamento em função de algum obstáculo existente. Se para escalas espaciais mais reduzidas (um porto, por exemplo) este fator será preponderante (LINDBERG, 2003), para aquilo que é o objetivo deste trabalho



(roteamentos de média e longa duração) essa restrição não se coloca. E senão veja-se a título de exemplo: numa travessia direta Lisboa-Nova Iorque, poder-se-ia considerar as ilhas dos Açores como um obstáculo. A verdade é que mesmo numa travessia desta duração faria mais sentido fazer dois roteamentos diferentes: o primeiro com partida de Lisboa e chegada aos Açores e o segundo com partida destas ilhas e chegada a Nova Iorque, não havendo necessidade de limitar o programa neste aspeto.

4.1. Conceito da otimização do rendimento

Estando já na posse dos coeficientes de rendimento do objeto de estudo em função da marcação do vento, torna-se necessário explicar como é que estes irão ter influência na otimização do roteamento.

Assim, com o intuito de minimizar o tempo de viagem, é perceptível que tal só será praticável recorrendo, sempre que possível, às melhores prestações do navio em função do vento presente na área. O mesmo é dizer que, tendencialmente, o algoritmo irá sempre procurar o melhor rendimento para cada situação.

Os dados de partida do modelo constituem por um lado o campo de ventos, na região que engloba o ponto de partida e ponto de chegada, assim como a curva polar de rendimento do navio ao qual se pretende otimizar a trajetória.

Assim sendo, se for considerado o caso mais simples, em que se apresenta um ponto de partida e um ponto de chegada e entre esses pontos o vento for constante, sabendo qual a direção que liga esses mesmos pontos é possível definir conceptualmente o modo como a otimização do rendimento irá funcionar, através do seguinte ciclo:

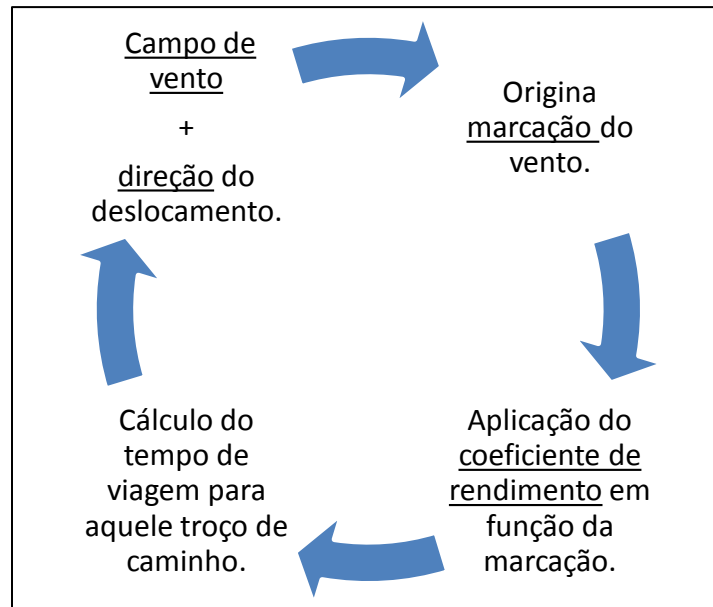


Imagem 12: Ciclo de construção da base de dados do algoritmo.

Veja-se agora o exemplo seguinte: para uma grelha de 3x3 (a verde estão representados os trajetos iniciais possíveis e a vermelho o vento (constante, neste caso), se a intenção for ir do ponto A2 para o ponto C2 ao iniciar em o trajeto o algoritmo de otimização terá três caminhos possíveis, assim:

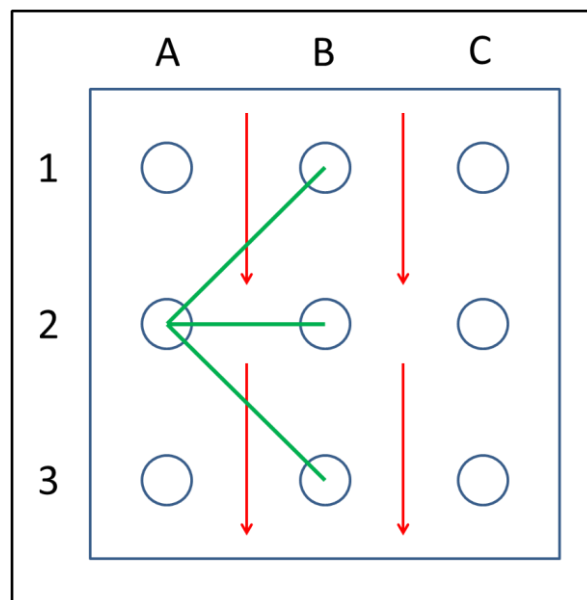


Imagem 13: Exemplo de uma grelha de 3x3 pontos.



Seguindo o esquema anterior, para cada trajeto possível (A2-B1, A2-B2, A2-B3) o algoritmo é agora capaz de calcular o rumo e distância entre pontos, a marcação do vento (em função do vento) e, conseqüentemente, a velocidade do navio (função da marcação do vento) e o tempo que este demora a percorrer o trajeto (função da velocidade e distância). Ao chegar ao novo ponto, o ciclo recomeça. Importa dizer que, tendo definido o sentido da trajetória do ponto A2 para C2, aquando da presença na coluna B, o algoritmo nunca irá procurar soluções que o devolvam à coluna A, procurando sempre aquelas que o aproximam do seu objetivo final (neste caso, em que se apresentam apenas três colunas, é de fácil constatação que a solução do troço da coluna B para a coluna C será sempre no sentido de ir até ao ponto C2). Desta forma, a otimização do caminho neste caso passaria pelo percurso que, da união do troço da coluna A para a coluna B e desta para a colina C trouxesse a maior vantagem (dependendo do que se quer otimizar: distância, velocidade, tempo).

Uma otimização da derrota que use este conceito irá ter tantos pontos quantos aqueles que forem possíveis para a resolução do sistema. Visto que na passagem para cada novo ponto o algoritmo irá recomeçar o ciclo, este torna-se assim passível de ser aplicado para qualquer campo de ventos, mesmo um que não seja uniforme.

4.2. O algoritmo

No capítulo anterior foi já definido o conceito de roteamento que este programa utiliza. É então chegada a hora de apresentar a forma como o algoritmo foi concebido.

Antes de se começarem a especificar os vários aspetos que deram origem ao projeto, convém referir que o algoritmo foi desenvolvido tendo por base a linguagem de programação MATLAB R2012a e que, para efeitos de teste, foi definido que se iria trabalhar (a título de exemplo) na otimização de uma derrota entre a Ilha Terceira (nos Açores) e Lisboa.



Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento. Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

O sistema de otimização toma em consideração então uma análise multivariada de cinco parâmetros (os quais são condicionantes do andamento de qualquer veleiro), a saber:

- O rumo do navio;
- A distância a percorrer;
- O vento (decomposto nas suas vertentes de direção e intensidade);
- A marcação do vento (que, para este caso, será o vento verdadeiro);
- O rendimento do navio nas marcações possíveis;

Tendo presentes estes aspetos, o primeiro passo de elaboração do programa passou por obter uma ferramenta que fosse capaz de gerar campos de vento aleatórios, para que desta forma pudessem ser colocadas à prova diferentes situações (favoráveis e desfavoráveis) do campo sinóptico do vento e, desta forma, perceber se o algoritmo chegava a uma solução coerente face ao comportamento do navio. Para tal foi adaptado um *código* já existente na base de dados comum do *Matlab* (de nome “*make_wind_fun*”, apresentado no sub-anexo B3), o qual tem precisamente a capacidade de gerar um campo de ventos aleatório a partir da variação suavizada e aleatória de uma matriz bidimensional (controlada por um número inteiro introduzido pelo utilizador). Como resultado obtém-se um campo de vento com variações em intensidade e direção sem descontinuidades nem variações bruscas. Nesta adaptação é ainda possível definir o valor máximo possível do vento, através de um coeficiente também introduzido manualmente pelo utilizador, bem como a região do globo a que este campo diz respeito e a sua resolução espacial.

Tendo o campo gerado, já no *script* do algoritmo de otimização em si foi necessário converter (calcular) as componentes *u* e *v* do vento para que estas correspondessem à sua direção e intensidade. Desta forma, temos que a direção do vento é dada por:



$$D_{wind} = mod\left(\left(atan2(W_x, W_y) \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right)\right), 360\right)$$

Pode causar estranheza nesta equação o facto de a componente em x ser colocada como numerador e não como denominador como seria de esperar, mas essa situação é justificada pelo facto de a direção do vento ser referente ao sítio de onde este vem e não para onde este vai.

Quanto à intensidade do vento, esta é dada recorrendo simplesmente ao teorema de Pitágoras, através da fórmula:

$$M_{wind} = \sqrt{(W_x)^2 + (W_y)^2}$$

Para mais fácil visualização do campo de ventos obtido, este é depois graficado recorrendo às funções *quiver* e *colormap*, as quais irão, respetivamente, desenhar o campo de ventos com setas indicadoras da direção do vento (sendo estas também maiores ou menores conforme a sua intensidade) e atribuir uma escala de cores de acordo com a intensidade do vento.

Tendo as componentes do vento devidamente calculadas, é possível iniciar a elaboração do algoritmo. Voltando a aplicar o conceito demonstrado no capítulo anterior (mas desta vez com matrizes muito maiores que o exemplo de 3x3), é agora definido que os cálculos efetuados entre pontos irão constituir uma base de dados que servirá de suporte à decisão de qual das rotas possíveis irá ser utilizada. É de relembrar uma vez mais que estes cálculos são apenas efetuados para os pontos adjacentes e que representem um avanço em direção ao objetivo final.

Serão agora representadas as equações que definem os valores da distância percorrida, do rumo do navio, direção do vento, intensidade do vento, marcação do vento, velocidade do navio e tempo de viagem. No caso da equação que traduz a velocidade do navio esta tem algumas *nuances*, as quais serão expostas depois de apresentadas todas as equações.



Distância percorrida entre pontos:

$$C(j, i, k) = \left(\sqrt{((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2)} \right) * 60$$

Rumo entre pontos:

$$D(j, i, k) = \text{mod}(\text{mod}\left(450 - \left(\text{atan2}((y_2 - y_1), (x_2 - x_1)) * \left(\frac{180}{\pi}\right), 360\right), 360\right), 360)$$

Direção do vento:

$$Z(j, i, k) = \text{mod}(D_{\text{wind}}(j, i) - 180, 360)$$

Velocidade do vento:

$$W(j, i, k) = M_{\text{wind}}(j, i)$$

Marcação do vento:

$$M(j, i, k) = \text{abs}(180 - \text{abs}(Z(j, i, k) - \text{mod}(D(j, i, k) + 180, 360)))$$

Velocidade do navio:

$$V(j, i, k) = M_{\text{wind}}(j, i) * R(j, i, k)$$

Em que se:

$$V(j, i, k) < 5$$



Então:

$$V(j, i, k) = BOAT_SPEED$$

Tempo percorrido:

$$T(j, i, k) = \left(\frac{C(j, i, k)}{V(j, i, k)} \right)$$

No caso da velocidade do navio, apresenta-se uma variável denominada $R(j, i, k)$, a qual se refere aos diferentes rendimentos do navio, em função da marcação do vento. Na prática, esta variável é utilizada segundo condições “ if ”, que após o cálculo da marcação, de ponto para ponto, aplica o respetivo rendimento do navio para estimar a velocidade do navio imposta pela intensidade do vento local. Por outro lado, existe ainda uma condição imposta na velocidade do navio a qual, como havia já sido referido, implementa uma velocidade mínima para qual o navio se desloque à vela. Neste caso essa velocidade é também imposta pelo utilizador através da variável $BOAT_SPEED$, definida por defeito como 5 nós, podendo o utilizador alterar este valor de acordo com a velocidade mínima que pretenda que o navio faça. Para efeitos de estudo, para cada campo de vento, foram calculadas as hipóteses que fazem variar a velocidade introduzida pelo utilizador entre zero e cinco nós, tendo-se obtido soluções interessantes, que serão expostas no capítulo seguinte.

Com o cálculo destes valores para todos os pontos do campo da grelha do campo de ventos, é legítimo dizer que a base de dados sobre o campo está construída. Assim sendo, é agora necessário testar estes valores ao longo dos caminhos possíveis entre o ponto de partida e o ponto de chegada. Para tal foi desenvolvido um terceiro *código* (“*gen_function_path*”), o qual tem por objetivo gerar uma série de funções sinusoidais centradas na linha base que liga as duas extremidades da rota. Estes modos sinusoidais, de alguma forma, acabam por conseguir simular os trajetos mais prováveis que podem ser



Otimização de rotas ao campo sinóptico do vento.
Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

escolhidos, uma vez que reproduzem as variações espaciais possíveis em torno da rota base.

Foram definidas seis funções diferentes ($sen(\pi)$) e ($-sen(\pi)$), ($sen(2\pi)$) e ($-sen(2\pi)$) e ($sen(4\pi)$) e ($-sen(4\pi)$)), as quais se expõem em seguida:

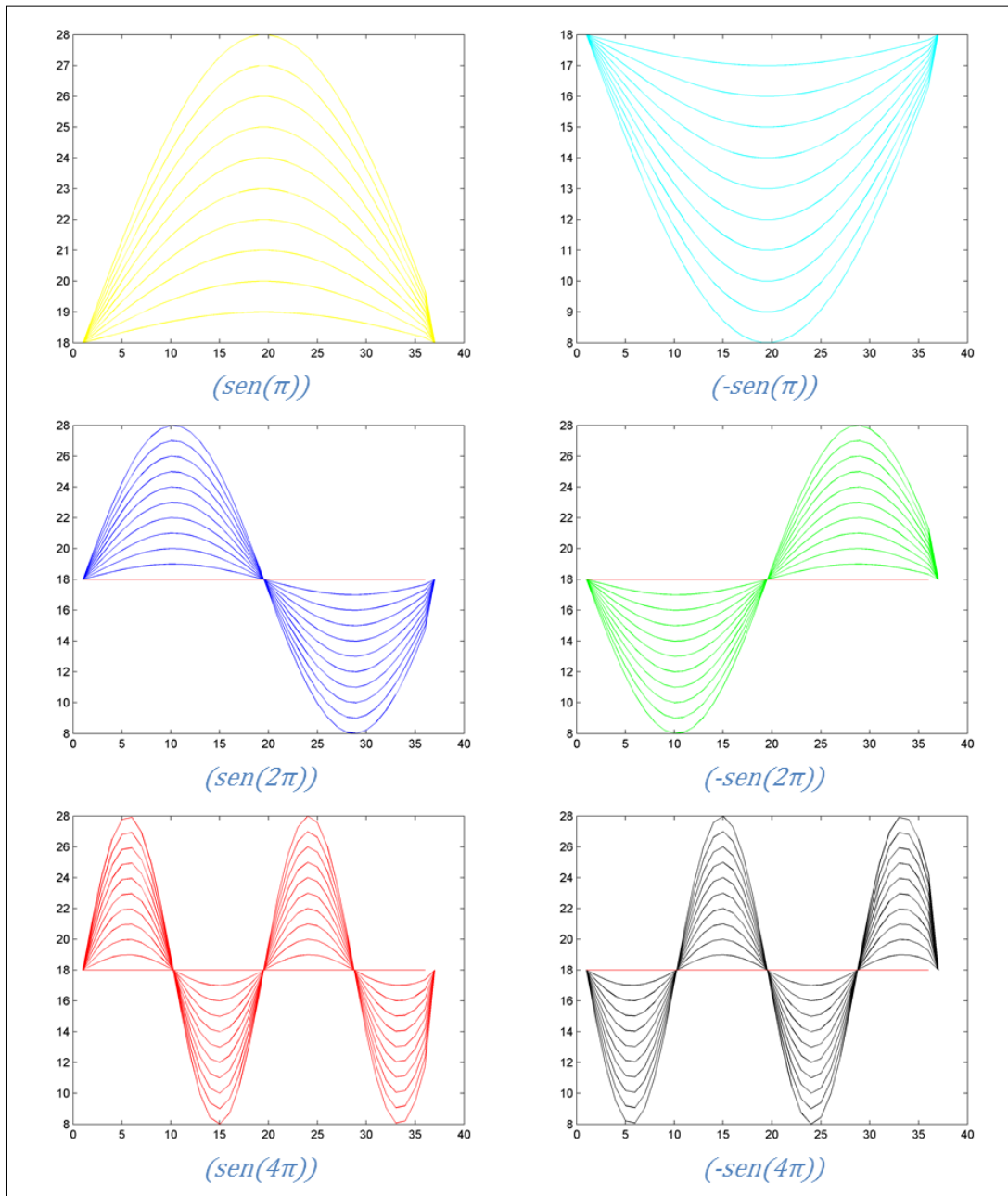


Imagem 14: Funções utilizadas na procura de rotas.



Desta forma, são calculadas as possíveis derrotas sobre as quais o algoritmo irá correr e minimizar o seu tempo de percurso. Uma vez que o algoritmo calculou de início a base de dados resultante da análise multivariada, o modelo chega rapidamente à solução intercetando esta com os trajetos em avaliação. Desta análise, o algoritmo irá, por fim, devolver a derrota que demore o menor tempo de viagem entre os pontos selecionados.

4.3. Soluções

Se no capítulo anterior foi explicado o funcionamento do algoritmo, é pertinente que se faça uma demonstração de alguns resultados obtidos.

Seguindo então os passos do algoritmo, a primeira a coisa a fazer será introduzir um número inteiro para que seja gerado um campo de vento aleatório. Quanto à velocidade mínima do navio, no primeiro exemplo que vai ser apresentado far-se-á uma demonstração de seis velocidades diferentes (0, 1, 2, 3, 4 e 5 nós). Depois deste exemplo apresentar-se-ão mais três soluções para campos de vento distintos, apenas para os 5 nós de velocidade mínima do navio, por ser uma assunção plausível daquilo que é praticado a bordo do N.R.P. “Sagres”.

Uma das constatações a que se chegou é que, porventura, quando o algoritmo assume esta velocidade mínima (seja ela qual for), este ainda não têm em consideração a direção e intensidade do vento que se faz sentir nesse local. Este facto é importante nos casos em que o algoritmo devolve uma derrota onde existem troços com ventos de proa muito intensos. Nestes casos, ainda que se assuma uma velocidade mínima de 5 nós, o navio poderá não conseguir cumprir com esta determinação (p.e.: se estiverem 40 nós de proa, o navio dificilmente conseguirá ter uma velocidade verdadeira de 5 nós). Nos exemplos seguintes, quando se apresenta o tempo percorrido em cima da linha base, este poderá não ser real, na medida em poderá ter troços com as características agora apresentadas.



É também de relembrar que os campos de vento que serão apresentados são gerados de forma aleatórios e, portanto, podem não corresponder a sistemas meteorológicos típicos da região.

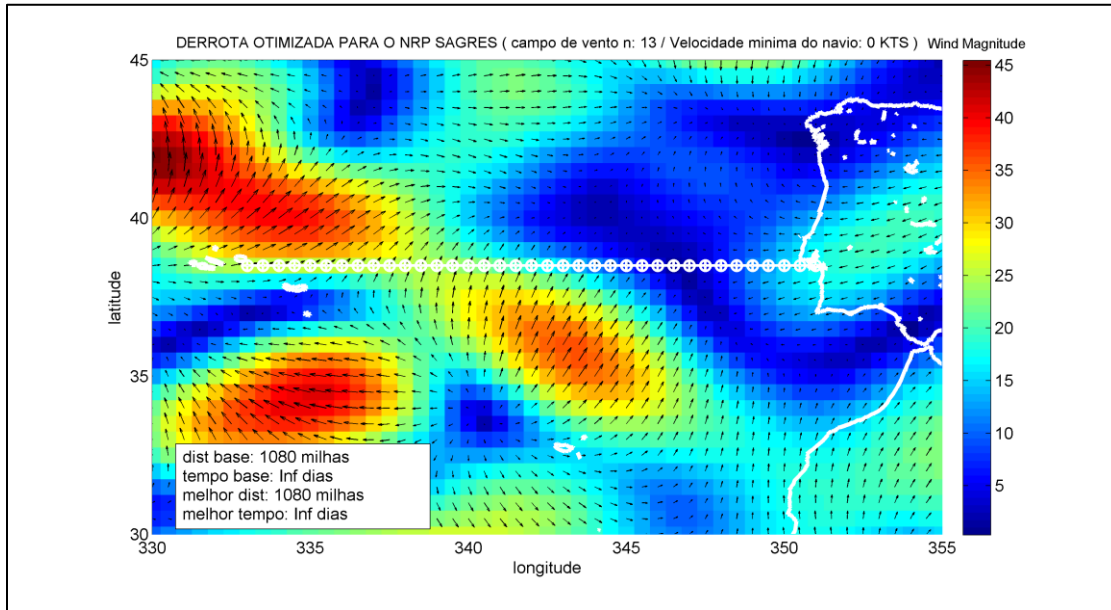


Imagem 15: Derrota otimizada (campo de vento nº13/velocidade mínima 0 nós)

Neste primeiro exemplo, com um campo de ventos que começa por ser de W, rondando depois a S e, por fim, a E, constata-se que se não for introduzida uma velocidade mínima para o navio, não existe uma solução possível (o tempo, tal como se pode ver na legenda, é infinito).



Otimização de rotas ao campo sinóptico do vento. Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

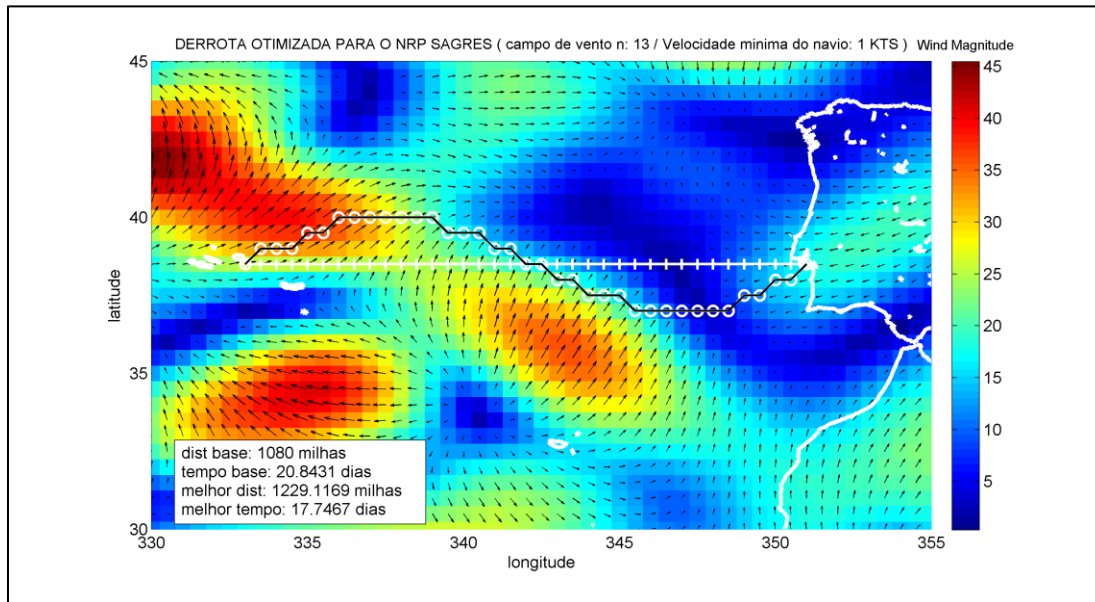


Imagem 16: Derrota otimizada (campo de vento nº13/velocidade mínima 1 nó)

No passo seguinte, ao ter como velocidade mínima um nó, é notório que o algoritmo começa já a procurar as melhores soluções de derrota em função das marcações do vento. Ainda que a distância base sejam 1080 milhas e a distância projetada pelo algoritmo sejam 1229, existe uma variação de menos três dias na solução encontrada pelo programa, face ao tempo base.

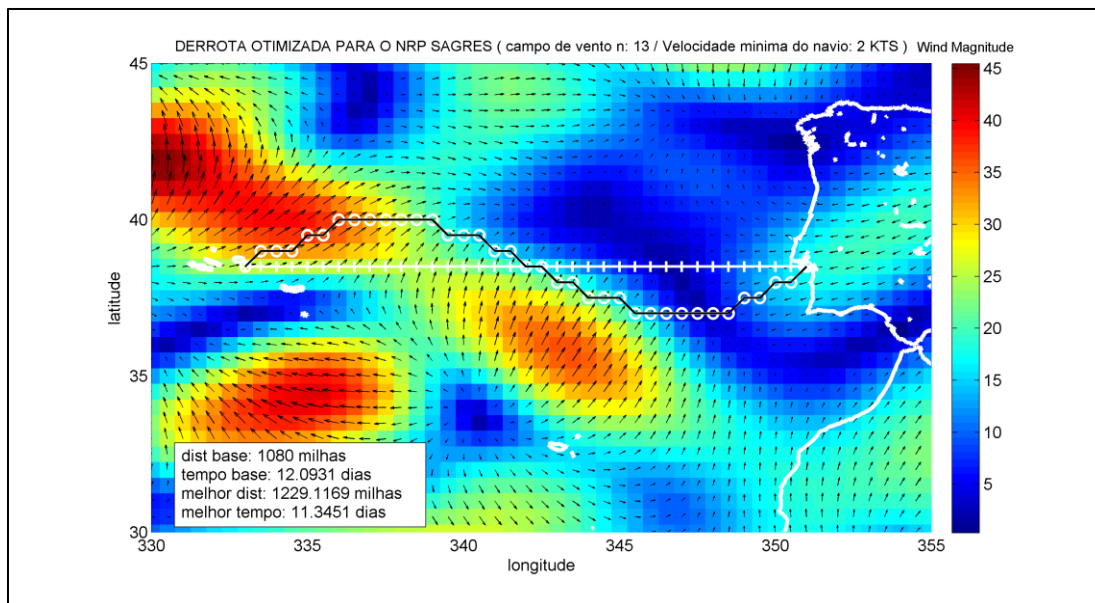


Imagem 17: Derrota otimizada (campo de vento nº13/velocidade mínima 2 nós)



Otimização de rotas ao campo sinóptico do vento. Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

À medida que se vai aumentando a velocidade mínima do navio, também o tempo de viagem começa a reduzir rapidamente. No entanto, para este caso, o tempo otimizado e o tempo base acabam também por ir convergindo com o aumento da velocidade mínima.

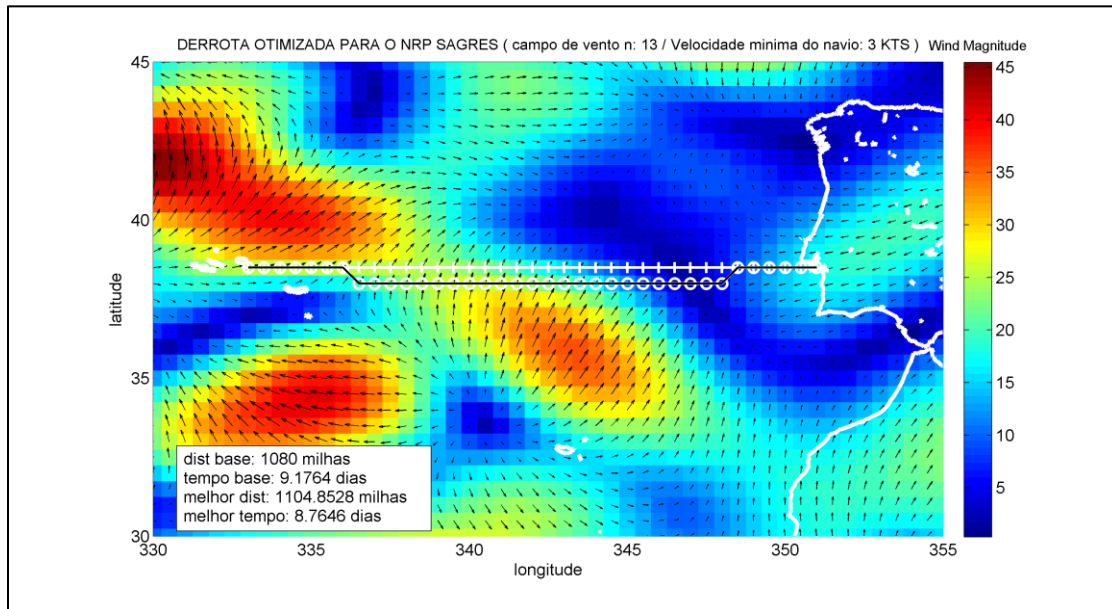


Imagem 18: Derrota otimizada (campo de vento nº13/velocidade mínima 3 nós)

Como constatado, os tempos base e otimizado continuam a convergir para um valor cada vez mais parecido devido à mudança de rota. Neste novo percurso, ainda que se percorram mais 24 milhas, existe um ganho de quase meio dia.



Otimização de rotas ao campo sinóptico do vento. Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

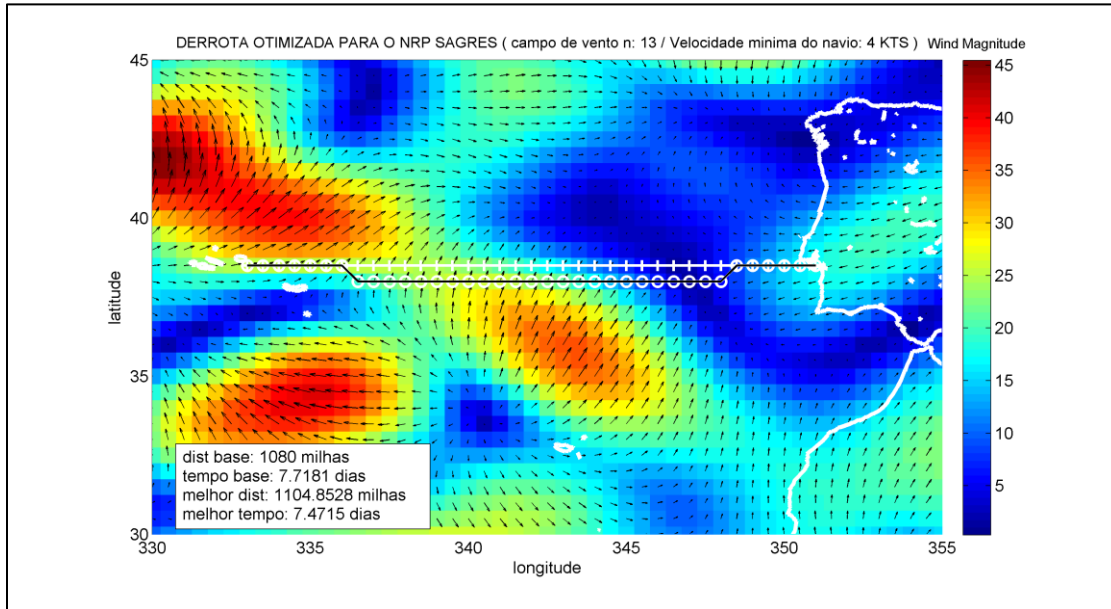


Imagem 19: Derrota otimizada (campo de vento nº13/velocidade mínima 4 nós)

Nestes dois últimos exemplos, com as velocidades mínimas de quatro e cinco nós, os tempos são já muito semelhantes, não se alterando a derrota otimizada.

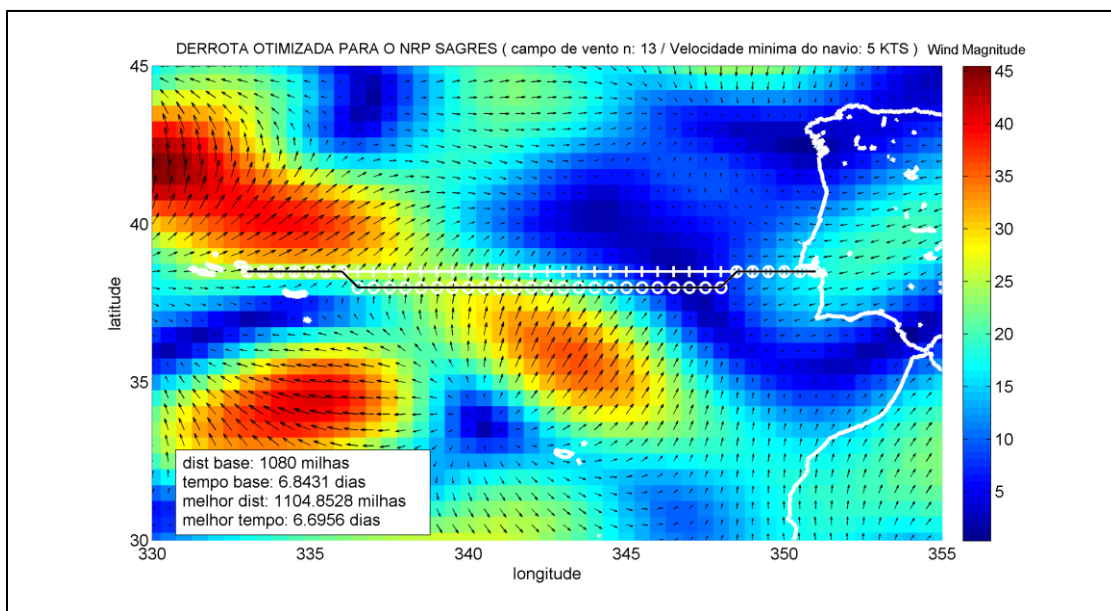


Imagem 20: Derrota otimizada (campo de vento nº13/velocidade mínima 5 nós)



Otimização de rotas ao campo sinóptico do vento. Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

Neste primeiro exemplo (campo de vento nº134) constata-se que, face ao campo de ventos exposto a melhor derrota possível é, efetivamente, a linha base. Com uma velocidade mínima de 5 nós do navio este demoraria cerca de seis dias a fazer o percurso que liga a Ilha Terceira a Lisboa.

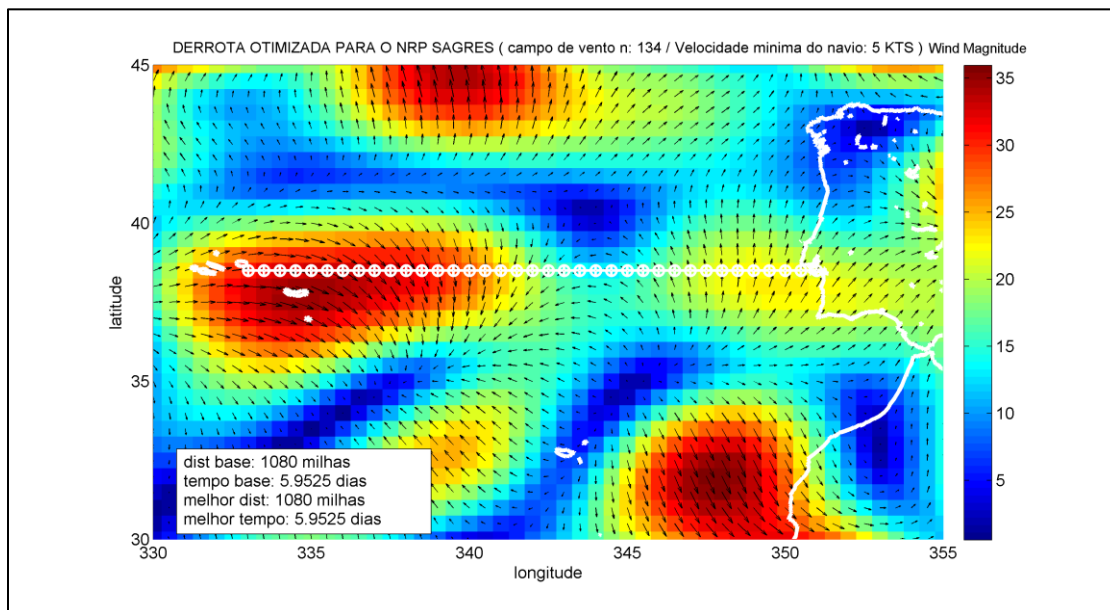


Imagem 21: Derrota otimizada (campo de vento nº134/velocidade mínima 5 nós)

Para os exemplos seguintes (campo de ventos nº 139 e nº 212) é evidente que o algoritmo procura a solução que melhor andamento traz ao navio, mesmo que para isso a diferença de distância seja bastante grande. Estas situações são também exemplos claros do que foi dito no início deste capítulo. Se se reparar, sobre a linha base chegam a incidir ventos contrários na ordem dos 25 nós (campo de ventos nº 139) e dos 15 nós (campo de ventos nº212). Se na segunda situação ainda será possível ao navio cumprir com os 5 nós de velocidade imprimidos pela máquina propulsora e estipulados manualmente no algoritmo, na primeira hipótese talvez já seja difícil que o navio consiga fazer 5 nós de velocidade nessas situações.



Otimização de rotas ao campo sinóptico do vento. Aplicação prática ao N.R.P. "Sagres".

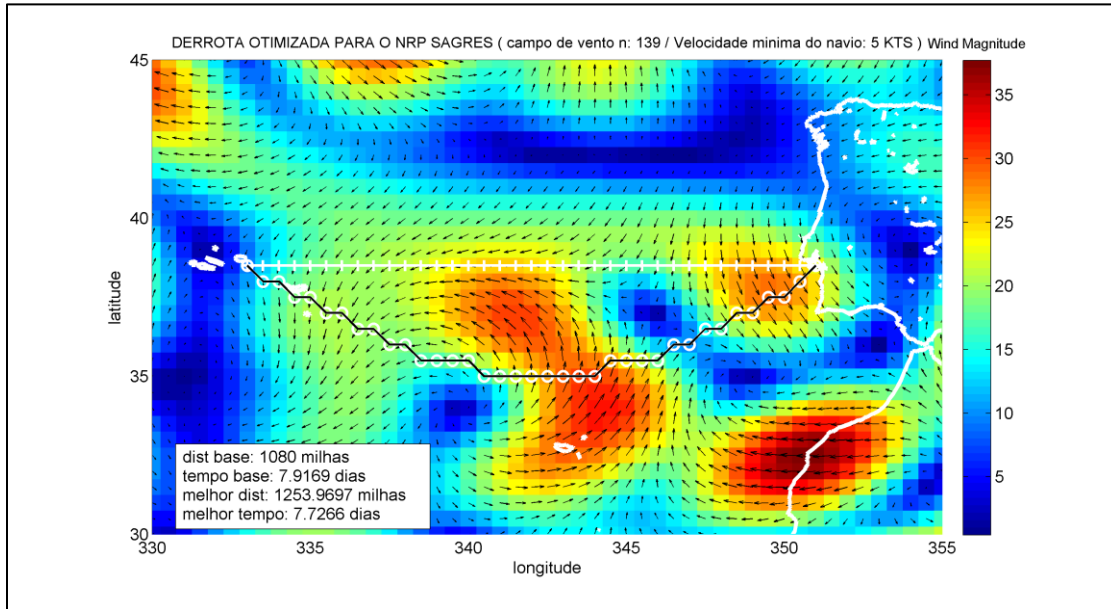


Imagem 22: Derrota otimizada (campo de vento nº139/velocidade mínima 5 nós)

Aquilo que se retira do que foi dito anteriormente é que, provavelmente, o tempo base será superior aquele que está aqui expresso. De qualquer forma é interessante constatar que, uma vez mais, o algoritmo sugere derrotas que, claramente, vão à procura de ventos favoráveis às características da *Sagres*.

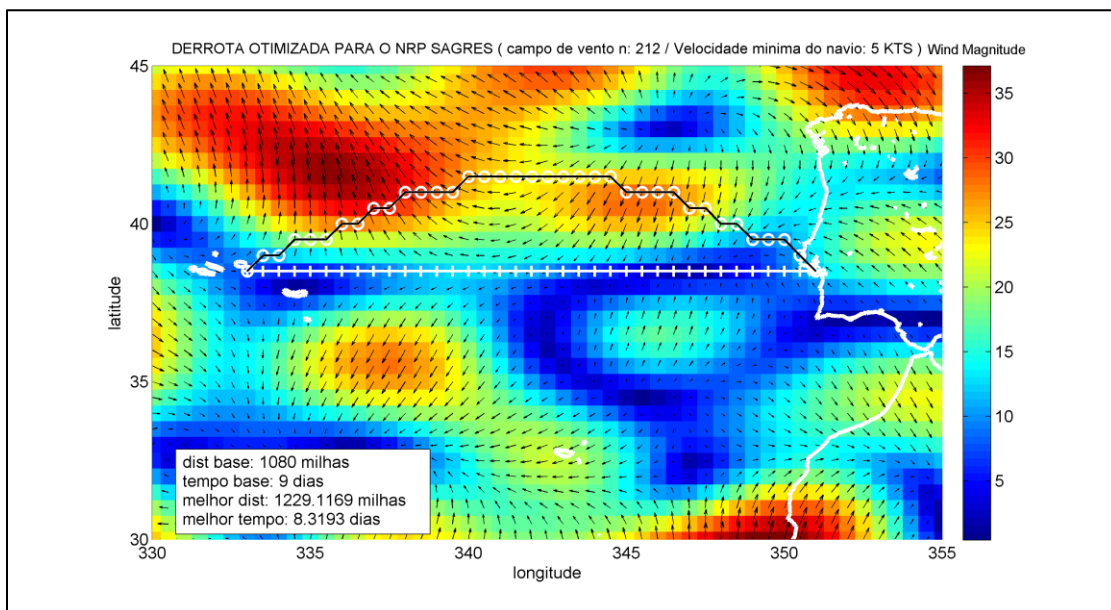


Imagem 23: Derrota otimizada (campo de vento nº212/velocidade mínima 5 nós)



5. RESULTADOS

Nos últimos dois capítulos foi feito um escrutínio cuidado da forma como se tentou alcançar os principais objetivos deste trabalho que, em linhas gerais, podem ser lembrados como sendo eles:

- a construção de um algoritmo de otimização de rotas capaz de vir no futuro a ser implementando nas ferramentas METOC desenvolvidas pelo IH;
- a parametrização do N.R.P. “Sagres” enquanto objeto de estudo, para fins de teste do algoritmo de otimização;

Ainda que a implementação das previsões do METOCMIL no algoritmo fizessem parte do objetivo principal, tal não se veio a constatar. Ainda assim, foi possível com a geração de campos de vento artificiais fazer testes suficientes ao programa capazes de conferir segurança a resultados futuros, aquando da adaptação do algoritmo aquela ferramenta de previsão meteorológica.

Mas se por um lado aquilo que realmente se esperava verificar neste trabalho era a capacidade do algoritmo gerar as tais derrotas otimizadas face a uma previsão meteorológica, pelo outro esses resultados seriam vagos de sentido se não apresentassem um exemplo concreto, pelo que a avaliação dos resultados obtidos neste trabalho não deve ser feita apenas para o algoritmo de otimização, mas também para a parametrização das qualidades náuticas da Sagres em função do campo de vento presente.

Ainda que essencial, a análise que foi feita da barca não tem forma de ser testada senão com a prática. Desta forma, com o intuito de melhorar possíveis versões futuras deste algoritmo, os resultados obtidos na parametrização deverão ser alvo de uma análise cuidada aquando das futuras navegações do navio, para que se possa perceber até que ponto são ou não fiáveis. Seria certamente interessante comparar estes resultados com



Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento. Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

outros de navios semelhantes à Sagres. Talvez, num futuro encontro de grandes veleiros, tal venha a ser possível.

Quanto ao algoritmo de otimização em si existem algumas formas de avaliar os resultados obtidos. A primeira é, obviamente, com a prática. A possibilidade de testar este programa numa futura navegação da Sagres poderia trazer conclusões não só sobre o algoritmo mas também sobre os coeficientes de rendimento do navio.

A segunda forma seria através da utilização de outro objeto de estudo. Tendo os coeficiente de rendimento de um outro navio e aplicando-os ao algoritmo, seria também interessante conferir os resultados, pois ainda que com diferentes coeficientes para o mesmo campo de vento as velocidades sejam obviamente diferentes, talvez aconteça mesmo a situação em que o algoritmo sugira diferentes derrotas em função do mesmo campo de ventos.

Por fim, seria também um bom método de avaliar o algoritmo se fosse possível compará-lo com outro programa de otimização de rotas. No entanto, esta possibilidade é bastante mais complicada, na medida em que seria necessário adaptar esse outro programa às características da Sagres.

Ainda assim, daquilo que foi possível constatar das diversas vezes que o programa foi corrido, é que este poderá vir a fornecer uma boa ajuda nos futuros roteamentos do N.R.P. “Sagres”. No entanto, e para que tal aconteça de forma mais correta, foi já identificada uma alteração que deverá ser feita no algoritmo, a qual se prende com o facto de este apenas correr campos de vento sinópticos e não com variações temporais deste campo. Com esta modificação e com a introdução de campos de vento gerados pelo METOCMIL esta aplicação ficará praticamente capaz de começar a ser utilizada operacionalmente aquando das navegações do N.R.P. “Sagres”.



5.1. Investigação futura

Da mesma forma que foram delineados dois objetivos para este trabalho, será também razoável que se definam duas vertentes de investigação futura: por um lado, a parametrização do navio e, por outro, o desenvolvimento do algoritmo.

Se inicialmente o objetivo passava por abordar dois navios totalmente diferentes (uma fragata da classe Bartolomeu Dias e o N.R.P. “Sagres”), após a constatação da necessidade de possuir as características de cada um destes navios a ideia alterou-se para utilizar como modelo unicamente o N.R.P. “Sagres”. Assim sendo, poderá ser interessante, para efeitos de estudos futuros, a construção de um conjunto de curvas polares de rendimento para uma fragata a fim de se começarem a aplicar otimizações de roteamento a outros navios da Marinha.

Sobre a parametrização da Sagres e do rendimento do seu andamento existem duas questões que podem ser desenvolvidas numa fase posterior e que certamente tornariam este estudo mais robusto. A primeira é a recolha de mais dados e a segunda a modelação do navio (nas suas vertentes hidro e aerodinâmicas, como explicado no capítulo “3.1.1. Curvas Polares”).

A recolha de mais dados (tal como referido no capítulo “3.1.3. Curvas de rendimento”) é a forma mais imediata de tornar as curvas de rendimento mais reais. Dados que sejam recolhidos com as especificações necessárias podem ser automaticamente vertidos nos gráficos de dispersão. Idealmente até, com o aumento do volume de dados, os intervalos de marcações poderão ser diminuídos (e, no limite, deixarão até de haver intervalos, passando a ser coeficientes individuais para cada grau de marcação de vento), aumentando assim a precisão da parametrização. Por outro lado, a recolha de novos dados pode ser feita com mais informação, nomeadamente a agitação marítima e a proa do navio. Com estes novos campos poderá ser possível tentar uma parametrização do navio também face às condições de mar, o que associado depois à introdução de campos de ondas no algoritmo tornará o modelo de otimização mais real e preciso.



Mas se a recolha de dados é relativamente simples (contando com as navegações que o navio virá a fazer no futuro) e não tem custos associados, a modelação do mesmo é sobremaneira mais complexa e dispendiosa. A complexidade advém do facto de ser necessário grande precisão para que se possa modelar fidedignamente tanto o casco como o velame do navio. Já o custo está associado não só à construção dos modelos em si, mas sobretudo aos bancos de testes necessários para os seus ensaios: um tanque para a vertente hidrodinâmica e um túnel de vento para a componente aerodinâmica. Estas dificuldades não são, logicamente, facilmente ultrapassáveis. No entanto, a construção de um modelo fidedigno resolveria de uma vez só os problemas associados aos erros existentes derivados da associação das marcações em diferentes intervalos.

No que concerne o aproveitamento do algoritmo, este sairia bastante beneficiado se fossem contempladas duas modificações internas e uma outra externa.

Por ser aquele que tem mais pertinência, começar-se-á pelo melhoramento externo. Tal como foi dito no anteriormente, ainda que o principal objetivo deste trabalho passasse por fazer a integração das capacidades do METOCMIL numa ferramenta capaz de otimizar derrotas, os campos de vento utilizados neste projeto acabaram por não ser aqueles que são previstos por aquele programa. Esta lacuna deveu-se, sobretudo, à escassez do tempo para implementar ainda mais esta função. Com a capacidade (e facilidade) da função “make_wind_fun” criar novos campos de vento que pudessem pôr à prova o algoritmo, essa necessidade acabou também por não ser sentida, sendo assim deixada para segundo plano. Desta forma, é um objetivo que, num futuro próximo, seja feita a alteração capaz de fazer correr campos de vento realmente previstos por esta aplicação. Idealmente até, este programa irá passar a estar integrado no METOCMIL Light View, passando-se a fazer o roteamento diretamente nesta aplicação.

Já quanto à primeira melhoria interna esta visa uma adaptação do programa que lhe permita passar a fazer os cálculos de campos de vento com variações temporais e não apenas com campos de vento sinópticos. Por outras palavras: neste momento o programa corre apenas um campo de vento. No entanto, para o exemplo apresentado (travessia Açores-Lisboa), a viagem tem uma duração de, na melhor das hipóteses, seis dias. Tendo



uma previsão sinóptica uma validade máxima de seis horas, ao fim desse tempo de viagem, o programa deveria utilizar um outro campo de ventos (pois, ainda que o campo se possa manter muito parecido ao último, sofre sempre algumas alterações). Poder-se-á colocar a questão de como se deve proceder para viagens maiores que seis dias (pois a partir desta altura as previsões deixam de ser fiáveis). Uma possível resposta poderá passar por “partir” o roteamento, colocando-lhe *waypoints* distribuídos pela linha base.

Por fim, o último aperfeiçoamento constatado de que o programa poderá ser alvo reside no aumento da base de dados de possíveis soluções. Como foi visto anteriormente, o número de trajetos possível sobre os quais o programa irá procurar a derrota otimizada é limitado. A base de dados poderá assim ser aumentada de duas formas possíveis: através do aumento do número das funções geradoras de trajetórias diferentes ou através da combinação destas funções/soluções. Esta última sugestão seria aquela que seria mais proveitosa, na medida em que traria um número praticamente ilimitado de hipóteses a serem testadas.

5.2. Nota final

Num trabalho que visa uma análise multivariada seria estranho chegar ao fim do mesmo com um desfecho certo, indubitável. Se essa análise corresponder a uma otimização, então os resultados poderão ser ainda mais questionados, na medida em que aquilo que será certo para uns, não estará de acordo com as expectativas de outros.

Ainda assim, e da mesma forma que todos os caminhos se iniciam com o primeiro passo, a intenção principal deste projeto é lançar as fundações para trabalhos subsequentes nesta área da otimização de derrotas, quer estas sejam de veleiros ou não.

Seja como for, é da opinião do autor deste trabalho que os resultados alcançados são bastante satisfatórios, não só por aparentarem uma aproximação da realidade bastante interessante, mas sobretudo por, na sua generalidade, poderem vir a ter uma aplicação prática de relevante interesse para a Marinha, mais especificamente, para o N.R.P. “Sagres”.



*Que importa dar a um piloto a descrição do que é a sua vida?
Pensa nisso e toma a tua decisão.*

Ahmad ibn-Mãdjid, in Roteiro de Sofala



BIBLIOGRAFIA

- AKAL, Tuncay. “Developing Rapid Environmental Assessment ar NURC”, in *Oceanography*, Volume 21, Number 2, EUA, 2008.
- ALLSOPP, Toby, et al. *Optimal Sailing Routes with Uncertain Weather*, Universidade de Auckland, Nova Zelândia, Janeiro de 2000, <http://www.orsnz.org.nz/conf35/papers/AndrewMasonAndy.pdf>, consultado em outubro de 2013.
- BOWDITCH, Nathaniel. *The American Practical Navigator – an epitome of navigation*, Bethesda, Maryland, EUA, 2002, edição do bicentenário.
- BROCHADO, Costa. *O piloto Árabe de Vasco da Gama*, Lisboa, Janeiro de 1959, edição da Comissão Executiva das Comemorações do V Centenário da Morte do Infante D. Henrique.
- CALVERT, Simon. *Optimal Weather Routeing Procedures For Vessels On Trans-Oceanic Voyages*, Polytechnic South West, Plymouth, Março de 1990, http://pearl.plymouth.ac.uk/pearl_jspui/bitstream/10026.1/576/4/237513.pdf, consultado em Outubro de 2013.
- CAMPBELL, C. “A comparison of downwind sail coefficients from tests in different wind tunnels”, Lorient, France, Junho de 2013, in *The Third International Conference on Innovation in High Performance Sailing Yachts*.
- CHEN, Henry. *Voyage Optimization Supercedes Weather Routing*, [s.l.], [s.d.], http://ww1.jeppesen.com/documents/marine/commercial/white-papers/Voyage_Optimization_Supercedes_Weather_Routing.pdf, consultado em outubro de 2013.
- _____, Henry. *Weather Routing - a New Approach*, [s.l.], [s.d.], http://ww1.jeppesen.com/documents/marine/commercial/white-papers/Voyage_Optimization_Supercedes_Weather_Routing.pdf, consultado em outubro de 2013.



Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento.
Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

- CHRISTIANSEN, M., et al. “Ship Routing and Scheduling: Status and Perspectives” in *Transportation Science*, Vol. 38, pp. 1-18, 2004.
- CHUMOVSKY, T. A. *Três Roteiros Desconhecidos de Ahmad ibn-Mãdjid*, Lisboa, 1960, edição da Comissão Executiva das Comemorações do V Centenário da Morte do Infante D. Henrique, traduzido pelo Prof. Dr. Myron Malkiel-Jirmounsky.
- CTEN MARRECAS FERREIRA, L. et al. *Sagres – a Escola e os Navios*, Lisboa, 1984, editado pelas Edições Culturais de Marinha.
- DEAKIN, Barry. *Sailing Ship Performance - Correlation of Model Tests With Full Scale*, Wolfson, Reino Unido, 2002, <http://www.wumtia.soton.ac.uk/sites/default/files/RINA2002BD.pdf>, consultado em Outubro de 2013.
- FONSECA, Nuno, et al. “Sailing Characteristics of a Sixteenth Century Portuguese Nau”, in *Iberian Ships Session*, Janeiro de 2006.
- HAGIWARA, Hideki. *Weather Routing Of (Sail-Assisted) Motor Vessels*, University of Mercantile Marine, Tokyo, 1989.
- _____, H., et al. “A Study on Weather Routing of High Speed Ships”, in *FAST’99*, 5th International Conference on Fast Sea Transportation, EUA, Seattle, 1999.
- HARRIES, S., et al. “Pareto Optimal Routing of Ships”, in *International Conference on Ship and Shipping Research · NAV 2003*, Itália, Palermo, Junho de 2003, https://www.friendship-systems.com/downloads/papers/papers2003/FSYS_2003_harries.heimann.hinnenthal_NAV-pareto-optimal-routing-of-ships.pdf, consultado em Outubro de 2013
- _____, S., et al. “Hydrodynamic Modeling of Sailing Yachts” in *The 15th Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis, 2001, https://www.friendship-systems.com/downloads/papers/papers2001/FSYS_2001_harries.abt.hochkirch_hydro-modeling_15.CSYS.pdf, consultado em Outubro de 2013.
- _____, S., et al. *Systematic Analysis of the Hydrodynamics of Historical Sailing Vessels*, Universidade Técnica de Berlim, Berlim, 2001.



Otimização de rotas ao campo sinóptico do vento.
Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

_____, S. e HINNENTHAL, J. “A Systematic Study on Posing and Solving the Problem of Pareto Optimal Ship Routing”, in 3rd International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries (COMPIT 2004), Siguëza, Espanha, Maio de 2004, https://www.friendship-systems.com/downloads/papers/papers2004/FSYS_2004_hinnenthal.harries_optimization_COMPIT-2004.pdf, consultado em outubro de 13

HINNENTHAL, J. Robust Pareto – Optimum Routing of Ships Utilizing Deterministic and Ensemble Weather Forecasts, Technischen Universität Berlin, Berlin, 2008.

INSTITUTO HIDROGRÁFICO. “Hidromar – Boletim informativo do Instituto Hidrográfico”, N.º 51, Maio 2000.

_____. “Hidromar – Boletim informativo do Instituto Hidrográfico”, N.º 63, Maio 2001.

_____. “Hidromar – Boletim informativo do Instituto Hidrográfico”, N.º 70, Março/Abril 2002.

_____. “Hidromar – Boletim informativo do Instituto Hidrográfico”, N.º 76, Março/Abril 2003.

JAMES, R. W. Application of wave forecasts to marine navigation, Washington, 1957, publicado pelo US Naval Oceanographic Office.

LINDBERG, Mikael. Optimizing Yacht Routes using Dynamic Programming, Lund Institute of Technology, Suécia, Dezembro de 2003, <http://www.control.lth.se/documents/2003/5717.pdf>, consultado em Outubro de 2013.

LYON, Aidan. Why are Normal Distributions Normal?, Department of Philosophy of the University of Maryland, Maryland, Estados Unidos da América, [s.d.].

MALTA, Cíntia Sales. Estudos de Séries Temporais de Vento Utilizando Análises Estatísticas e Agrupamentos de Dados, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, Fevereiro de 2009.

MILLER, M. L. e SPARREBOOM, D. “Weather Routing of Motorsailers”, in 22º HISWA Symposium, Agosto de 2012,



Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento.
Aplicação prática ao N.R.P. “Sagres”.

<http://www.hiswasymposium.com/assets/files/pdf/2012/Leslie-Miller.pdf>,
consultado em Outubro de 2013.

MOTTE, Roger. Ship Based Weather Routing (Using Dynamical Meteorology), Plymouth Polytechnic, Inglaterra, Outubro de 1981.

OLSSON, Maria. Performance Predictions for the East Indiaman Gotheborg, Chalmers University of Technology, Suécia, 2005.

SÁ, Nuno Barros e. “Física elementar da navegação à vela” in Gazeta de Física, Ponta Delgada, Açores, pp. 4-14, 2005.

SEMEDO, Álvaro, et al. “Wave-Induced Wind in the Marine Boundary Layer”, in Journal of the Atmospheric Sciences, vol. 66, pp. 2256-2271, [s.l.], Agosto de 2009, <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2009JAS3018.1>, consultado em Maio de 2013.

SKOGLUND, L. et al. A New Method For Robust Route Optimization In Ensemble Weather Forecasts, Setembro de 2012, <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:608598/FULLTEXT01.pdf>, consultado em outubro de 2013.

WHITEHOUSE, Brian G. et al. “Rapid Environmental Assessment (REA) of the Maritime Battlespace”, in Canadian Military Journal – Spring 2006, pp. 66-68, [s.l.], 2006.

_____, Brian G. et al. “Rapid Environmental Assessment within NATO: Underwater Warfare Programs Fuse Civilian Technologies with Military Architectures to Deliver Oceanographic Products”, in Sea Technology – November 2004, pp. 10-14, [s.l.], 2004.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Guide to Climatological Practices – Third Edition (WMO No.100), [s.l.], [s.d.].