



ESCOLA NAVAL



ta sainte & bief faire

Francisca Teles de Meneses Maurício

Otimização de trajetórias de veleiros, em condições de vento estacionário não uniforme

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na especialidade de Marinha



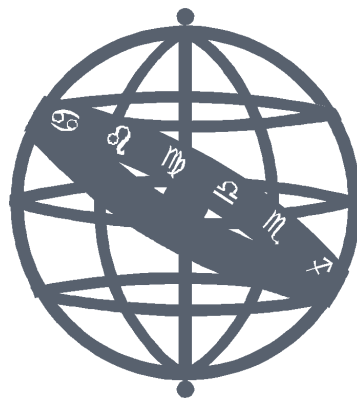
Alfeite

2022



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Francisca Teles de Meneses Maurício

*Otimização de trajetórias de veleiros, em condições de
vento estacionário não uniforme*

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Marinha

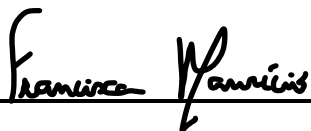
Orientação de: Miguel Ângelo Pereira Bento Moreira

Co-orientação de: Mário Alexandre Pousão da Costa Gatta

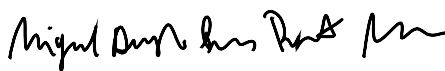
Co-orientação de: Vitor Manuel Rodrigues Viegas

O Aluno Mestrando,

O Orientador,



Francisca Maurício



Prof. Miguel Moreira

Alfeite

2022

Mar, doce lar!

Agradecimentos

É com o maior apreço que agradeço profundamente ao meu orientador Professor Miguel Moreira pela disponibilidade e dedicação prestadas constantemente, pela ajuda e supervisão valiosas na realização deste trabalho, mas principalmente pelo apoio e motivação cruciais ao longo deste percurso académico.

Aos professores Mário Gatta e Vitor Viegas, agradeço o interesse e tempo prestados, bem como todas as sugestões que visaram a melhoria deste trabalho.

Agradeço à minha família, que longe ou perto, sempre me acompanhou no coração ao longo deste percurso.

À Joana, agradeço o valor especial da amizade que nos uniu e nos permitiu apoiar e sorrir lado a lado, nesta caminhada que é a vida.

Por fim, gostaria de prestar um grande agradecimento, a todos os que dedicaram o seu tempo e contribuição preciosos, quer na melhoria deste trabalho, como na preparação da apresentação do mesmo na conferência *MARTECH 2022*.

Resumo

Otimização de trajetórias de veleiros, em condições de vento estacionário não uniforme

Com o intuito de possibilitar um veleiro de navegar o trajeto ótimo, este trabalho consistiu no desenvolvimento de uma técnica heurística de otimização para calcular trajetórias que minimizam o tempo de navegação à vela entre dois pontos, sob campos de velocidade de vento não uniformes. A técnica heurística usada foi o método de simulação do recozimento.

A particularidade deste trabalho prende-se com a não uniformidade espacial do campo de vento, que suscita a necessidade de criar trajetórias que se ajustem às condições mais favoráveis. Estas trajetórias são assim compostas por um conjunto de pernadas que são definidas consoante a distribuição dos pontos de guinada a praticar. Deste modo, a metodologia implementada, designada VSA (Vectorized Simulated Annealing), é inspirada na técnica de simulação do recozimento, e consiste na aplicação de perturbações na localização desses pontos de guinada, gerando diferentes trajetórias aleatórias. Neste trabalho foi também possível, resolver o problema da existência de zonas de terra e de passagem proibida ao longo do trajeto ótimo a praticar, criando caminhos ótimos alternativos. No entanto, o programa não considera os efeitos do estado do mar, correntes, marés e deriva, sendo estes alguns dos objetivos num trabalho futuro.

As simulações numéricas efetuadas confirmam que as aplicações desenvolvidas conseguem aproximar trajetos ótimos de forma eficaz, robusta e credível, sob campos de velocidade de vento não uniformes. A apresentação e discussão destes resultados permite aferir a credibilidade e utilidade desta ferramenta no âmbito da vela autónoma e da vela robótica, principalmente na realização de regatas.

Palavras-chave: Otimização de Trajetórias, Campos de Vento Não Uniforme, Método de Simulação do Recozimento Vetorizado, Heurística

Abstract

Optimization of sailboat routes under non-uniform wind velocity fields

This work consisted in the development of a heuristic optimization technique to calculate routes that minimize the sailing time between two points, under non-uniform wind speed fields, in order to enable a sailboat to navigate the optimal path. The heuristic technique used was the simulated annealing method.

The particularity of this work is related to the spatial non-uniformity of the wind field, which raises the need to create trajectories that adjust to the most favorable conditions. These trajectories are composed of a set of legs that are defined according to the distribution of turning points to be practised. In this way, the methodology implemented, called VSA (Vectorized Simulated Annealing), is inspired by the simulated annealing method, and consists in the application of perturbations in the locations of these yaw points, generating different random paths. In this work it was also possible to solve the problem of the existence of land zones and prohibited passages along the optimal path to be practised, creating alternative optimal paths. However, the program does not consider the effects of sea state, currents, tides and drift, those factors being one of the objectives of future works.

The numerical simulations performed confirm that the developed applications are able to approximate optimal paths efficiently, robustly and credibly, under non-uniform wind speed fields. The presentation and discussion of these results allows us to assess the credibility and usefulness of this tool in the field of autonomous sailing and robotic sailing, mainly in regattas.

Keywords: Optimization of Sailboat Routes, Non-uniform Wind Fields, Vectorized Simulated Annealing, Heuristic

Índice

Prefácio	xxi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	2
2 Estado da Arte	5
2.1 Método das Isócronas	5
2.2 Programação Dinâmica	7
2.3 Redes Neurais	8
2.4 Métodos Heurísticos de Otimização	9
2.4.1 Algoritmos Genéticos(AG)	10
2.4.2 Pesquisa Tabu	11
2.4.3 Método de Simulação do Recozimento	11
2.5 Desenvolvimentos na Marinha Portuguesa	12
3 Apresentação e Estabelecimento do Problema	15
3.1 Caracterização do Problema	15
4 Solução: Formulação e Desenvolvimento	19
4.1 Definição dos Trajetos	20
4.1.1 Diagrama Polar de Velocidade	20
4.1.2 Tempo de Percurso	22
4.1.3 Função de Penalização Temporal	23
4.2 Algoritmo VSA	25
4.2.1 Estratégia de diminuição da perturbação espacial	26
5 Aplicação computacional: Desenvolvimento e apresentação	29
5.1 Aplicação computacional	29
5.2 Generalidades	32
6 Simulações numéricas e discussão	35

6.1	Vento uniforme: Simulações preliminares e penalização temporal . .	36
6.2	Vento não uniforme: robustez da heurística	38
6.3	Campo de velocidade de vento estacionário e não uniforme	42
6.4	Vento não uniforme - presença de massas de terra	44
6.5	Tempo de cálculo	46
7	Conclusões e Trabalho Futuro	49
7.1	Conclusões	49
7.2	Trabalho Futuro	51
	Bibliografia	53
	Apêndices	57
	A Programa otv	57
	B Produção científica precedente	69

Lista de Figuras

2.1	Aplicação inicial do método das isócronas https://routing.luckgrib.com	6
2.2	Trajeto definido com recurso ao método das isócronas https://routing.luckgrib.com	7
2.3	Rede Neuronal Biológica e Rede Neuronal Artificial	9
2.4	Processo metalúrgico reproduzido pelo SA	11
4.1	Diagrama polar da embarcação <i>First 40.7</i>	20
4.2	Gráfico da penalização temporal associada às mudanças de bordo, em segundos	24
5.1	Fluxograma do programa principal <i>otv</i>	34
6.1	Trajetória ótima com 2 pontos de guinada sem utilizar a função penalizadora	37
6.2	Trajetória ótima com 2 pontos de guinada, tendo em consideração a função penalizadora	37
6.3	Simulação com 2 pontos de guinada, n ^o épocas-25, dimensão populacional-26	40
6.4	Simulação com 2 pontos de guinada, n ^o épocas-25, dimensão populacional-50	40
6.5	Simulação com 2 pontos de guinada, n ^o épocas-50, dimensão populacional-50	41
6.6	Simulação com 2 pontos de guinada, n ^o épocas-250, dimensão populacional-100	41
6.7	Simulação com 2 pontos de guinada, n ^o épocas-1000, dimensão populacional-400	42
6.8	Trajetória ótima com 2 pontos de guinada	43
6.9	Trajetória ótima com 5 pontos de guinada	44
6.10	Trajetória ótima com 5 pontos de guinada, com presença de obstáculo	45
6.11	Trajetória ótima com 10 pontos de guinada, com presença de obstáculo	45
6.12	Evolução do tempo mínimo de trajeto com o decorrer das épocas . .	47

Lista de Tabelas

4.1	Parâmetros que definem o diagrama polar do "NRP Sagres"	21
4.2	Representação do diagrama polar do "NRP" Sagres	22
4.3	Coeficientes relativos a velocidades de vento de 10, 20 e 25 nós, respectivamente	22
6.1	Parâmetros de controlo e resultados	38
6.2	Parâmetros de controlo e resultados	39
6.3	Parâmetros de controlo e resultados	43
6.4	Parâmetros de controlo e resultados	44
6.5	Dados das simulações representadas das Figuras 6.8 e 6.9	47
6.6	Dados das simulações representadas das Figuras 6.10 e 6.11	47
6.7	Tempos de cálculo das simulações	48
6.8	Fração de tempo de cálculo dispendido relativamente ao tempo de percurso de cada simulação	48

Lista de Abreviaturas e Acrónimos

AG	A lgoritmos G enéticos
CEOV	C élula de E xperimentação O peracional de V eículos
CPU	C entral P rocessing U nity
EN	E scola N aval
GB	G igabyte
GUI	G raphical U ser I nterface
IMO	I nternational M aritime O rganization
NRP	N avio da R epública P ortuguesa
<i>otv</i>	O timização de T rajetórias de V eleiros
PG	P onto de G uinada
RAM	R andom A ccess M emory
RC	R emote C ontrol
RN	R edes N euronais
SA	S imulated A nnealing
VMG	V elocity M ade G ood
VNS	V ariable N eighbourhood S earch
VSA	V ectorized S imulated A nnealing

Notação Técnica e Científica

T	tempo total de trajeto
Γ	trajeto genérico de A a B
θ	ângulo do vento verdadeiro
P_i	i -ésimo ponto de guinada
L_i	segmentos orientados concatenados
Δ	função semi-empírica de penalização temporal
α	ângulo total de guinada
ε	semi-amplitude máxima
d_{AB}	distância de A a B
S	número de segmentos que definem um trajeto
M	pontos de guinada que definem a trajetória
U	conjunto de diferentes trajetos de A para B
N	dimensão da população no processo VSA
V	subconjunto com metade dos trajetos percorridos no menor tempo de U
P	número de épocas
$\#U$	dimensão da população
$\#V$	número de elementos eleitos em cada época

Prefácio

Este trabalho está estruturado em sete capítulos centrais. Inicia com o capítulo 1, composto por uma breve introdução e contextualização do problema a abordar, destacando a pertinência da temática e relevância da aplicabilidade da mesma na Marinha.

Por forma a criar um melhor enquadramento no domínio em estudo, no capítulo 2, são apresentadas e descritas outras possíveis abordagens, bem como metodologias desenvolvidas anteriormente na área.

No capítulo 3 é elaborada uma apresentação do problema em estudo. Esta é composta pela definição dos objetivos a atingir, os diferentes níveis de complexidade envolvida e, ainda, uma referência e justificação das simplificações e procedimentos aplicados.

Seguidamente, no capítulo 4, é explicada rigorosamente toda a formulação e desenvolvimento da solução, através da discussão e justificação das técnicas e cálculos utilizados ao longo do processo. Complementarmente, no capítulo 5 apresenta-se o fluxograma e os detalhes relevantes na criação do algoritmo concebido para uma aplicação computacional.

No capítulo 6 são descritas e apresentadas as simulações realizadas sob diferentes condições de vento, uniforme, não uniforme e com a possibilidade de consideração de zonas de passagem não praticáveis. Realiza-se, ainda, uma discussão e comparação dos diferentes resultados obtidos, com o intuito de sustentar a robustez e fiabilidade do estudo.

As conclusões relativas à metodologia utilizada e aos resultados oferecidos pela mesma, são expostas no capítulo 7, juntamente com sugestões propostas para trabalhos futuros. Em apêndice, situa-se em detalhe o código do algoritmo desenvolvido e os artigos científicos publicados e apresentados em conferências da área.

Capítulo 1

Introdução

A navegação à vela tem vindo a ser desenvolvida ao longo da história da Humanidade. O grande desenvolvimento deste tipo de navegação é associado à necessidade de um meio de transporte na época dos Descobrimentos, que permitisse explorar os oceanos desconhecidos e conquistar novos territórios. Da mesma forma, com o aumento do comércio, a necessidade de meios de transporte de mercadorias intensificou a quantidade e variedade de construção de embarcações à vela. Por outro lado, com o decorrer dos anos, a prática de vela adquiriu a vertente de competição, sendo efetuada através de corridas de embarcações, as denominadas regatas. A navegação à vela consiste na utilização da força do vento como único meio de propulsão, motivo pelo qual a utilização desta fonte de energia tem de ser empregue da melhor forma possível.

Tanto no contexto de planeamento otimizado de viagens, como na realização de regatas, o principal objetivo prende-se na realização de um determinado percurso no menor tempo possível. Por conseguinte, surge a necessidade de uso de uma ferramenta que permita determinar um percurso de tempo mínimo face às condições envolventes.

A tarefa de minimizar o tempo de navegação entre dois pontos é um problema, em geral, sem uma solução exata e/ou analítica. Como sabemos, a velocidade de um veleiro num determinado percurso depende não só das suas características, mas também da intensidade do vento e da sua direção, relativamente ao rumo escolhido.

A determinação de uma solução aproximada e satisfatória para este problema de otimização é de extrema importância, especialmente no contexto da utilização de veleiros autónomos nas mais variadas atividades de natureza civil e militar. Este problema enquadra-se na classe de problemas designados por otimização meteorológica de trajetos, em que se pretende encontrar o caminho ótimo tendo em

conta as condições ambientais, tais como as condições do vento e do mar, bem como a presença de massas de terra e gelo.

Na resolução de problemas de otimização meteorológica de trajetos podem observar-se níveis de complexidade crescente relacionada com as características meteorológicas verificadas no campo de velocidade do vento e no estado do mar, tais como a não uniformidade espacial ou temporal da direção e intensidade do vento, ou a existência de correntes marítimas.

Assumindo um campo de velocidade de vento estacionário e uniforme, este problema foi recentemente abordado utilizando uma técnica heurística de otimização inspirada no método de simulação do recozimento (Fedorchuk 2020). Esta abordagem provou ser fiável e robusta (Costa 2021), permitindo-nos obter trajetórias ótimas que não estão amarradas a uma malha espacial pré-definida.

Neste trabalho, utilizando esta técnica de otimização heurística, abordaremos o problema de minimização do tempo de percurso à vela dum ponto A para um ponto B em condições de vento estacionário, mas não uniforme. Por uma questão de simplicidade os efeitos do estado do mar, correntes, marés e deriva, não serão agora considerados.

Na aplicação desta técnica heurística, os caminhos do ponto A ao ponto B foram modelados através da concatenação de um pequeno número de segmentos orientados pré-definidos, caracterizados por pontos de guinada previamente estabelecidos. Entenda-se que, os pontos de guinada são posições espaciais que definem o fim e o início de segmentos consecutivos. É precisamente nas posições dos pontos de guinada que podem ocorrer mudanças de bordo no percurso definido. Note-se que a não-uniformidade espacial do campo de vento sugere a necessidade de descrever as trajetórias do ponto A ao ponto B , usando um conjunto de numerosos pontos de guinada.

1.1 Motivação

Na vertente dos veleiros autónomos, foram desenvolvidos pela Marinha diferentes trabalhos de investigação que estudaram o tema por diferentes óticas. O desenvolvimento de estudos e projetos na Escola Naval associados à vela robótica iniciou-se em 2010, com a criação do projeto “eVentos” com o objetivo de desenvolver um veleiro RC robusto para aguentar condições de mar adversas e desenvolvido inteiramente pela EN.

Este facto determinou que, em 2015, fosse concebido, projetado e construído um veleiro, produto de uma dissertação de mestrado, denominado “Barlavento” (Fernandes 2016), tendo sido mais tarde melhorado e capacitado a nível de constituintes estruturais e de sensores, com recurso à modelação e impressão 3D e maquinação por comando numérico computadorizado (Santos 2019). Numa perspetiva mais recente, os estudos desenvolvidos concentram-se na melhoria da navegação autónoma do veleiro. Inicialmente, (Santos 2019) implementou e validou um algoritmo de comando e controlo e (Fedorchuk 2020) focou-se na criação de métodos de cálculo que visam a minimização do tempo necessário para percorrer determinado percurso, para trajetórias de curto alcance. Neste seguimento, o algoritmo desenvolvido neste estudo permitirá a determinação de trajetórias ótimas mais realistas, uma vez que considera campos de vento não uniforme.

As aplicações desenvolvidas apresentam um útil campo de aplicação nos meios navais da Marinha, uma vez que este tipo de técnicas de otimização poderá vir a desempenhar um papel fundamental na otimização do planeamento de viagens, através da consideração de diversos fatores ambientais, assegurando uma maior segurança da navegação e otimização dos recursos, como é exemplo o consumo de combustível. Esta potencialização poderá ser conseguida mediante uma distribuição dos pontos de guinada consoante as condições ambientais favoráveis.

Deste modo, o desenvolvimento efetuado em termos de planeamento de percursos, tanto na vertente de navegações oceânicas, como na realização de regatas, constitui uma mais valia para a vela robótica como para a prática de vela de cruzeiro, na medida em que contribuirá para melhorar o desempenho destes meios.

Capítulo 2

Estado da Arte

Nos últimos anos, tem-se observado uma crescente importância no desenvolvimento da área de otimização meteorológica de trajetos. A integração do planejamento meteorológico com a otimização de rotas permite o conciliar de uma maior segurança no mar com uma maior vantagem em termos comerciais (Sirimanne et al. 2019) e em termos de tempos de navegação (Zis, Psaraftis e Ding 2020).

Visto ser uma melhoria para todos os que navegam, esta matéria tem sido abordada por diferentes técnicas e métodos. Assim sendo, na resolução de problemas de otimização meteorológica de trajetos, têm sido utilizados: o método das isócronas, programação dinâmica, metodologias de otimização heurística, bem como técnicas baseadas em inteligência artificial (Thornton 1993). Por forma a entender as capacidades e vantagens de cada método, estes serão abordados de seguida, dando um particular destaque ao método do *Simulated Annealing*, método aplicado no desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Método das Isócronas

Este é o método mais comum no cálculo de trajetórias entre dois pontos. Baseia-se na determinação de curvas, isócronas, centradas num ponto inicial e cujos pontos representam cada direção θ possível de alcançar, a uma certa velocidade, num determinado período de tempo Δt .

O cálculo efetuado para determinar a localização l dos pontos que definem a isócrona, num instante qualquer t , $l = V(\theta)\Delta t$, tem em consideração o diagrama polar dos veleiros e previsões meteorológicas respeitante à direção e intensidade do vento $W(l,t)$. Deste modo, as curvas são definidas ao longo do espaço, através da aplicação do diagrama polar do veleiro respetivo à intensidade e ângulo de entrada do vento, $W(l,t+\Delta t)$, para determinada posição l da isócrona previamente estabelecida.

Como se pode observar na Figura 2.1, cada isócrona é composta por um conjunto de pontos conectados entre si, que podem ser alcançados no mesmo intervalo de tempo, segundo uma direção θ única. Os segmentos de linha interligam, por sua vez, um ponto de uma isócrona ao ponto da isócrona anterior que o gerou.

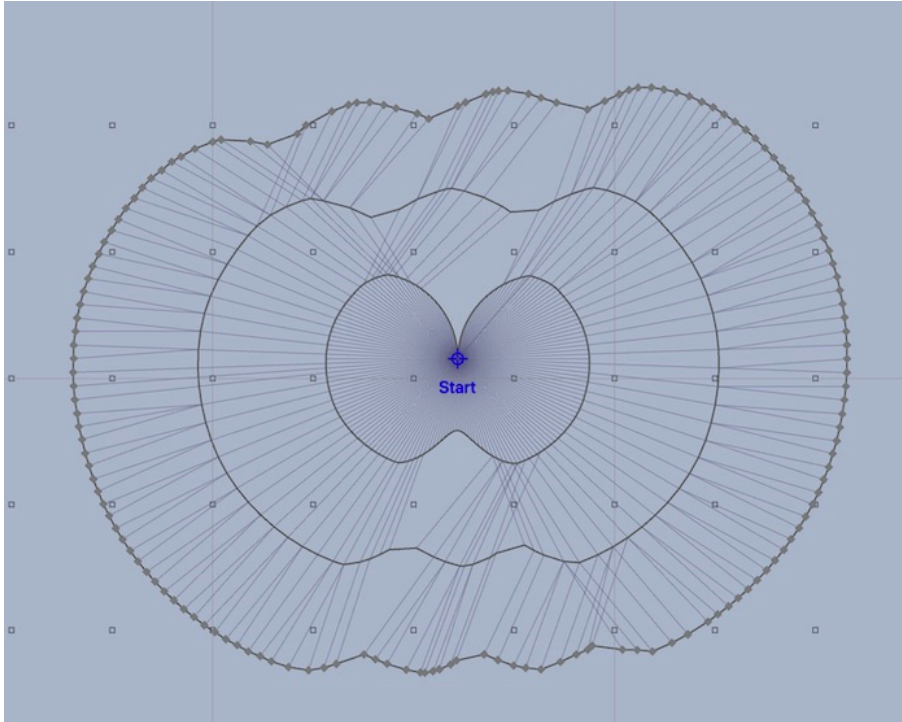


FIGURA 2.1: Aplicação inicial do método das isócronas
<https://routing.luckgrib.com>

Este processo repete-se até ao momento em que a última isócrona atinge o ponto de destino, permitindo efetuar o percurso inverso até ao ponto inicial, através da seleção de um ponto de cada isócrona que permita obter o percurso navegado com a maior velocidade (Rabaud 2016). Na Figura 2.2, é definido um percurso entre um ponto de partida e um ponto de chegada, recorrendo ao método das isócronas. Sendo que as cores da imagem representam as diferentes intensidades do vento segundo as previsões meteorológicas, é de realçar a passagem dos pontos do trajeto pelas zonas de maior intensidade do vento, permitindo assim, uma maior velocidade praticada pelo veleiro.

Por outro lado, uma das desvantagens deste método é o chamado "Loop das Isócronas", uma irregularidade causada pelo efeito do estado do mar no veleiro. No entanto, (Lin, Fang e Yeung 2013) propõem um método tridimensional capaz de considerar as alterações na profundidade da água que influenciará não só o ângulo das ondas, como a velocidade de navegação.

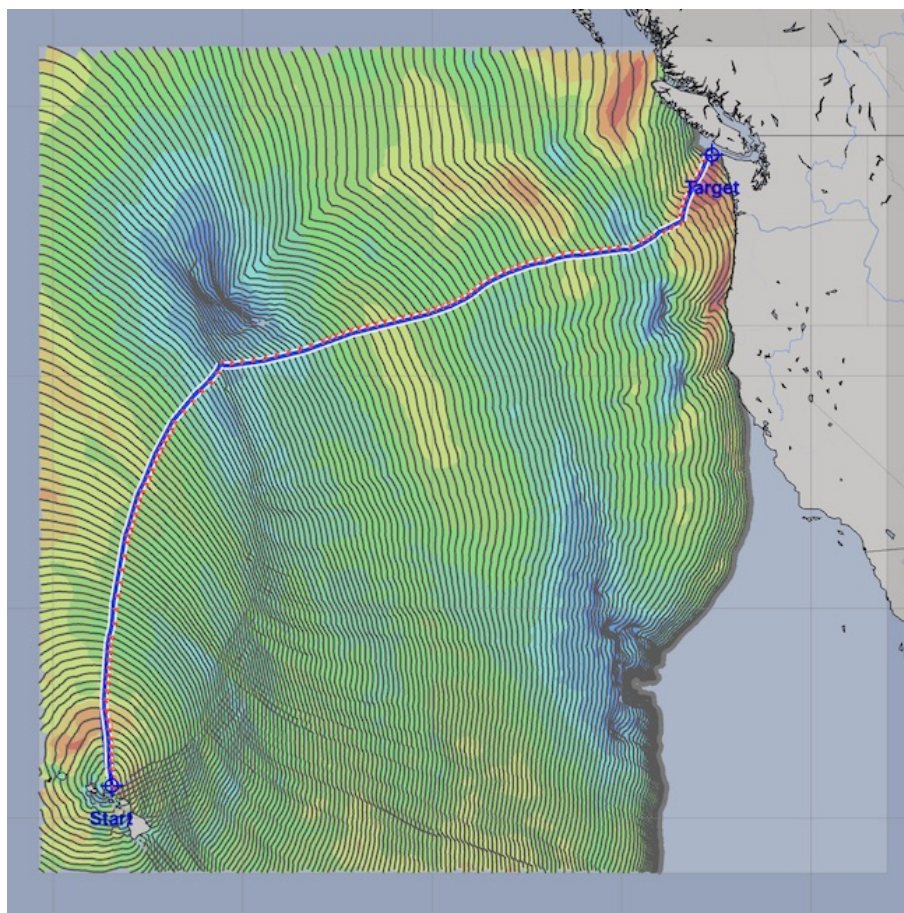


FIGURA 2.2: Trajeto definido com recurso ao método das isócronas
<https://routing.luckgrib.com>

2.2 Programação Dinâmica

A programação dinâmica é fundamentada pelo princípio de optimalidade de Bellman, onde um problema é dividido em diversas fases e, após tomada a primeira decisão, as seguintes devem constituir uma estratégia ótima (Bellman 1952). Desta forma, esta técnica algorítmica consiste na construção de algoritmos para a resolução de problemas de otimização combinatória, tendo a particularidade de guardar os resultados de subproblemas em vez de os recalculá-los.

Ao longo dos anos, este método tem vindo a ser desenvolvido e aplicado de diferentes modos no estudo da otimização meteorológicas de trajetos. (Chen 1978) desenvolveu um algoritmo que permite resolver o problema do planeamento de viagens, tendo em conta as variações estocásticas das previsões do estado do mar e minimiza o custo total esperado da viagem, sob as restrições de navegabilidade causadas pelo movimento do navio. Por outro lado, foi aplicado por (Wang 1993)

a programação dinâmica no tratamento dos dados relativos às previsões meteorológicas, no cálculo da melhor rota em determinada área de navegação. Numa outra vertente, (Shao, Zhou e Thong 2012) através de uma resposta tridimensional de programação dinâmica, incluíram os efeitos das configurações do navio e das mudanças de rumo, com posições geográficas e temporais. O principal objetivo deste método é minimizar o consumo de combustível gasto numa viagem, tendo também em consideração as restrições de segurança impostas pela IMO (International Maritime Organization).

Ainda no âmbito da programação dinâmica, o algoritmo de *Dijkstra* e o algoritmo A* desenvolvidos em 1956 e 1968, respetivamente, modelam os diferentes caminhos possíveis recorrendo à utilização de um grafo. Estes diferentes caminhos possíveis correspondem a uma sequência de arestas concatenadas que ligam um ponto *A* de partida a um ponto *B* de chegada.

O algoritmo de *Dijkstra* define o caminho ideal através da seleção de arestas consecutivas de um grafo, recorrendo a uma pesquisa exaustiva e eficaz do trajeto ótimo. Pelo facto de ser um processo exaustivo, a aplicação deste método determina o que será o caminho ótimo, no entanto, esta pode ser demorada, uma vez que considera todas as opções. Por sua vez, o algoritmo A* é uma técnica derivada do algoritmo *Dijkstra*, que se distingue por não executar uma pesquisa de todos os possíveis trajetos, tornando-se por isso mais rápida, não garantindo assim a obtenção do trajeto ótimo.

No que diz respeito à aplicação destes algoritmos na otimização meteorológica de trajetos, (Padhy, Sen e Bhaskaran 2008) utilizam o algoritmo de *Dijkstra* para obter uma rota ótima considerando as perdas de velocidade do navio originadas pelos diferentes estados do mar. Por outro lado, o algoritmo A* aplicado por (Szlapczynska 2014) gera rotas meteorológicas ótimas através do uso de uma otimização multi-objetivo, um processo personalizável que permite um ajuste às necessidades específicas de cada tipo de embarcação ou tipo de navegação.

2.3 Redes Neurais

Tal como os AG, as Redes Neurais também são uma técnica inspirada nos fatores biológicos que nos rodeiam. A capacidade única que o Homem tem de aprender é tentativamente traduzida na criação duma estrutura biológica artificial, que visa replicar as ligações neurológicas do cérebro, como representado na Figura

2.3 ,através da interligação dos neurónios que desempenham funções individuais mas dependentes do estímulo das sinapses anteriores (Lopes 2016).

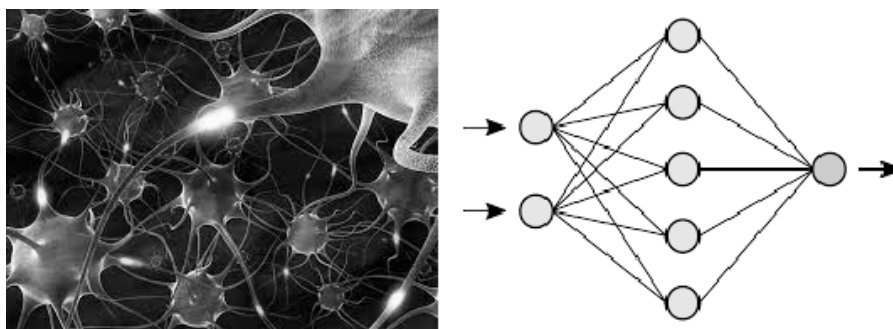


FIGURA 2.3: Rede Neuronal Biológica e Rede Neuronal Artificial

A importância deste método, surge da capacidade das RN adquirirem o seu conhecimento através da deteção de padrões e relações encontrados nos dados que lhes são fornecidos e modelarem relações entre entradas e saídas de dados que são complexos e não lineares, revelando melhorias nos processos de decisão.

(Wang, Yan, Yuan e Li 2016) aplicaram uma rede neuronal no desenvolvimento de um modelo de otimização de eficiência energética, em tempo real, para determinar uma velocidade ótima de navegação específica para cada tipo de condições ambientais. Por sua vez, (Corradu, Oneto, Baldi e Anguita 2017) investigam o problema da previsão de consumo de combustível e da definição do melhor valor de *trim* de uma embarcação em operações reais, com base em dados fornecidos por sistemas do próprio navio. Complementarmente, (Zheng et al. 2019) usaram um modelo neuronal para prever e minimizar o consumo de combustível gasto por um cruzeiro em águas norueguesas. Como evidenciado, vários estudos foram desenvolvidos através da aplicação de redes neuronais, comprovando ser uma técnica com aplicações na área da otimização de trajetos marítimos.

2.4 Métodos Heurísticos de Otimização

A otimização caracteriza-se por ser o processo matemático que obtém o melhor resultado de um problema dado um conjunto de alternativas, minimizando o esforço necessário ou maximizando o benefício requerido. Os métodos heurísticos de otimização têm como objetivo resolver problemas complexos, através da procura de soluções ótimas. No entanto, segundo (Bueno 2009), definem-se pela busca contínua e empírica, com vários ótimos locais, cujo resultado é o melhor que se pode encontrar sob determinadas condições.

Em termos matemáticos, uma técnica de otimização é composta por:

- Função objetivo f dependente de uma ou mais variáveis, que se pretende minimizar ou maximizar, $X \rightarrow Y$, em que o domínio X é o espaço de pesquisa e o contra-domínio Y é um subconjunto de números reais (Weise 2009);
- Conjunto de variáveis x que afetam a função objetivo, sendo que $f(x)$ quantifica a qualidade da solução (Engelbrecht 2007);
- Conjunto de constantes que limitam os valores das variáveis;
- Ótimo local composto pelos valores das variáveis que maximizam/minimizam f no espaço de busca;
- Ótimo global, definido se existir, no espaço de busca de diversos ótimos locais, sendo o valor maior/menor.

Sendo assim, a otimização consiste na procura em X do ótimo local da função f , considerando as variáveis x e suas constantes (Engelbrecht 2007).

Esta pesquisa em X é conseguida através da aplicação de algoritmos de otimização como: Algoritmos Genéticos, Redes Neurais, Pesquisa Tabu, VNS (Variable Neighbourhood Search), Simulated Annealing (SA). Podem ser determinadas soluções ótimas de trajeto em termos de tempo e/ou consumos mínimos, cumprimento de planeamentos rigorosos, ou até definição de rotas que assegurem uma maior segurança.

2.4.1 Algoritmos Genéticos(AG)

Os Algoritmos Genéticos caracterizam-se pelo uso de simulações de técnicas inspiradas na biologia evolutiva, como hereditariedade, mutação e seleção natural. O uso desta ferramenta permite uma grande flexibilidade na modelação de problemas, mas por outro lado, apresenta tempos de computação elevados e pode não garantir a obtenção do melhor resultado possível (Linden 2008).

A utilização desta técnica implica a criação de uma sequência de populações através do uso de operadores de *crossover* e mutação como mecanismos de busca e aplica uma estratégia de seleção para fazer com que uma nova população seja composta, em média, por indivíduos mais aptos do que os integrantes das populações anteriores (Knopman e Aude 1996), originando uma população ideal constituída pelos melhores elementos.

(Sousa 2015) determina rotas ótimas em termos de custos, incorporando na função objetivo preocupações ambientais como os custos/ benefícios incorridos com a compra/venda de licenças de emissão de CO₂, através do desenvolvimento de Algoritmos Genéticos.

2.4.2 Pesquisa Tabu

Esta técnica proposta por Fed W. Glover em 1986, é um método de pesquisa local, capaz de superar limitações de otimização local (Glover 1989). Este algoritmo diferencia-se por recorrer à memória para guardar as várias soluções encontradas na vizinhança da solução atual, eliminando a possibilidade do algoritmo ficar preso num ótimo local, ou de voltar a uma solução já visitada. Porém, esta complexidade do algoritmo reflete-se em grandes esforços computacionais.

(Jia, Li, Dong e Ya 2013) desenvolveram uma nova vertente deste algoritmo através da introdução de táticas de mutações de busca local que contornam a fragilidade do tempo de cálculo, apresentando soluções satisfatórias na aplicação da Pesquisa Tabu no problema de definição de rotas de veículos.

2.4.3 Método de Simulação do Recozimento

O método de simulação do recozimento foi originalmente desenvolvido por (Metropolis, Rosenbluth, Rosenbluth, Teller e Teller 1953), inspirado no processo metalúrgico de recozimento, onde um metal é aquecido até uma alta temperatura e, posteriormente arrefece muito lentamente. Durante o processo de arrefecimento, as moléculas ajustam-se e reorganizam-se até que a malha de cristal atinja um estado de energia mínima, como representado na Figura 2.4.

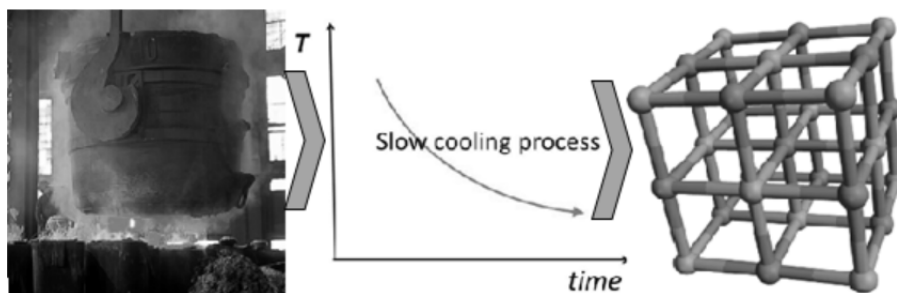


FIGURA 2.4: Processo metalúrgico reproduzido pelo SA

O *Simulated Annealing*, ou em português, o método de simulação do recozimento, tem a particularidade de apresentar uma implementação despida de complexidades, possibilitando uma abordagem eficaz a problemas de otimização não-lineares, em domínios complexos (Press, Flannery, Teukolsky e Vetterling 1986). Este inicia-se numa solução admissível de um problema, considerando ao longo do processo as soluções vizinhas. Em semelhança ao processo de recozimento propriamente dito, o SA começa por considerar entre uma grande população de soluções, simulando uma alta temperatura inicial e, à medida que ocorre o arrefecimento, tal como as moléculas se ajustam, também a população de soluções se reorganiza, ao ponto de considerar apenas as melhores.

Esta técnica tem vindo a ser estudada e adotada em diversos contextos na área de roteamento, (Brandão, Vasconcelos e Alvarenga 2006) aplicam um algoritmo baseado no SA a um problema de definições de rotas com janelas de tempo, para minimizar a distância total tendo em conta um certo período de tempo. No âmbito da otimização de trajetos, (Kosmas e Vlachos 2012) determinam rotas ótimas de navios através da minimização de uma função de custo definida como uma soma ponderada do tempo de viagem e do conforto da viagem, dependendo da velocidade e direção do vento, bem como da altura e direção das ondas. (Fedorchuk 2020) criou um algoritmo de otimização para trajetórias com duas pernadas e vento constante, com recurso ao método de simulação do recozimento. Com o objetivo de enriquecer esta técnica, (Costa 2021) desenvolveu a técnica anterior, tornando possível calcular percursos com um número de pernadas definido previamente pelo utilizador. Na resolução deste problema de otimização de trajetórias de veleiros com condições de vento não uniformes será adotado este método de simulação do recozimento, através da aplicação do arrefecimento na distribuição dos pontos de guinada, sucintamente explicado no capítulo referente à apresentação do problema.

2.5 Desenvolvimentos na Marinha Portuguesa

Como foi demonstrado, as técnicas de otimização podem ser aplicadas de diversos modos com o intuito de resolver o mesmo problema. Relativamente à Marinha Portuguesa, o desenvolvimento destes métodos tem sido estudado em forma de dissertações de mestrado na Escola Naval (Fedorchuk 2020) e (Costa 2021), como referido anteriormente.

(Fedorchuk 2020) realizou um estudo e desenvolvimento de algoritmos de otimização de trajetórias para veleiros, com duas pernadas e vento constante, com

recurso à técnica de simulação de recozimento, utilizando o programa MATLAB.

(Costa 2021) desenvolveu uma ferramenta parametrizável com recurso ao diagrama polar de velocidades de qualquer veleiro, capaz de calcular trajetórias que minimizam o tempo de percurso dum veleiro entre dois pontos, utilizando um número de pernadas fixado inicialmente.

Criado por (Fedorchuk 2020) o algoritmo de otimização de trajetórias, e acrescentada a capacidade de definição do número de pernadas (Costa 2021), o presente algoritmo é uma vertente do mencionado anteriormente, mas com a capacidade de resposta perante campos de vento não uniformes e à existência de zonas de passagem impraticável.

A aplicação de sistemas de otimização não se tem restringido ao Centro de Investigação da Escola Naval (CINAV), sendo que foi recentemente concebido um sistema marítimo autónomo pela Célula de Experimentação Operacional de Veículos Não Tripulados (CEOV), uma iniciativa estratégica de transformação do setor operacional da Marinha Portuguesa que tem vindo a acompanhar os constantes avanços tecnológicos. O veículo autónomo desenvolvido pela CEOV é um catamaran que compõe as brigadas hidrográficas e, à semelhança dos navios hidrográficos, está equipado com um feixe simples e um sonar lateral. Possui ainda, um gerador elétrico que garante uma elevada autonomia, permitindo um aumento de segurança e alcance das áreas em estudo.

Capítulo 3

Apresentação e Estabelecimento do Problema

Neste capítulo iremos apresentar a complexidade da problemática a abordar ao longo deste estudo. A caracterização da temática será composta pela referência de particularidades e limitações inerentes à navegação à vela e a determinados procedimentos utilizados na implementação desta técnica, bem como a solução para os mesmos.

3.1 Caracterização do Problema

A determinação do trajeto entre o ponto A (ponto de partida) e o ponto B (ponto de chegada) que possa ser percorrido no menor tempo possível por parte de um veleiro com vento não uniforme (mas estacionário) constitui o problema principal que pretendemos resolver.

De referir que o problema análogo mas com vento uniforme já foi abordado e resolvido no passado recente utilizando técnicas de otimização inspiradas na técnica da simulação do recozimento (Fedorchuk 2020) e (Costa 2021).

Considerou-se também a possibilidade dos trajetos determinados evitarem a passagem por zonas não navegáveis e/ou proibidas devidamente definidas.

Este problema pode assumir diferentes níveis de complexidade crescente referentes ao tipo de campo de vento no seio do qual o percurso deverá ser determinado. Estes campos de vento podem ser:

- estacionários e uniformes;
- estacionários e não uniformes;

- não estacionários e não uniformes.

Como já foi referido, neste trabalho consideraremos a determinação de trajetos em condições de vento estacionário mas não uniforme.

Neste trabalho e para simplificar a formulação, não serão considerados os efeitos das correntes e da deriva. Estes aspetos serão considerados em trabalho futuro.

A complexidade de um campo de vento não uniforme deve-se ao facto de ao longo do percurso, o veleiro percorrer zonas com diferentes intensidades e direções de vento praticando consecutivamente diferentes velocidades de navegação. Esta particularidade da não uniformidade espacial do vento, cria a necessidade de desenvolver um método capaz de analisar as diferentes condições do vento observadas no campo de pesquisa. Para assim se poder determinar as zonas mais vantajosas de percorrer, graças às condições mais favoráveis para a realização de um determinado percurso no menor tempo possível.

Por forma a conhecer as diferentes velocidades praticadas por um veleiro tendo em conta o ângulo de entrada do vento, foi criado um polinómio trigonométrico que descreve um diagrama polar genérico. Desta forma, é possível determinar a velocidade praticada pelo veleiro ao longo do percurso de A para B , tendo em consideração a velocidade do vento verdadeiro e o seu ângulo de entrada no veleiro. No entanto, este diagrama é assimétrico, o que significa que o trajeto em tempo mínimo do ponto A para o ponto B é diferente, em geral, do trajeto em tempo mínimo de B para A .

Associado ao diagrama polar advém a impossibilidade de se navegar na direção oposta à direção do vento. Este facto ocorre tanto num contexto de vento uniforme, como de vento não uniforme. Desta impossibilidade, surge a necessidade de serem efetuadas as mudanças de bordo (*tacking*), permitindo o alcance de determinado destino num ponto contra o vento, através da execução de diferentes pernadas. A execução destas viragens de bordo implica um certo momento em que o veleiro diminui a sua velocidade. Deste modo, esta particularidade da navegação à vela foi representada por (Costa 2021) num modelo semi-empírico de penalização temporal, experimentalmente ajustado e aplicado a cada ponto de guinada para a obtenção de trajetos ótimos mais realistas. A abordagem a este modelo encontra-se no capítulo 4.

Para além destas limitações associadas ao campo de vento não uniforme, estas condições de vento também implicam que os trajetos definidos em tempo mínimo

3. Apresentação e Estabelecimento do Problema

não sejam retilíneos, pois a direção e velocidade do vento variam espacialmente. Esta particularidade sugere a necessidade de aproximar os trajetos mínimos, recorrendo à concatenação de trajetos retilíneos, definidos por pontos de guinada, que unam o ponto A ao ponto B .

Capítulo 4

Solução: Formulação e Desenvolvimento

Neste Capítulo apresentaremos as soluções adotadas na abordagem dos problemas em estudo:

- determinação do trajeto entre o ponto A e o ponto B , a percorrer em tempo mínimo, navegando à vela e em condições de vento estacionário, mas não uniforme.
- determinar tais trajetos evitando a passagem por zonas não navegáveis ou de passagem proibida.

Começaremos por caracterizar a função objetivo a minimizar e formular o problema de otimização a resolver. Estabeleceremos de seguida a técnica de otimização adotada (inspirada no método de simulação do recozimento) e estabeleceremos a respetiva heurística.

Motivaremos e apresentaremos igualmente os seguintes modelos e a sua forma:

- o diagrama polar de velocidade utilizado.
- a função semi-empírica de penalização temporal associada à execução de mudanças de bordo.
- a função que estabelece a diminuição da semi-amplitude de perturbação espacial dos pontos de guinada no desenrolar do método de otimização.

4.1 Definição dos Trajetos

A partir do campo de velocidade do vento v , o tempo de viagem T , entre os pontos A e B pode ser calculado através do integral de linha,

$$T = \int_{\Gamma} \frac{ds}{c} \quad (4.1)$$

onde Γ representa um trajeto genérico de A a B e c representa a velocidade ao longo do trajeto. A velocidade do veleiro, $c = c(\theta, v)$, depende do ângulo de entrada do vento θ e da intensidade do vento verdadeiro ¹ $v = \|\mathbf{v}\|$, e é estabelecida, como já foi mencionado, pelo diagrama polar de velocidade.

4.1.1 Diagrama Polar de Velocidade

Como já foi referido, a velocidade de um veleiro num determinado rumo está relacionada com a intensidade do vento, mas também com o ângulo entre o rumo da embarcação e a direção do vento verdadeiro. Esta dependência é normalmente descrita com recurso ao diagrama polar de velocidade.

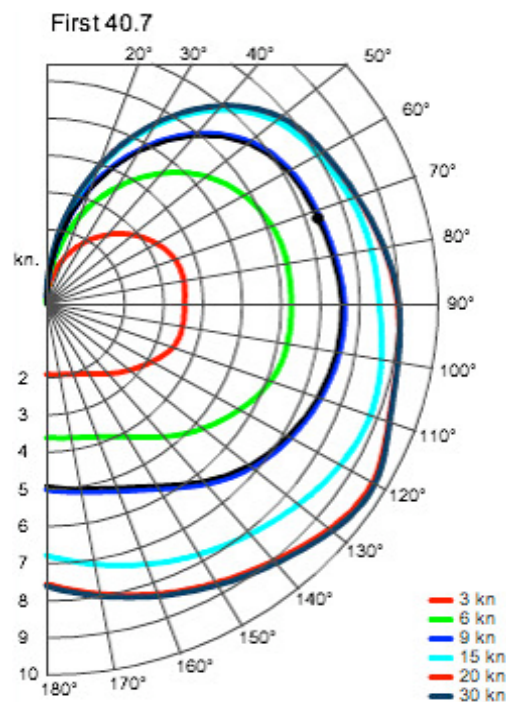


FIGURA 4.1: Diagrama polar da embarcação *First 40.7*

¹Vento verdadeiro: deslocamento de massas de ar, derivado dos efeitos das diferenças de pressão atmosférica.

Vento relativo: soma vetorial do vento verdadeiro e do vento gerado pelo movimento do veículo.

A Figura 4.1 representa apenas metade de um diagrama polar da embarcação *FIRST 40.7*, devido à simetria do comportamento das embarcações à vela relativamente à linha proa-popa.

No diagrama polar podemos observar, na sua periferia, a escala angular de entrada do vento verdadeiro que permite assinalar ângulos de entrada de 0 graus (vento pela proa) a 180 graus (vento pela popa). As diferentes linhas coloridas representam a intensidade do vento verdadeiro que se verifica. A interseção do segmento radial, que caracteriza o ângulo de entrada do vento, com a linha colorida que representa a intensidade do vento verdadeiro, determina um ponto cuja distância ao centro do diagrama polar indica a velocidade do veleiro assinalada em circunferências concêntricas.

A descrição matemática de diagramas polares pode ser feita recorrendo ao polinómio trigonométrico 4.2 dependente adicionalmente da intensidade do vento v :

$$c(\theta, v) = \sum_{n=0}^{n=4} \left(\sum_{m=1}^{m=3} a_n^m v^m \right) \cos(\theta)^n \quad (4.2)$$

nesta expressão θ representa o ângulo de entrada do vento e v representa a intensidade do vento verdadeiro. Os parâmetros a_n^m , $0 \leq n \leq 4$ e $1 \leq m \leq 3$ utilizados neste trabalho que estão representados na Tabela 4.1 foram determinados a partir do diagrama polar do "NRP Sagres", usando técnicas de interpolação a partir de dados extraídos de (Mota 2014). Nesta formulação, quer a velocidade do veleiro c , quer a intensidade v do vento são expressas em nós.

a_n^m	m=1	m=2	m=3
$n = 0$	1.015000000000024	-0.035500000000000	0.000500000000000
$n = 1$	-0.555051796280676	0.029272543103231	-0.000570667663023
$n = 2$	-1.237380115941244	0.033649203926368	-0.000263655135513
$n = 3$	0.380218462947343	-0.021422543103231	0.000434000996357
$n = 4$	0.397213449274578	-0.005999203926369	-0.000099678197820

TABELA 4.1: Parâmetros que definem o diagrama polar do "NRP Sagres"

Para determinar os coeficientes representados na Tabela 4.1, foram utilizados dois suportes de interpolação distintos, representados nas Tabelas 4.2 e 4.3.

Numa primeira fase calculamos os coeficientes $a_0(v)$, $a_1(v)$, $a_2(v)$, $a_3(v)$ e $a_4(v)$, do polinómio trigonométrico interpolador

$$c(\theta, v) = \sum_{n=0}^{n=4} a_n(v) \cos^n \theta, \quad (4.3)$$

tendo por base os suportes de interpolação indicados na Tabela 4.2, isto é, para as velocidades verdadeiras do vento $v= 10, 20$ e 25 nós, e para os ângulos em graus $\theta=[0,20,90,135,180]$. Na Tabela 4.2 estão indicados os valores obtidos.

θ [graus]/ vel [nós]	10	20	25
0	0	0	0
20	0.2	1/3	0.4
90	7.1	10.1	11
135	4.8	6.5	7.3
180	2.2	2.9	3.2

TABELA 4.2: Representação do diagrama polar do "NRP"Sagres

Finalmente numa segunda fase, determinamos os coeficientes a_n^1, a_n^2 e a_n^3 , $0 \leq n \leq 4$, dos polinómios interpoladores de grau 3 (nulos na origem)

$$a_n(v) = \sum_{m=1}^{m=3} a_n^m v^m, \quad (4.4)$$

que interpolam os suportes representados na Tabela 4.3, associados a cada uma das linhas desta tabela. Na Tabela 4.2 estão indicados os valores que interpolam os suportes representados na Tabela 4.3, associados a cada uma das linhas desta tabela. Na Tabela 4.1 estão indicados os valores a_n^m assim obtidos. A expressão 4.2 é obtida diretamente a partir das expressões 4.3 e 4.4.

$a_n(v) / vel$ [nós]	10	20	25
$a_0(v)$	7.1000000000000001	10.1000000000000000	11.0000000000000002
$a_1(v)$	-3.193931315507040	-3.957359988507989	-4.497637702237436
$a_2(v)$	-9.272535902288604	-13.397161832381629	-14.023361936941710
$a_3(v)$	2.093931315507040	2.507359988507989	2.897637702237437
$a_4(v)$	3.272535902288607	4.747161832381628	4.623361936941706

TABELA 4.3: Coeficientes relativos a velocidades de vento de 10, 20 e 25 nós, respetivamente

4.1.2 Tempo de Percurso

Tendo em vista estabelecer a função objetivo a minimizar, definam-se S segmentos orientados L_i concatenados que estabelecem um caminho Γ entre os pontos

A e B. Esta trajetória é, assim, definida por $S - 1$ pontos de guinada P_i e o tempo total de trajeto T associado a este caminho é

$$T(P_1, P_2, \dots, P_{S-1}) = \sum_{i=1}^S t(L_i) + \sum_{i=1}^{S-1} \Delta(P_i), \quad (4.5)$$

onde $t(L_i)$ representa o tempo de trajeto no segmento L_i (pernada) e $\Delta(P_i)$ representa uma estimativa da penalização temporal associada às perdas de velocidade produzidas pelas mudanças de bordo executadas nos pontos de guinada P_i . A penalização temporal referida é efetuada recorrendo a uma função semi-empírica apresentada e discutida mais adiante.

Conhecendo o campo de velocidade do vento, o tempo percorrido $t(L_i)$

$$t(L_i) = \int_{L_i} \frac{ds}{c(\theta, v)} \quad (4.6)$$

é calculado por integração numérica ao longo de cada trajeto L_i , $i=1, \dots, S$.

A integração 4.6 ao longo das pernadas é obtida numericamente, recorrendo à Regra dos Trapézios.

4.1.3 Função de Penalização Temporal

A função de penalização temporal associada à execução de mudanças de bordo nos pontos de guinada, tem a seguinte forma:

$$\Delta(P_i) = \begin{cases} k_1 \frac{|\alpha_i|}{90} e^{-k_2 v_i} & \text{se a proa passar a linha do vento} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.7)$$

onde v_i é a velocidade média de navegação verificada nas pernadas L_i e L_{i+1} , na vizinhança do ponto de guinada P_i , α_i é o i -ésimo ângulo total de guinada em graus e k_1 e k_2 são parâmetros ajustáveis, que podem ser determinados experimentalmente consoante as características específicas de cada veleiro.

A função 4.7 foi introduzida e utilizada por (Costa 2021).

A penalização temporal é aplicada apenas a trajetos navegados à bolina², pois determinam mudanças de bordo que provocam perdas de velocidade. A

²Navegação à bolina: tipo de navegação em que o ângulo de entrada do vento a contar da proa é inferior a 90°.

penalização temporal postulada como sendo proporcional ao ângulo total de guinada ($0 < \alpha < 180$ graus) e exponencialmente decrescente com a velocidade média em que ocorre a manobra.

Relativamente à determinação das constantes k_1 e k_2 , estas foram definidas especificamente para o Navio Escola Sagres. Sendo que α corresponde ao ângulo total de guinada associado às mudanças de bordo e v , à velocidade médias nas pernadas, as constantes k_1 e k_2 que variam inversamente à velocidade vão diferir consoante os diferentes tempos t característicos de cada embarcação, devido à sua velocidade e comprimento.

Através da definição de valores específicos para v e α relativos ao Navio Escola Sagres, determinou-se k_1 e k_2 de modo a obter-se um modelo de penalização representado na Figura 4.2. Este gráfico é composto por um eixo de abcissas relativo à velocidade do veleiro e um eixo de ordenadas que traduz o tempo associado a uma mudança de rumo.

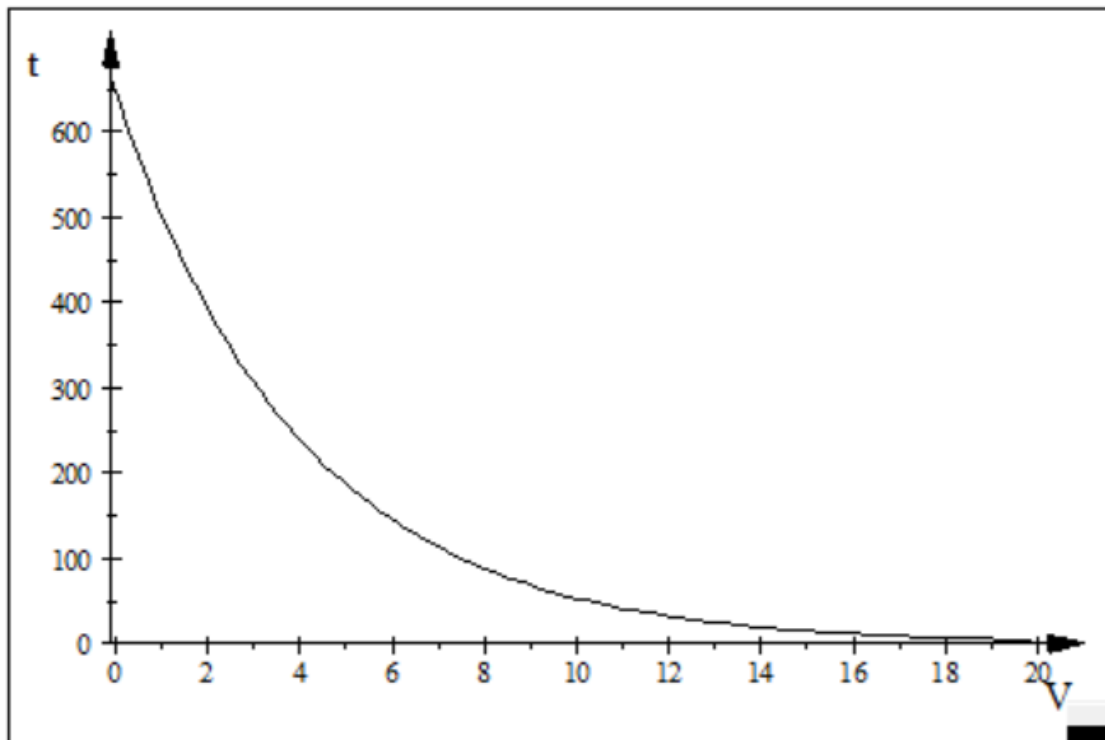


FIGURA 4.2: Gráfico da penalização temporal associada às mudanças de bordo, em segundos

Tendo em consideração o problema de minimizar o tempo de navegação entre dois pontos sob campos de velocidade de vento estacionário e uniforme, (Costa 2021) mostrou que a utilização do algoritmo de penalização temporal associado às

mudanças de bordo permite obter trajetórias ótimas mais realistas, que não podem ser obtidas utilizando técnicas expeditas, tais como usando a técnica *Velocity Made Good (VMG)*.

4.2 Algoritmo VSA

Na minimização da função objetivo 4.5 foi introduzida uma variante do método de simulação do recozimento, que designámos de *Vectorized Simulated Annealing (VSA)*. Como já foi referido, a principal particularidade da técnica heurística proposta centra-se na capacidade de trabalhar com uma população de trajetos, contrariamente ao método *SA* original que processa simplesmente um único trajeto que faz evoluir no decurso do processo.

Os detalhes que definem esta técnica heurística de otimização são os seguintes:

1. Gerar um conjunto U de diferentes trajetos de A para B , recorrendo a sequências de $N - 1$ pontos de guinada, com posições espaciais geradas aleatoriamente;
2. Calcular o tempo de percurso em cada um dos N trajetos em U [utilizando 4.5, 4.6 e 4.7] e reter um subconjunto $V \subset U$ de metade dos percursos percorridos no menor tempo;
3. Reconstruir o conjunto U utilizando apenas os trajetos em V ;
4. Perturbar espacialmente as posições de cada um dos pontos de guinada que definem cada uma das trajetórias em U . A perturbação espacial consiste em impor uma alteração nas coordenadas da posição espacial do ponto de guinada, com um valor igual ou inferior à semi-amplitude máxima ε . O valor desta semi-amplitude é gerado aleatoriamente, recorrendo a uma distribuição uniforme;
5. Repetir os passos 2 - 4, diminuindo sucessivamente a semi-amplitude ε da perturbação espacial dos pontos de guinada;
6. Interromper os cálculos quando a melhor trajetória em V não registar melhorias significativas.

Neste contexto, referir-nos-emos à repetição de passos 2-4 como *Época*. A cardinalidade, $\# U$, do conjunto U é designada dimensão da população, e os elementos de V são designados como elementos eleitos.

Note-se que $\varepsilon = \varepsilon(i)$, $i = 1, \dots, n, \dots$, deve ser uma função suavemente decrescente com a época i , a fim de assegurar uma exploração adequada do espaço

de pesquisa do problema e diminuir o risco das soluções oferecidas pela heurística serem mínimos locais.

Note-se que, no espaço de pesquisa, podem existir múltiplas trajetórias ótimas, devido à simetria geométrica exibida pelos veleiros e a certas características particulares do campo de velocidade do vento.

A convergência e o custo computacional da técnica heurística *VSA* depende da escolha adequada dos parâmetros, tais como:

1. A taxa de diminuição da perturbação espacial $\varepsilon = \varepsilon(i)$;
2. O número de épocas;
3. A cardinalidade $\#U$ (dimensão da população);
4. A cardinalidade $\#V$ (o número de elementos eleitos em cada época).

A escolha dos parâmetros acima referidos deve ser tentativamente ajustada, tendo em conta o número de pontos de guinada adotados, a resolução da malha em que o campo de velocidade do vento é conhecido e a escala espacial do problema.

4.2.1 Estratégia de diminuição da perturbação espacial

Ao longo do processo de otimização são efetuadas diversas perturbações espaciais nos pontos de guinada, de modo a realizar-se uma exploração mais profunda do espaço de pesquisa. No entanto, esta pesquisa espacial não pode apresentar ao longo das P , número de épocas definidas, a mesma amplitude de perturbação aplicada. Por forma a controlar as diferentes amplitudes de distribuição espacial, criou-se uma estratégia que garantisse o decrescimento das amplitudes ao longo das P definidas.

Seja i a i -ésima época e defina-se d_{AB} como a distância de A a B em milhas náuticas. A semi-amplitude máxima da perturbação espacial dos pontos de guinada aplicada em cada época i apresenta a seguinte expressão

$$\varepsilon(i) = d_{AB}e^{-\alpha i} \quad (4.8)$$

onde α representa uma taxa de decrescimento apropriada.

Postulando que variações de $\varepsilon = 0.5$ milhas nos pontos de guinada não determinam impacto significativo no trajeto otimizado, e que esta semi-amplitude deve ser atingida ao fim de P épocas, obtemos a seguinte expressão:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{d_{AB}}{0.5}\right)}{P} \quad (4.9)$$

A função exponencial negativa 4.8 determina a semi-amplitude da perturbação espacial aplicada aos pontos de guinada em cada *época*, ao longo do processo.

Esta variação de amplitude de perturbação observada ao longo das *épocas*, mimetiza o processo de lento arrefecimento típico do processo metalúrgico de recozimento.

Devido à complexidade do espaço de pesquisa e à influência da seleção de determinados dados de entrada, a aplicação desta função de diminuição das amplitudes de perturbação deve ser ajustada em coordenação com os parâmetros referidos.

Capítulo 5

Aplicação computacional: Desenvolvimento e apresentação

No presente Capítulo vai ser apresentada a implementação computacional do algoritmo *VSA* (simulação do reconhecimento vetorizada) através do qual serão determinadas as aproximações de trajetos percorridos em navegação à vela dum ponto *A* para um ponto *B* nas condições descritas no Capítulo anterior.

5.1 Aplicação computacional

O fluxograma do programa principal desenvolvido está esboçado na Figura 5.1. O esboço referido guiar-nos-á na descrição dos aspectos que são relevantes. No Apêndice A apresentamos as listagens das rotinas e sub-rotinas elaboradas que nos dispensamos de referir em detalhe. Os dados de entrada definidos pelo utilizador são:

- (1) As coordenadas cartesianas bidimensionais da localização do ponto de partida *A* e do ponto de chegada *B*. Sem perda de generalidade e por razões de simplicidade a unidade de distância considerada associada ao referencial é a milha náutica, estando as longitudes e latitudes geográficas associadas, respectivamente, aos eixos do *xx* e dos *yy*;
- (2) A escolha do campo de velocidade do vento e a sua resolução espacial caracterizada em termos dum submúltiplo da distância do trajeto direto de *A* para *B*, definido pelo utilizador. A escolha da resolução deverá ser compatível e acompanhar a variabilidade espacial do campo de velocidade do vento;
- (3) A escolha do passo espacial de integração numérica responsável pelo cálculo do tempo de percurso em trajetos rectilíneos (a resolução deve ser compatível e ser coerente com a variabilidade espacial da velocidade do vento);

- (4) Opção por considerar, ou não, a existência de zonas não transitáveis;
- (5) Escolha dos parâmetros de controlo da heurística VSA, nomeadamente o número M de pontos de guinada, o número de N de trajetos perturbados espacialmente em cada época, o número P de épocas (etapas associadas ao processo de diminuição a nível das perturbações espaciais aplicadas aos pontos de guinada) e finalmente o valor da amplitude perturbativa $\varepsilon(P)$ que deverá verificar-se na época final P e cuja aplicação se considerará produzir efeitos desprezáveis nos tempos de percurso. De referir que P e $\varepsilon(P)$, permitirão caracterizar posteriormente a taxa de diminuição α da perturbação espacial dos trajetos de época para época ao longo do processo. Uma pequena taxa de diminuição da perturbação determinará uma exploração do espaço de pesquisa mais minuciosa;
- (6) Escolha da opção de considerar no processo de cálculo, a consideração das perdas de velocidade que se verificam sempre que se fazem mudanças de bordo nas quais a proa passa pela linha de vento. Se a esta opção for adoptada os tempos de trajeto são calculados utilizando a função semi-empírica de penalização temporal apresentada e caracterizada anteriormente.

Seguidamente, as informações acabadas de referir são pré-processadas sendo criados os seguintes objetos:

- (7) A distância do trajeto direto do ponto A ao ponto B ;
- (8) A malha bidimensional com a informação da intensidade e da direção do vento na região da regata (região onde ocorrerão os percursos do ponto A para o ponto B gerados pela heurística). A região referida é um retângulo com vértices definidos pelas posições dos pontos A e B munido duma moldura envolvente com a largura igual à distância do trajeto direto entre A e B . A região de regata pode ser alargada no caso do utilizador considerar a possibilidade de existência de trajetos admissíveis em espaços mais vastos. De referir que a intensidade e direção do vento são o gradiente dum campo potencial de velocidade sintético definido pelo utilizador. O recurso a esta metodologia permite gerar campos de velocidade do vento realistas tendo em vista a execução de testes e validações da heurística;
- (9) A definição das zonas não transitáveis impondo como nulo o campo de velocidade do vento nas correspondentes zonas da malha bidimensional;

- **(10)** Estabelecimento da taxa α de diminuição da perturbação espacial ε dos pontos de guinada nos termos introduzidos no Capítulo anterior.

O processamento dos objetos acabados de definir permitem calcular seguidamente:

- **(11)** O tempo de viagem praticado no trajeto direto de A para B , podendo este tempo de viagem ser infinito. Esta situação pode verificar-se se no trajeto direto existirem pontos nos quais a velocidade do veleiro é nula (navegação “contra o vento” ou se se verificar a existência de pontos não transitáveis). O tempo de viagem é calculado por integração numérica recorrendo à regra dos trapézios e usando o passo espacial de integração definido inicialmente. O conhecimento da velocidade do veleiro em cada ponto do trajeto recorre ao conhecimento da intensidade e direção do vento nesse ponto que se obtém por interpolação bilinear a partir dos dados da malha bidimensional discreta que caracteriza a velocidade do vento no campo de regata e recorre igualmente ao polinómio trigonométrico que caracteriza a velocidade do veleiro em termos da intensidade do vento e ângulo de entrada do vento verdadeiro no veleiro. Este ângulo θ de entrada do vento é calculado conhecendo a direção do vento e o rumo do veleiro identificado com a direcção do trajeto retilíneo em consideração;
- **(12)** Estabelecimento duma população U de N trajetos de A para B aleatoriamente gerados constituídos por $M+1$ pernadas retilíneas devidamente concatenadas entre si por M pontos de guinada. A criação de cada um dos trajetos referidos é realizada gerando aleatoriamente coordenadas x e coordenadas y dos M pontos de guinada. As coordenadas x e y constituem eventos uniformemente distribuídos localizados em intervalos cuja amplitude, em longitude e latitude, permite que se situem no campo de regata considerado;
- **(13)** O tempo de viagem praticado em cada um dos trajetos em U . O cálculo do tempo de viagem em cada trajeto é efectuado adicionando o tempo de viagem calculado em cada uma das pernadas retilíneas que compõem o trajeto em causa e, se for esse o caso, será adicionado a cada trajeto o tempo de penalização verificado nas diferentes mudanças de bordo realizadas ao longo do percurso. Os cálculos são realizados por integração numérica da forma descrita em (11);
- **(14)** Estabelecimento duma nova população $U(0)$ com N trajetos constituída

pelos melhores $N/2$ trajetos avaliados em (13). Naturalmente esta nova população de trajetos é constituída por trajetos repetidos dois a dois.

Nesta fase de desenvolvimento da heurística:

- **(15); (16); (17)** A taxa de diminuição α da perturbação espacial dos trajetos, de época para época, ao longo do processo, é estabelecida.

Tendo por base a população $U(0)$ de trajetos já definida, o número de épocas P (número total de iterações que serão concretizadas) e o valor da semi-amplitude da perturbação espacial $\varepsilon(i)$ a aplicar à posição de cada ponto de guinada em cada época $i=0,1,\dots,P$, o algoritmo executa um processo iterativo realizando as seguintes operações em cada época i :

- **(18)** Perturbação da posição espacial de todos os pontos de guinada dos diferentes trajetos da população $U(i)$. A referida perturbação espacial consiste em adicionar às posições dos diferentes pontos de guinada um desvio (centrado em zero) aleatório, uniformemente distribuído com uma semi-amplitude $\varepsilon(i)$. O valor da semi-amplitude decresce exponencialmente com a taxa α ;
- **(19)** Avaliação dos tempos de viagem dos trajetos que integram a população $U(i)$ perturbada;
- **(20)** Estabelecimento duma nova população $U(i+1)$ com N trajetos constituída pelos melhores $N/2$ trajetos acabados de avaliar. Naturalmente esta nova população de trajetos também é constituída por trajetos repetidos dois a dois.

Após a repetição das acções (18), (19) e (20) até à iterada $i=P$, o trajeto da população $U(P)$ a que corresponde o menor tempo de viagem será adoptado como a aproximação heurística do trajeto que permite navegar à vela do ponto A para o ponto B no tempo mínimo.

5.2 Generalidades

Como foi referido, os detalhes da programação podem ser consultados na listagem das rotinas e sub-rotinas elaboradas, que se encontram no Apêndice A.

De salientar as seguintes particularidades:

- A execução do programa gera um ficheiro *.mat* com todos os dados, respetivos valores e configurações utilizadas inicialmente, bem como, os dados e respetivos valores resultantes dos cálculos efetuados.

- A posterior leitura e pós-processamento dos dados anteriores permite gerar e gravar gráficos representativos e ilustrativos das simulações numéricas efetuadas, tais como gráficos com a representação do campo de velocidade do vento e dos trajetos ótimos aproximados determinados pela heurística, entre outros.

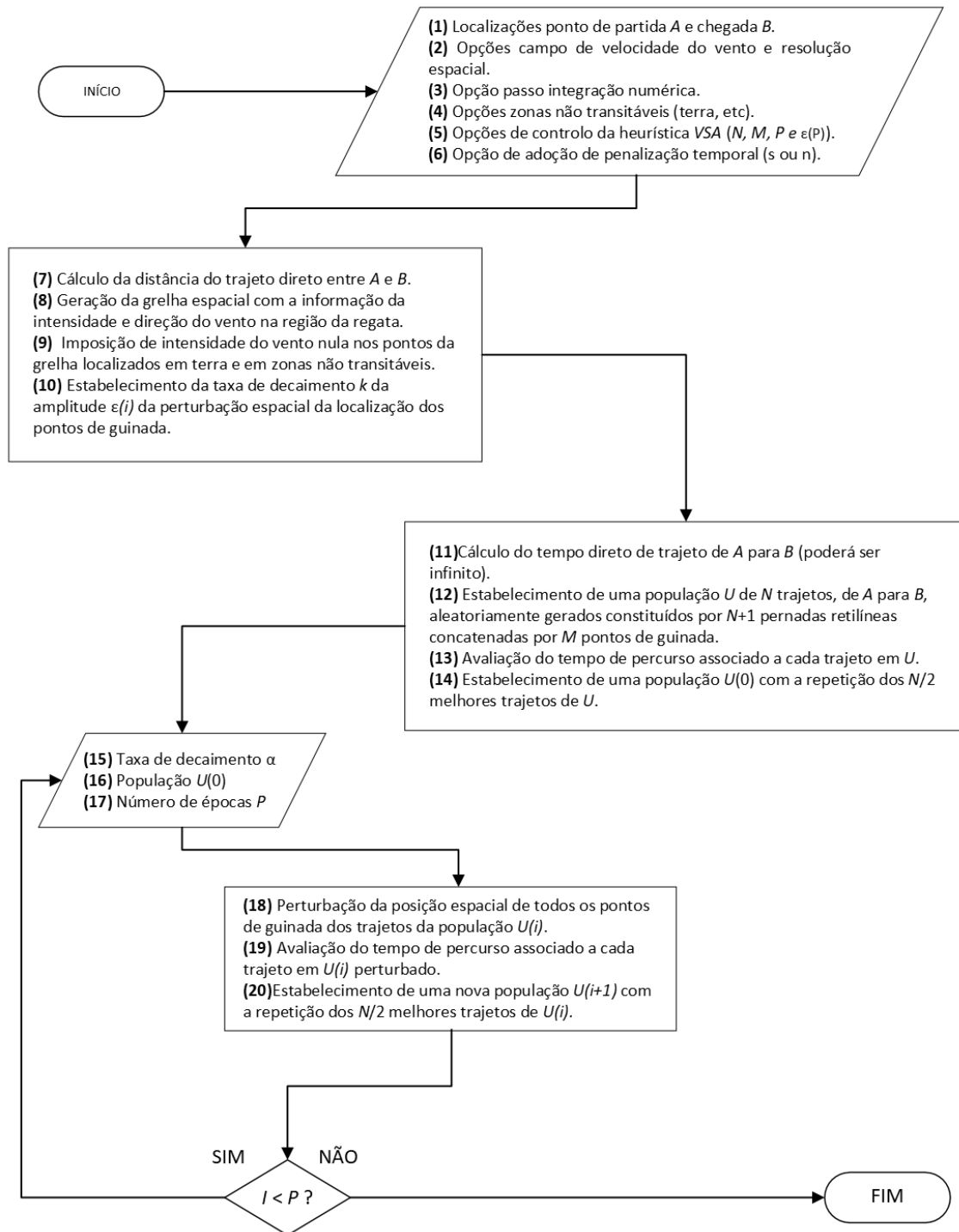


FIGURA 5.1: Fluxograma do programa principal otv

Capítulo 6

Simulações numéricas e discussão

Neste Capítulo realizaremos simulações numéricas com o objetivo de testar a aplicação heurística VSA quanto à efetividade na determinação de aproximações de trajetórias ótimas. A generalidade dos resultados das simulações numéricas serão apresentados em gráficos nos quais o ponto de partida A , o ponto de chegada B , o trajeto e a sua duração, determinados pela heurística e o campo de velocidade do vento são esboçados.

Por uma questão de simplicidade, utilizaremos coordenadas cartesianas para descrever localizações geográficas relativas ao campo de vento com os respectivos percursos, identificando as direções este-oeste e norte-sul com os eixos coordenados X e Y , respetivamente. A unidade de distância utilizada neste referencial será a milha náutica.

Em todas as simulações, utilizaremos os dados relativos ao "NRP Sagres", um grande veleiro com armação de barca. Nas simulações o ponto A (ponto de partida) e o ponto B (ponto de chegada), localizam-se no mesmo meridiano, separados entre si por uma distância de cerca de 60 milhas náuticas, nas posições $(0,-30)$ e $(0,30)$ do sistema de coordenadas presente.

Na Secção 6.1, é adotado preliminarmente um ambiente simplificado com o intuito de confirmar a efetividade da aplicação em condições de vento uniforme e verificar o efeito da função de penalização temporal (4.7). Consideraremos nestas simulações um vento Norte, constante e uniforme, com 10 nós de intensidade.

Na Secção 6.2, realizamos diversas simulações exploratórias que têm por objetivo verificar a robustez da heurística e simultaneamente determinar os valores dos principais parâmetros controladores do processo de otimização nas condições testadas (não uniformidade da velocidade do vento, escalas espaciais/temporais do problema). Como foi referido no Capítulo 5, os parâmetros principais cujo ajuste

regulam o processo de otimização são o número P de épocas, a dimensão N da população de trajetos e o número de pontos de guinada M .

Na Secção 6.3, exploraremos os resultados fornecidos pela heurística utilizando diferentes números de pontos de guinada na determinação de trajetórias aproximadas.

Nesta Secção e seguintes, utilizamos um mesmo campo de velocidade de vento não uniforme gerado sinteticamente a partir dum campo potencial de velocidade.

Por fim, na Secção 6.4, adicionaremos zonas de terra e/ou obstáculos, que devem ser evitados ao longo do percurso, tendo por objetivo testar a eficiência da heurística proposta na criação de trajetórias ótimas alternativas na presença de bloqueios.

As simulações numéricas foram realizadas com recurso ao programa MATLAB, num computador equipado com processador Intel® i7- 6650U Dual Core™ e 16GB de memória RAM.

6.1 Vento uniforme: Simulações preliminares e penalização temporal

Como foi referido, iremos apresentar simulações numéricas realizadas com vento uniforme para verificar a efetividade da heurística num ambiente mais simples e testar a efetividade do modelo semi-empírico de penalização temporal associado à execução de mudanças de rumo em cada ponto de guinada.

Nas Figuras 6.1 e 6.2 estão representados os trajetos determinados pela técnica desenvolvida com a utilização de dois pontos de guinada.

Na simulação representada na Figura 6.1 o processo de otimização desenvolveu-se sem aplicar qualquer penalização temporal às mudanças de bordo que ocorrem nos pontos de guinada. Na simulação representada na Figura 6.2, pelo contrário, a heurística considerou a aplicação do modelo de penalização temporal apresentado e discutido no Capítulo 4, expressão (4.7).

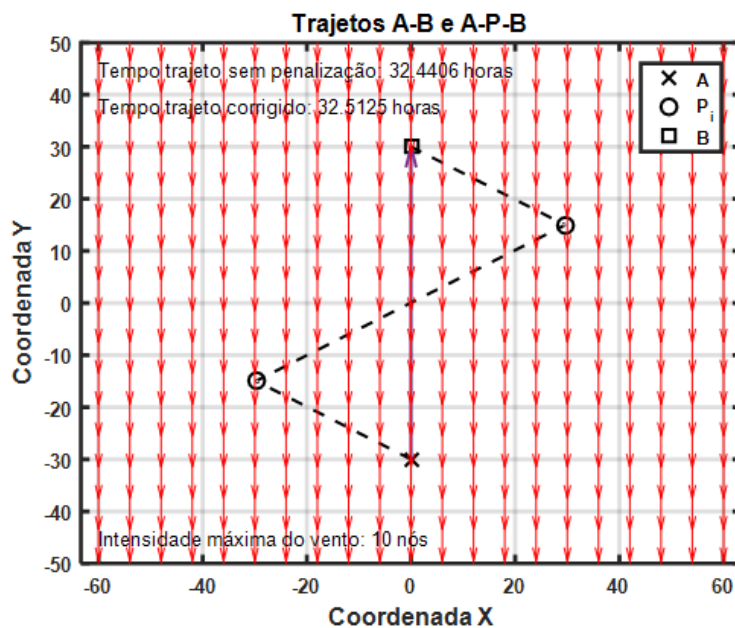


FIGURA 6.1: Trajetória ótima com 2 pontos de guinada sem utilizar a função penalizadora

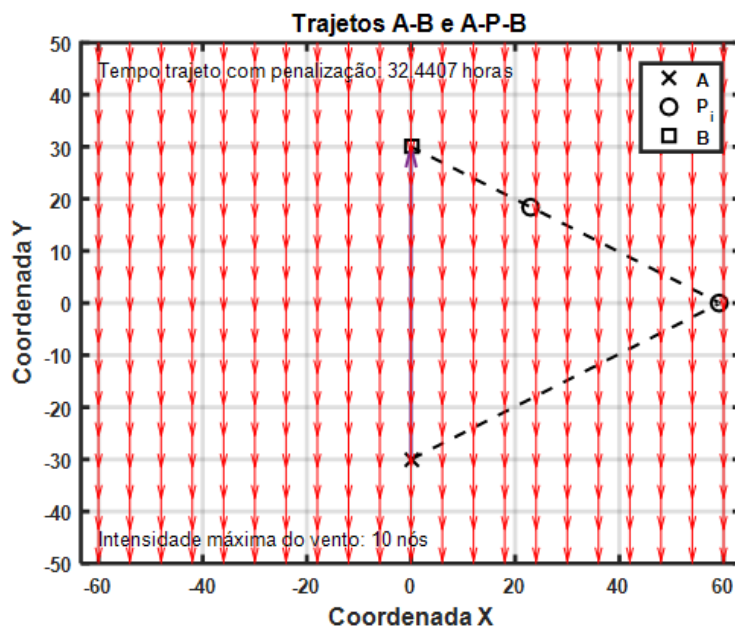


FIGURA 6.2: Trajetória ótima com 2 pontos de guinada, tendo em consideração a função penalizadora

Na Tabela 6.1 apresentamos resumidamente os principais resultados das simulações efectuadas.

2 pontos de guinada	Sem penalização	Com penalização
Dimensão da população	400	400
Número de épocas	500	500
Tempo de trajeto [hora]	32.4406	32.4407
Tempo de trajeto corrigido [hora]	32.5125	—

TABELA 6.1: Parâmetros de controlo e resultados

O melhor trajeto determinado sem utilizar a função penalizadora foi percorrido em 32.4406 hora. Na Figura 6.1 podemos observar a ocorrência de duas francas mudanças de bordo que ocorreram em cada um dos dois pontos de guinada. Se aplicarmos a este trajeto a penalização temporal associada à execução das mudanças de rumo observadas, o tempo de percurso é incrementado em 0.0719 hora. Obtemos desta forma um tempo de percurso corrigido de 32.5125 hora. Tendo em conta que as mudanças de bordo observadas nos pontos de guinada determinam reais diminuições de velocidade dos veleiros, o tempo de percurso corrigido é mais realista.

O trajeto ótimo determinado utilizando a função penalizadora temporal foi percorrido em 32.4407 hora. Na Figura 6.2 podemos observar que o trajeto gerado apresenta apenas uma única franca mudança de bordo num ponto de guinada. Duas das três pernadas do trajeto são colineares. A heurística ajustou as pernadas de forma a minimizar o efeito da aplicação das penalizações temporais associadas às francas mudanças de bordo. Podemos concluir que na situação testada a utilização da função de penalização temporal permite gerar percursos mais rápidos (32.4407 hora em vez de 32.5125 hora).

6.2 Vento não uniforme: robustez da heurística

Nesta secção e seguintes utilizaremos o mesmo campo de velocidades gerado sinteticamente a partir de um campo potencial de velocidade.

Como se referiu introdutoriamente, as simulações realizadas nesta secção terão como principal objetivo estudar a robustez da heurística e simultaneamente determinar os valores utilizáveis dos principais parâmetros controladores do processo de otimização nas condições das simulações, nomeadamente o número P de épocas, a dimensão N da população de trajetos e o número M de pontos de guinada.

Nas Figuras 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7, são realizadas simulações com 2 pontos de guinada utilizando os parâmetros de controlo seguidamente tabelados:

2 pontos de guinada	Fig. 6.3	Fig. 6.4	Fig. 6.5	Fig. 6.6	Fig. 6.7
Número P de épocas	25	25	50	250	1000
Dimensão N da população	26	50	50	100	400
Duração do trajeto [hora]	31.3102	27.897	25.6087	25.6052	25.6039

TABELA 6.2: Parâmetros de controlo e resultados

De simulação para simulação os parâmetros de controlo (P e N) foram sucessivamente incrementados, como se pode observar na Tabela 6.4.

Nas Figuras 6.3 e 6.4 podemos constatar que o espaço de pesquisa não foi devidamente explorado pela heurística. Os trajetos propostos não são homólogos, nem correspondem a traçados que se aproximem do ótimo global (como se verá).

Nas Figuras 6.5, 6.6 e 6.7 os trajetos propostos já são homólogos e o seu traçado genérico manter-se-á idêntico em todas as simulações numéricas realizadas utilizando populações de suficiente dimensão ($N \geq 100$) e um número suficientemente grande de épocas ($P \geq 250$).

A duração dos trajetos propostos, à medida que os valores dos parâmetros de controlo modificados são incrementados, diminui de simulação para simulação, como seria de esperar. Uma mais completa exploração do espaço de pesquisa do problema permite encontrar melhores trajetos.

Como a geração aleatória de trajetos efectuada pela heurística durante o processo de otimização é efetuada com diferentes inicializações do motor de geração de números aleatórios do programa utilizado, os resultados sugerem a robustez do algoritmo desde que os parâmetros de controlo referidos sejam adequadamente ajustados.

Duas outras características das heurísticas de otimização são também muito importantes: a fiabilidade e a eficiência (num sentido estrito). A fiabilidade diz respeito à qualidade ótima dos trajetos propostos. A eficiência (num sentido estrito) caracteriza a aplicabilidade da heurística à escala espacial e temporal do problema.

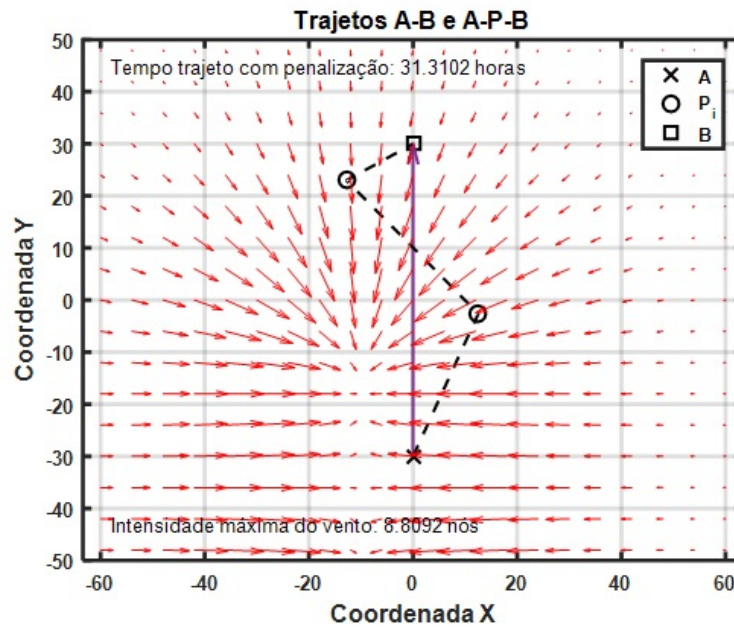


FIGURA 6.3: Simulação com 2 pontos de guinada, n^o épocas-25, dimensão populacional-26

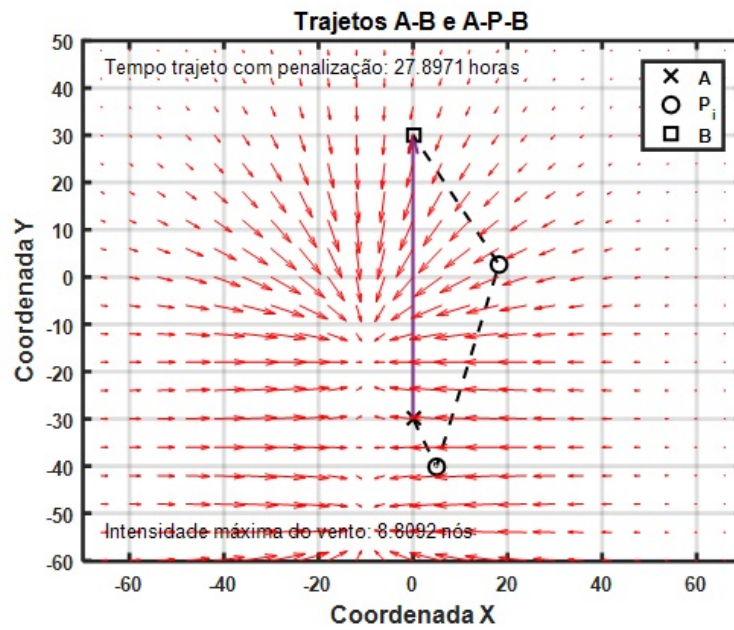


FIGURA 6.4: Simulação com 2 pontos de guinada, n^o épocas-25, dimensão populacional-50

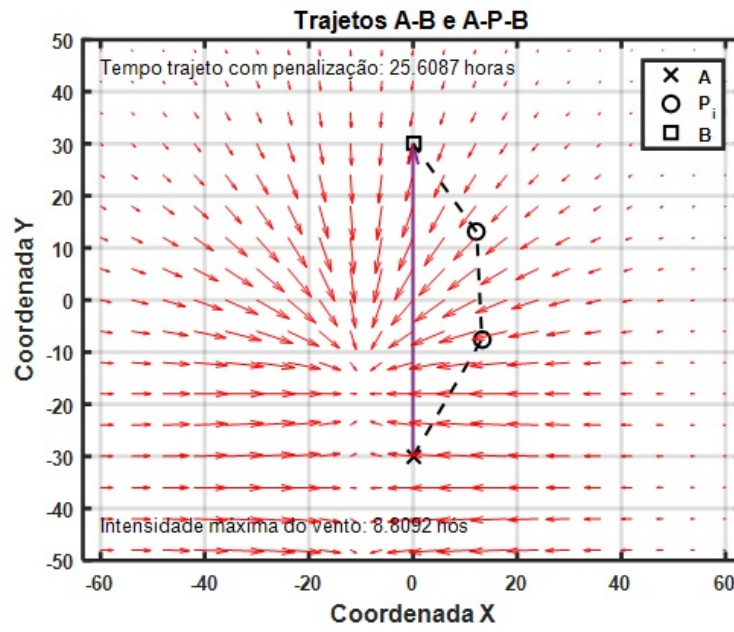


FIGURA 6.5: Simulação com 2 pontos de guinada, n^o épocas-50, dimensão populacional-50

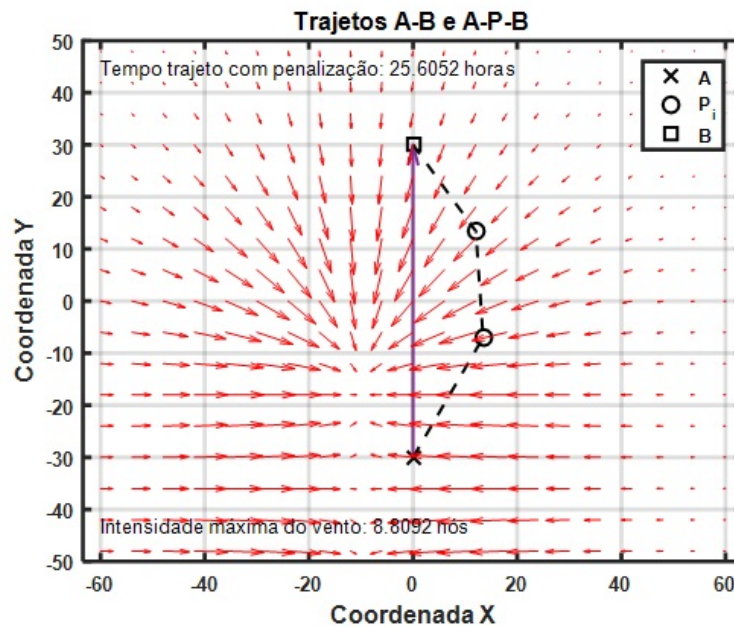


FIGURA 6.6: Simulação com 2 pontos de guinada, n^o épocas-250, dimensão populacional-100

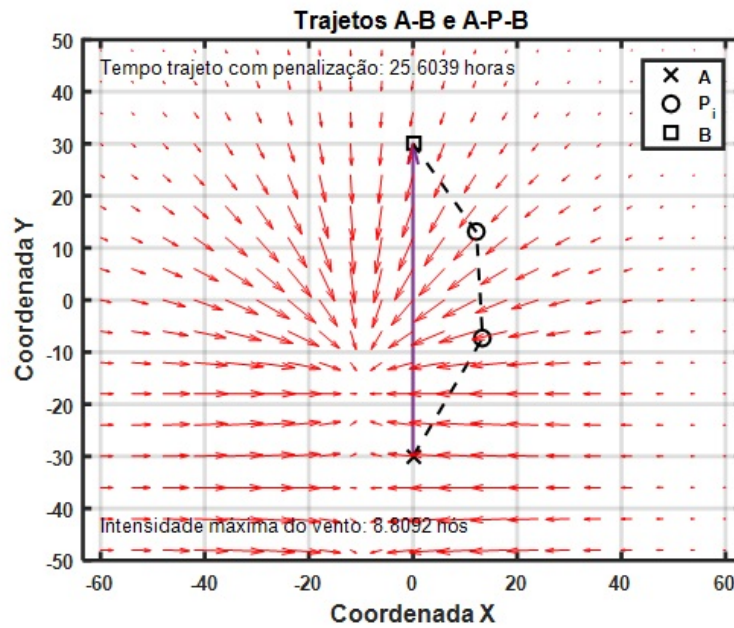


FIGURA 6.7: Simulação com 2 pontos de guinada, n° épocas-1000, dimensão populacional-400

Dada a complexidade do problema em estudo, a discussão rigorosa da fiabilidade da heurística *VSA* exigiria a comparação dos seus resultados com resultados propostos por outras heurísticas e técnicas de resolução deste problema. Nesta dissertação a discussão da fiabilidade resumir-se-á a considerações relativas à credibilidade das soluções oferecidas.

A eficácia da heurística será apresentada e discutida na Secção 6.5.

6.3 Campo de velocidade de vento estacionário e não uniforme

Na Tabela 6.3 resumimos os principais parâmetros de controlo e dados de saída nas simulações realizadas. A função de penalização temporal foi utilizada em ambas as simulações tendo em vista obter trajetos mais realistas.

Com penalização	2 pontos de guinada	5 pontos de guinada
Dimensão da população	400	1000
Número de épocas	1000	1000
Tempo de trajeto [hora]	25.6041	23.7942

TABELA 6.3: Parâmetros de controlo e resultados

Na simulação que originou a Figura 6.8 utilizámos 2 pontos de guinada, populações de trajetos com 400 representantes e 1000 épocas. Na simulação que originou a Figura 6.9 utilizámos 5 pontos de guinada, populações de trajetos com 1000 representantes e 1000 épocas. De referir que a utilização de mais pontos de guinada exige a consideração de populações com um maior número de representantes, tendo em vista acompanhar o aumento da dimensão do espaço de pesquisa.

Observando as Figuras 6.8 e 6.9 constatamos que as trajetórias geradas são equivalentes. O trajeto gerado com 5 pontos de guinada é percorrido em 23.7942 hora. O trajeto gerado com 2 pontos de guinada é percorrido em 25.6041 hora.

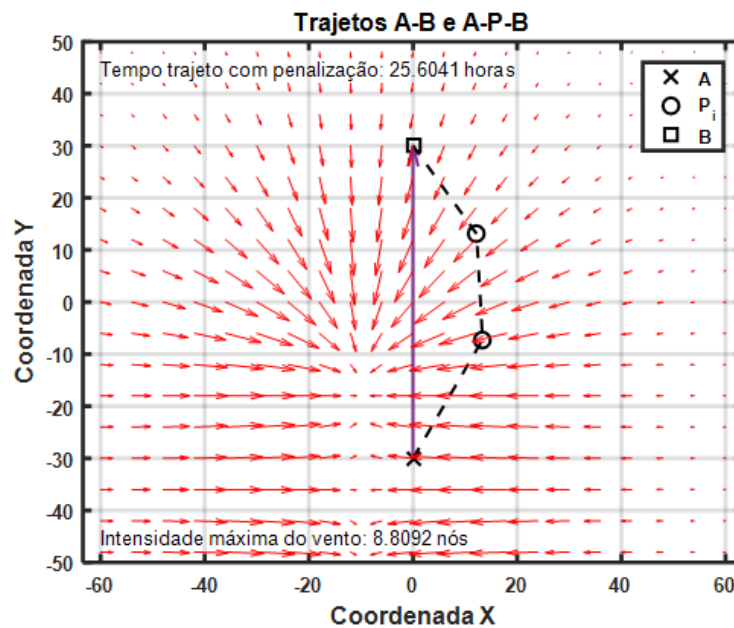


FIGURA 6.8: Trajetória ótima com 2 pontos de guinada

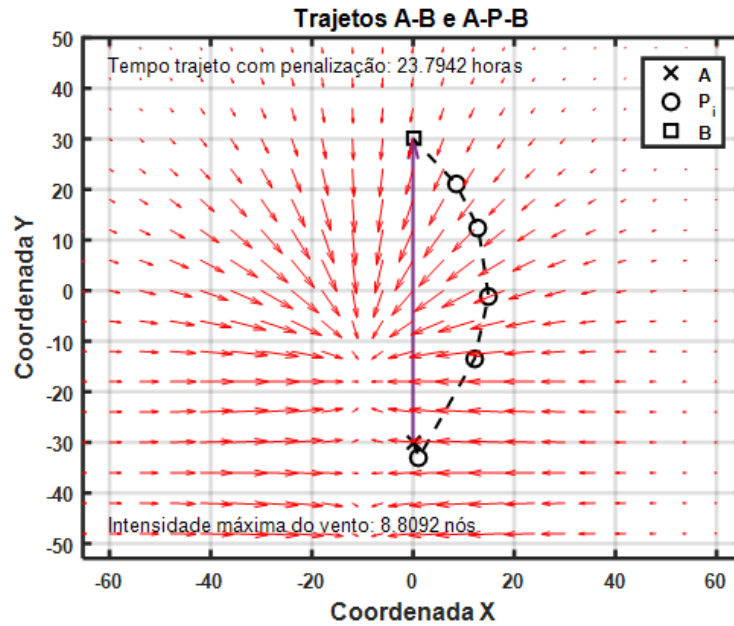


FIGURA 6.9: Trajetória ótima com 5 pontos de guinada

Claramente, a utilização de mais pontos de guinada na Figura 6.8 permite uma melhor adaptação das trajetórias geradas pela técnica *VSA*, à variabilidade espacial do campo de velocidade do vento gerando trajetos percorridos em menor tempo.

6.4 Vento não uniforme - presença de massas de terra

Com o intuito de testar o comportamento verificado pelo método *Vectorized Simulated Annealing* na presença de massas de terra, recorreu-se à utilização de campos de velocidade do vento com as mesmas condições ambientais que as utilizadas nas simulações anteriores, como se pode observar nas Figuras 6.10 e 6.11.

Com penalização	5 pontos de guinada	10 pontos de guinada
Dimensão da população	100	400
Número de épocas	1000	1100
Tempo de trajeto [hora]	41.8805	39.6744

TABELA 6.4: Parâmetros de controlo e resultados

6. Simulações numéricas e discussão

Para este efeito, posicionámos uma ilha circular, com centro (15, 0) e raio de 10 milhas, na região de passagem das trajetórias ótimas determinadas na secção anterior. A localização desta zona de terra é representada nas Figuras 6.10 e 6.11 com o símbolo '*' a azul.

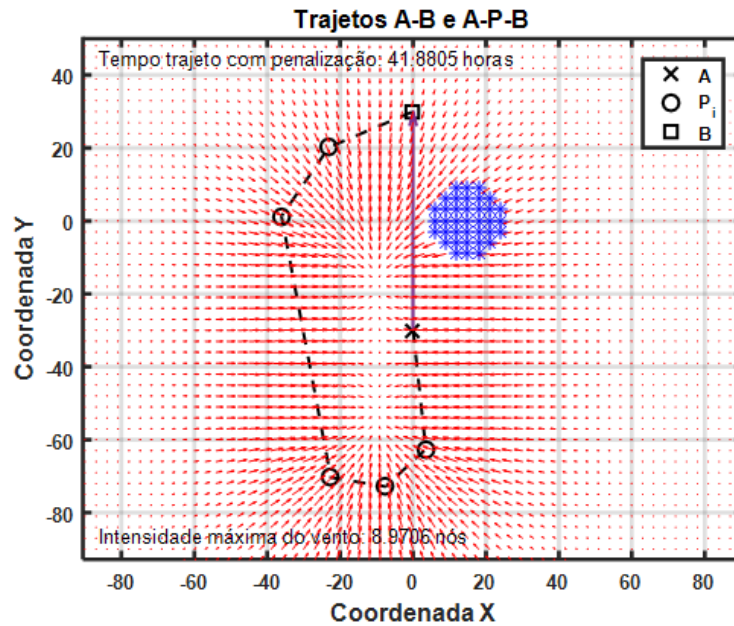


FIGURA 6.10: Trajetória ótima com 5 pontos de guinada, com presença de obstáculo

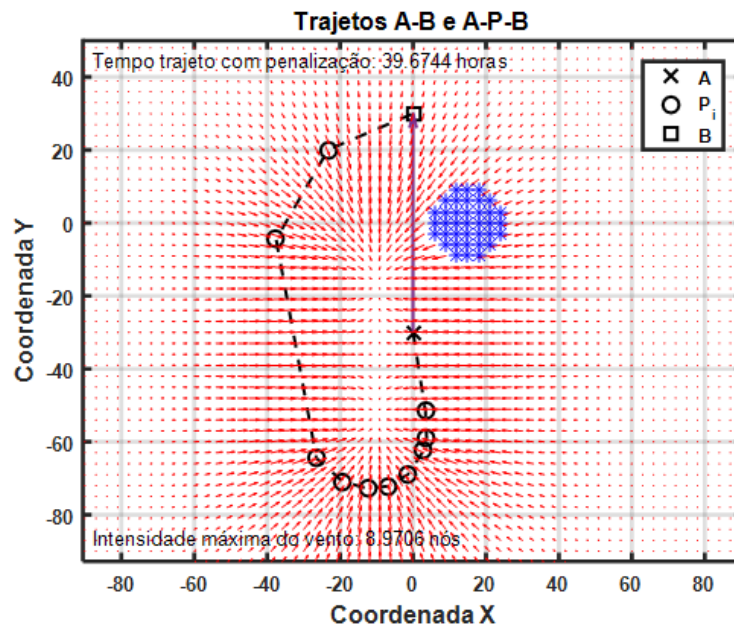


FIGURA 6.11: Trajetória ótima com 10 pontos de guinada, com presença de obstáculo

Como podemos averiguar nas simulações apresentadas nestas figuras, apesar de na Figura 6.10 serem considerados cinco pontos de guinada, enquanto que na Figura 6.11 dez pontos de guinada, as trajetórias ótimas geradas são idênticas embora representem diferentes aproximações da trajetória ótima procurada. Podemos ainda afirmar, que as trajetórias ótimas geradas constituem percursos alternativos credíveis que evitam as massas de terra.

Em ambas as simulações os pontos de guinada estão concentrados nas áreas de maior variabilidade espacial do campo de velocidade do vento, como observado nas simulações analisadas anteriormente. A trajetória aproximada com dez pontos de guinada da Figura 6.10 é realizada em menos tempo (39.6744 hora) do que a trajetória com cinco pontos de guinada na Figura 6.11 (41.8805 hora).

Tal como observámos na secção anterior, podemos constatar que a utilização de mais pontos de guinada permite uma melhor adaptação das trajetórias geradas pela técnica *VSA*, à variabilidade espacial do campo de velocidade do vento.

A capacidade de gerar trajetórias ótimas alternativas perante a presença de um obstáculo no estabelecimento do trajeto ótimo, certifica a credibilidade das respostas do programa face às condições e parâmetros previamente determinados.

6.5 Tempo de cálculo

Como foi referido no Capítulo 5, a escolha adequada de determinados dados de entrada permite um desempenho mais eficiente do algoritmo desenvolvido. Tendo em vista assegurar a convergência eficaz da heurística *VSA* para a trajetória ótima, torna-se necessário ajustar tentativamente e articuladamente os principais parâmetros de controlo:

- Número de pontos de guinada, M ;
- Dimensão populacional, N ;
- Número de épocas, P .

Como referido anteriormente, a convergência e o custo computacional desta técnica estão dependentes dos parâmetros referidos, como se pode observar através da Figura 6.12, que apresenta a evolução do tempo do melhor trajeto de cada época, a qual nos dá indicações relativamente à convergência desta heurística. De facto, nos cálculos associados às últimas épocas consideradas, podemos observar a presença de

um planalto que confirma a convergência dos cálculos. A figura mencionada diz respeito à simulação apresentada na Figura 6.11.

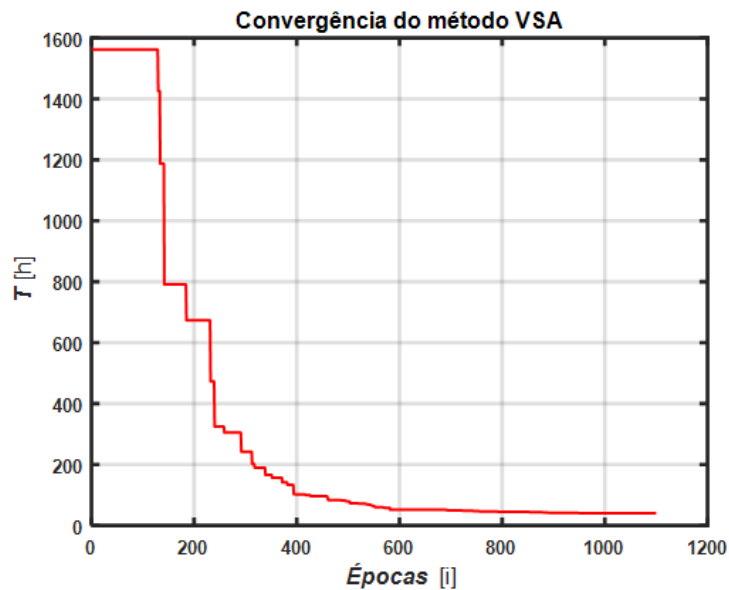


FIGURA 6.12: Evolução do tempo mínimo de trajeto com o decorrer das épocas

Nas Tabelas 6.5 e 6.6 apresentamos os tempos de cálculo (Tempo de CPU) dispendidos nas simulações numéricas apresentadas nas Secções 6.3 e 6.4 e os correspondentes parâmetros de controlo utilizados.

Figura 6.8	Figura 6.9
Pontos de guinada: 2	Pontos de guinada: 5
Dimensão da população: 400	Dimensão da população: 1000
Épocas: 1000	Épocas: 1000
Tempo de <i>CPU</i> : 630s ≈ 11 min	Tempo de <i>CPU</i> : 3504s ≈ 58 min

TABELA 6.5: Dados das simulações representadas das Figuras 6.8 e 6.9

Figura 6.10	Figura 6.11
Pontos de guinada: 5	Pontos de guinada: 10
Dimensão da população: 100	Dimensão da população: 400
Épocas: 1000	Épocas: 1100
Tempo de <i>CPU</i> : 392s ≈ 7 min	Tempo de <i>CPU</i> : 2992s ≈ 50 min

TABELA 6.6: Dados das simulações representadas das Figuras 6.10 e 6.11

De referir que a dimensão do espaço de pesquisa em cada situação ditou a necessidade de ajustar/escolher diferenciadamente os parâmetros de controlo principais, nomeadamente o número de pontos de guinada (compatível com a variabilidade espacial do campo de velocidade do vento), a dimensão da população de trajetos e o número de épocas. Este facto originou naturalmente tempos de cálculo que refletem o mesmo.

Na Tabela 6.7 apresentamos o tempo de cálculo de cada uma das simulações assinaladas, referido a cada ponto de guinada, trajeto e época. Constatamos que este valor é aproximadamente igual a $7e - 04$ e $9e - 04$ segundos de CPU. O valor médio deste parâmetro nas simulações efetuadas sem presença de obstáculos, $8e - 04$ segundos de CPU, pode ser utilizado para antecipar o impacto nos cálculos dos tempos resultantes das escolhas do número de épocas adotado, da dimensão da população e do número de pontos de guinada, e alcançar um melhor equilíbrio entre eles.

Figura 6.1	Figura 6.2	Figura 6.8	Figura 6.9	Figura 6.10	Figura 6.11
9.8e - 04 s	9.1e - 04 s	7.8e - 04 s	7e - 04 s	7.8e - 04 s	6.8e - 04 s

TABELA 6.7: Tempos de cálculo das simulações

Este parâmetro pode portanto servir para uma estimativa antecipada do tempo de cálculo decorrente da escolha de valores empiricamente recomendados para os parâmetros de controlo. O cruzamento da estimativa do tempo de cálculo acabada de referir com a escala temporal do problema (ordem de grandeza do tempo de trajeto) permite expeditamente verificar a exequibilidade de utilização prática da heurística *VSA* desenvolvida.

Na Tabela 6.8 apresentamos a fração do tempo de cálculo dispendido relativamente ao tempo de trajeto calculado. Podemos constatar que esta fração é inferior a 5% do tempo de percurso, ou seja, uma pequena parte do tempo necessário para realizar o trajeto. A heurística desenvolvida é, portanto, eficaz (em sentido estrito).

Figura 6.1	Figura 6.2	Figura 6.8	Figura 6.9	Figura 6.10	Figura 6.11
3.14e - 3 s	3.12e - 3 s	6.83e - 3 s	4.09e - 2 s	2.6e - 3 s	2.1e - 2 s

TABELA 6.8: Fração de tempo de cálculo dispendido relativamente ao tempo de percurso de cada simulação

Este facto confirma a aplicabilidade desta metodologia à resolução do problema formulado no presente contexto (determinação de aproximações a trajetos navegáveis à vela em tempo mínimo).

Capítulo 7

Conclusões e Trabalho Futuro

7.1 Conclusões

Neste trabalho desenvolvemos a heurística VSA (Vectorized Simulated Annealing) destinada a determinar trajetórias dum ponto A para o ponto B, percorridas em tempo mínimo por veleiros em condições de vento estacionário mas não uniforme.

A heurística desenvolvida estendeu às condições meteorológicas referidas as heurísticas de otimização desenvolvidas no passado recente por (Fedorchuk 2020) e (Costa 2021), estas últimas aplicáveis em situações de vento uniforme.

As heurísticas referidas inspiram-se na técnica da simulação do recozimento cujo conceito é aplicado a um conjunto de trajetos (conjunto de “vetores”) definidos por sucessões de pontos de guinada cujas posições espaciais são espacialmente perturbadas no decurso do processo de otimização.

Como foi referido, para além da otimização considerar condições meteorológicas mais complexas (ventos não uniformes) acrescentámos a possibilidade da heurística VSA gerar trajetos que evitam zonas passagem proibida tais como zonas de terra, obstáculos, etc.

O diagrama polar de velocidade utilizado nas simulações numérica foi modelado recorrendo a um polinómio trigonométrico aproximador dos dados polares de velocidade do Navio Escola Sagres (grande veleiro com armação de barca).

Nas simulações numéricas adoptou-se a utilização permanente da função de penalização temporal (associada à realização de mudanças de bordo nos pontos de guinada) tendo em vista garantir a obtenção de trajectos mais realistas.

As simulações numéricas foram realizadas recorrendo a campos de velocidade do vento gerados sinteticamente a partir de campos potenciais de velocidade. As simulações numéricas realizadas sugerem que:

1. A utilização da função de penalização temporal contribui para gerar trajetos mais realistas. Naturalmente o correspondente modelo semi-empírico de penalização deverá ser ajustado de forma realista às características do veleiro cujo trajeto em tempo mínimo se procura aproximar;
2. A aplicação desenvolvida é robusta. Com efeito, apesar da inicialização da aplicação desenvolvida estar baseada em trajetos iniciais gerados aleatoriamente (e diferentes em cada execução da heurística) é capaz de propor trajetos ótimos idênticos (ou equivalentes) desde que os principais parâmetros de controlo do processo de otimização se encontrem devidamente ajustados (resolução espacial do campo de velocidade do vento, passo espacial de integração numérica, número de pontos de guinada, número de trajetos em cada época, número de épocas e taxa de diminuição da amplitude da perturbação espacial a aplicar ao longo do processo);
3. Na ausência de um processo de validação e comparação de resultados que se tenciona realizar num futuro próximo recorrendo a aplicações desenvolvidas por outras equipas. As respostas oferecidas pela heurística, desde que os principais parâmetros de controlo do processo de otimização se encontrem devidamente ajustados, são credíveis, isto é, são coerentes com escolhas de trajetos efectuadas por velejadores experientes. A credibilidade referida diz respeito também aos trajetos propostos em situações em que existem zonas de passagem proibidas e obstáculos;
4. A heurística desenvolvida é eficaz no contexto da aplicação para a qual foi desenhada tendo em conta as escalas espaciais e temporais do problema abordado. Com efeito, os tempos de cálculo constituem uma fração diminuta dos tempos de trajeto propostos (inferiores a 5% do tempo de trajeto).

Quanto ao algoritmo, a geração aleatória de trajetos sustentada em inicializações do motor de geração de números aleatórios do programa, comprova não só a robustez da heurística através dos resultados de tempo de trajetos obtidos com os diferentes tipos de simulações, como a fiabilidade e eficiência dos trajetos gerados, face aos campos de velocidade do vento propostos.

A aplicação desenvolvida parece portanto apropriada (devidamente convertida para uma linguagem apropriada), não só, para integrar a biblioteca de programas de veleiros autónomos e/ou robóticos em desenvolvimento tendo em vista apoiar o sistema de navegação destes meios, como também de integrar sistemas de apoio à decisão em veleiros não autónomos.

7.2 Trabalho Futuro

Perspetivam-se os seguintes desenvolvimentos do presente trabalho:

- Comparar os resultados oferecidos pela técnica heurística *VSA* com os resultados oferecidos por outras abordagens do mesmo problema, avaliando os méritos e deméritos da metodologia proposta;
- Melhorar a eficiência computacional da técnica heurística *VSA*, no que diz respeito à fiabilidade, robustez e custo computacional, automatizando a escolha dos principais parâmetros de cálculo responsáveis pela convergência e eficiência da metodologia proposta;
- Desenvolver uma *GUI* (Interface Gráfica do Usuário) com os parâmetros de entrada possíveis de selecionar numa fase de pré-processamento do algoritmo, de modo a permitir a utilização do programa de forma mais intuitiva;
- Dotar a técnica heurística *VSA* da possibilidade de otimizar trajetos de veleiros em condições de vento não estacionário e não uniforme;
- Complementar a técnica heurística *VSA* com a possibilidade de considerar os efeitos das correntes oceânicas, correntes de maré, assim como da deriva;
- Integrar no programa todos os fatores adicionais que influenciam a navegação de uma embarcação, como as condições do vento, o estado do mar, restrições de visibilidade e condições de gelo, de modo a criar uma ferramenta de otimização multiobjetivo para *weather routing*, o mais realista possível.

Bibliografia

- Bellman, Richard (1952). «On the theory of dynamic programming». Em: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 38.8, p. 716.
- Brandão, Humberto, Germano Vasconcelos e Guilherme Alvarenga (out. de 2006). «A Multi-Start Simulated Annealing Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows». Em: pp. 137–142. DOI: 10.1109/SBRN.2006.4.
- Bueno, Fabrício (2009). «Métodos Heurísticos». Em: *Teoria e implementações. Arranguá: IFSC*.
- Chen, Henry (1978). «A dynamic program for minimum cost ship routing under uncertainty». Tese de mestrado. Massachusetts Institute of Technology.
- Coraddu, Andrea, Luca Oneto, Francesco Baldi e Davide Anguita (2017). «Vessels fuel consumption forecast and trim optimisation: A data analytics perspective». Em: *Ocean Engineering* 130, pp. 351–370. ISSN: 0029-8018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.11.058>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801816305571>.
- Costa, Teresa Vidinha da (2021). «Otimização, em tempo real, de trajetórias de veleiros». Tese de mestrado. Escola Naval.
- Engelbrecht, Andries P (2007). *Computational intelligence: an introduction*. John Wiley & Sons.
- Fedorchuk, Martin (2020). «Otimização de trajetórias de veleiros». Tese de mestrado. Escola Naval.
- Fernandes, Pedro Miguel de Castro (2016). «Projeto e Construção de um Veleiro Autônomo, utilizando materiais compósitos, Impressão a 3D e Aprendizagem Máquina». Tese de mestrado. Escola Naval.
- Glover, Fred (1989). «Tabu search—part I». Em: *ORSA Journal on computing* 1.3, pp. 190–206.
- Jia, Hongmei, Yang Li, Bo Dong e Hongying Ya (nov. de 2013). «An Improved Tabu Search Approach to Vehicle Routing Problem». Em: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 96, pp. 1208–1217. DOI: 10.1016/j.sbspro.2013.08.138.

- Knopman, J. e J.S. Aude (1996). «Algoritmos Genéticos e de Simulated Annealing: Aplicação ao Problema de Placement e Técnicas de Paralelização». Tese de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Kosmas, O.T. e D.S. Vlachos (2012). «Simulated annealing for optimal ship routing». Em: *Computers Operations Research* 39.3, pp. 576–581. ISSN: 0305-0548. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.05.010>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054811001341>.
- Lin, Yu-Hsien, Ming-Chung Fang e Ronald W. Yeung (2013). «The optimization of ship weather-routing algorithm based on the composite influence of multi-dynamic elements». Em: *Applied Ocean Research* 43, pp. 184–194. ISSN: 0141-1187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2013.07.010>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141118713000679>.
- Linden, Richard (2008). *Algoritmos Genéticos: Uma importante ferramenta da inteligência computacional*. Brasport.
- Lopes, Simão Mendes (2016). «Previsão de Trajetórias de Veículos Aéreos pela Abordagem da Máquina de Suporte Vetorial». Tese de mestrado. Universidade da Beira Interior.
- Metropolis, Nicholas, Arianna W Rosenbluth, Marshall N Rosenbluth, Augusta H Teller e Edward Teller (1953). «Equation of state calculations by fast computing machines». Em: *The journal of chemical physics* 21.6, pp. 1087–1092.
- Mota, J. . S. (2014). «Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento-aplicação prática ao NRP sagres». Tese de mestrado. Escola Naval.
- Padhy, Chinmaya Prasad, Debabrata Sen e Prasad Kumar Bhaskaran (2008). «Application of wave model for weather routing of ships in the North Indian Ocean». Em: *Natural Hazards* 44.3, pp. 373–385.
- Press, William H, BP Flannery, SA Teukolsky e WT Vetterling (1986). *1992. Numerical Recipes in Fortran 77: the art of scientific computing*.
- Rabaud, M (2016). «Optimal routing in sailing». Em: *Sports Physics, Palaiseau, France*. <http://www.fast.u-psud.fr/~Drabaud/Articles/Optimal%20Routing.pdf>.
- Santos, João Francisco Barracosa (2019). «eVentos – Desenvolvimentos no veleiro autónomo Barlavento». Tese de mestrado. Escola Naval.
- Shao, Wei, Peilin Zhou e Sew Kait Thong (2012). «Development of a novel forward dynamic programming method for weather routing». Em: *Journal of marine science and technology* 17.2, pp. 239–251.

- Sirimanne, Shamika N, J Hoffman, W Juan, R Asariotis, M Assaf, G Ayala, H Benamara, D Chantrel, J Hoffmann, A Premti et al. (2019). «Review of maritime transport 2019». Em: *United Nations Conference on Trade and Development, Geneva, Switzerland*.
- Sousa, Andreia P. F. (2015). «Um Algoritmo Genético Para O Planeamento De Rotas Com Considerações Ambientais». Tese de mestrado. Faculdade de Economia do Porto.
- Szlapczynska, Joanna (mar. de 2014). «Multi-objective Weather Routing with Customised Criteria and Constraints». Em: *Journal of Navigation* FirstView, pp. 1–17. DOI: 10.1017/S0373463314000691.
- Thornton, Tim (1993). «A Review of Weather Routeing of Sailboats». Em: *Journal of Navigation* 46.1, 113–129. DOI: 10.1017/S037346330001136X.
- Wang, C. T. (1993). «Routage des voiliers et programmation dynamique». Em: *Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle* 27.1, p. 716.
- Wang, Kai, Xinping Yan, Yupeng Yuan e Feng Li (2016). «Real-time optimization of ship energy efficiency based on the prediction technology of working condition». Em: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 46, pp. 81–93.
- Weise, Thomas (2009). «Global optimization algorithms-theory and application». Em: *Self-Published Thomas Weise* 361.
- Zheng, Jianqin, Haoran Zhang, Long Yin, Yongtu Liang, Bohong Wang, Zhengbing Li, Xuan Song e Yu Zhang (2019). «A voyage with minimal fuel consumption for cruise ships». Em: *Journal of Cleaner Production* 215, pp. 144–153. ISSN: 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.032>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619300381>.
- Zis, Thalys P.V., Harilaos N. Psaraftis e Li Ding (2020). «Ship weather routing: A taxonomy and survey». Em: *Ocean Engineering* 213, p. 107697. ISSN: 0029-8018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107697>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801820306879>.

Apêndice A - Programa otv

```
1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2 % OTV
3 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
4 clc; close all; clear all;
5 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
6 rng('shuffle')%seeds the random number generator based on the current
   time.
7 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
8 % BASIC DATA INPUT
9 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
10 isave=1
11 % Salvar os dados para posterior processamento
12 pen = 1
13 % Se pen = 1 aplica o modelo de penalizacao
14
15 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
16 % COORDENADAS DO PONTO A E DO PONTO B
17 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
18 x1=0; y1=-30; % PONTO A
19 x2=0; y2=30; % PONTO B
20 A=[x1 y1]; % PONTO A
21 B=[x2 y2]; % PONTO B
22
23 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
24 % DADOS DE ENTRADA
25 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
26 input_passos=5
27 passos=input_passos;
28 % divisao de A para B
29 % define a escala da malha
30
31 input_w=2
32 % POTVELVENTO- Escolha do campo potencial de velocidade do vento:
33 % w==0 campo de velocidade do vento constante
34 % w==1 campo de velocidades com uma Gaussiana
35 % w==2 campo de velocidades com duas Gaussianas
36
37 input_numPG=5
38 numPG=input_numPG;
39 % num. de pontos de guinada
40 % 1 ponto de guinada corresponde a 2 pernadas;
41 % 2 pontos de guinada corresponde a 3 pernadas.
42
```

```

43 input_dimEP=100
44 dimEP=input_dimEP;
45 % num. de trajetos possiveis
46
47 input_npassoi=10;
48 npassoi=input_npassoi;
49 % num. de passos espaciais para a integra  o em cada pernada
50
51 input_ciclos=1000
52 ciclos=input_ciclos;
53 % num. de ciclos de arrefecimento
54 % num. de vezes que se repete o ciclo de selecao de U/2
55
56 input_k1=log(sqrt((B(1)-A(1))^2+(B(2)-A(2))^2)/0.5)/ciclos;
57 % taxa de decaimento da perturbacao
58 % Perturbacao de 0.5 milhas na epoca 1000
59
60 input_land=1
61 % zona definida sem vento, a contornar
62 % Adicionar massas de terra input_land=1 a 2
63 % input_land=1 circulo - simula ilha
64 % input_land=2 quadrado - simula contentor a flutuar
65
66 numELEITOS=dimEP/2;
67 % dimEP par!!
68
69 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
70 % RESOLUCAO ESPACIAL DO ESPACO
71 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
72 % A variavel "passos" definira uma distancia de referencia "resolucao"
73 % para gerar a resolucao espacial media do espaco de pesquisa:
74 % dAB/passos; % numero de subdivisoes de dAB (distancia de referencia)
75
76 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
77 % Dimensao do espaco de pesquisa (numero de trajetos completos)
78 % dimEP=input_dimEP; % Dimensao do espaco de pesquisa (numero par)
79
80 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
81 % FUNCAO PONTENCIAL DE VELOCIDADE DO VENTO
82 % Obs: forma pratica de codificar o campo
83 % nao estacionario pois o simetrico do seu gradiente
84 % permite obter quer o Azimute Para Onde Sopra o Vento ("aposv")
85 % quer a sua intensidade ("vento").
86 % Obs: A codificacao devera ter uma moldura de largura dAB
87 % em redor do rectangulo de vertices A e B

```

```

88
89 [Xbase, Ybase, dAB, rAB, resolucao]=malhabase(A,B,passos);
90
91 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
92 %POTVELVENTO
93 % Gera o campo potencial de velocidade do vento
94 % 0-Campo constante
95 % 1-Campo Gaussiano centrado na origem
96 % 2-Adicao de dois campos Gaussianos
97 %
98 w=input_w;
99 [pv] = POTVELVENTO(Xbase,Ybase,w);
100 % Potencial de velocidade do vento
101
102 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
103 % Geracao do campo de velocidade (vetorial)do vento
104 [px,py] = gradient(pv,resolucao,resolucao);
105 % px e py componentes da velocidade do vento ("para onde vai")
106 vx=-px; vy=-py; % Simetrico do vetor gradiente ("de onde vem")
107
108 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
109 % Adicionar massas de terra
110 % alterar vx e vy para zero nas zonas de terra
111 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
112
113 if input_land ~= 0
114     [vx,vy]=iland(vx,vy,Xbase,Ybase,input_land);
115 end
116
117 Mvento=sqrt(vx.^2+vy.^2);
118 % com a intensidade do vento na malha base
119 vento=max(max(Mvento));
120 % Intensidade maxima do vento gerado
121 Madosv=atan2d(vy,vx);
122 % Matriz azimuth de onde sopra o vento em coordenadas polares na malha
    base
123
124 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
125 % Tempo de cpu: tempo_de_cpu
126 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
127 tcpu=cputime;
128
129 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
130 % Criacao das matrizes com as coordenadas X (MXep)
131 % e coordenadas Y (MYep) dos pontos de guinada:

```

```

132 %
133 % MXep: Em cada linha da coluna j encontra-se a coordenada X
134 % do ponto de guinada j.
135 % MYep: Em cada linha da coluna j encontra-se a coordenada Y
136 % do ponto de guinada j.
137 % dAB—distancia de A a B
138 % rAB—rumo de A a B (coordenadas polares [-180 a +180]
139 [MXep_1, MYep_1, dAB, rAB, resolucao]=EPbase(A,B,passos ,numPG,dimEP) ;
140
141 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
142 % MPs, (s significa soma, integracao)
143 % Matrizes tridimensionais com as pernadas entre pontos de guinada
144 % discretizadas em npassoi.
145 % Cada folha corresponde a uma pernada. Cada linha a um trajeto.
146 % MPX—Coordenadas x da discretizacao de cada pernada
147 % MPY—Coordenadas y da discretizacao de cada pernada MPs0
148 % MPX0—Coordenadas x da discretizacao do trajeto directo
149 % MPY0—Coordenadas y da discretizacao do trajeto directo
150 [MPX0, MPY0] = MPs0(A,B,npassoi) ;
151 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
152 % MTs0, MTs
153 % %Calculo da intensidade do vento e do adosv nos pontos discretizados
154 % dos trajetos
155 %
156 % % MTs0:
157 % % MventoT0—Intensidade do vento nos pontos discretizados trajeto
158 % % directo
159 % % A->B
160 % % MadosvT0—Azimute de onde sopra o vento dos pontos discretizados do
161 % % trajeto directo A->B
162 % %
163 % % MTs:
164 % % MventoT—Intensidade do vento nos pontos discretizados nas pernadas
165 % % [matriz tridimensional]
166 % % MadosvT—MadosvT0—Azimute de onde sopra o vento dos pontos
167 % % discretizados das pernadas
168 % % [matriz tridimensional]
169 %
170 % % MventoT0=interp2 (Xbase ,Ybase ,Mvento ,MPX0,MPY0)
171 % % MadosvT0=interp2 (Xbase ,Ybase ,Madosv ,MPX0,MPY0)
[MventoT0, MadosvT0] = MTs0(Xbase ,Ybase ,Mvento ,Madosv ,MPX0,MPY0) ;
% %
% [MventoT, MadosvT] = MTs(Xbase ,Ybase ,Mvento ,Madosv ,MPX,MPY) ;

```

```

172 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
173 % trajectoPG
174 % % A funcao trajectoPG gera os trajetos (distancia e rumo)
175 % % dA_P1, ... , dPi_Pi+1,... ,dPN_B
176 % %
177 % % OBS: Estas matrizes incluem ja as informacoes (distancias e rumos)
      com A e B
178 % % MdPG—Matriz das distancias (entre A, pontos de guinada e B)
179 % % MrPG—Matriz dos rumos (entre A, pontos de guinada e B)
180 % % Dimensoes:
181 % % numero de linhas: dimEP (dimensao espaco de pesquisa)
182 % % numero de colunas: numPG+1 (numero de pontos de guinada)
183 %
184 % % Obs: Os rumos sao calculados em coordenadas polares [-180 a +180]
185 % [MdPG,MrPG]=trajectoPG (MXep,MYep,A,B);
186
187 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
188 % Mths0,Mths
189 % % Calculo dos correspondentes angulos theta de entrada no diagrama
      polar
190 % % para computacao das velocidades verificadas ao longo das pernadas
      entre
191 % % os pontos de guinada (nos pontos discretizados).
192 % % MthetaT0—angulos de entrada no diagrama polar nos pontos
      discretizados do rumo directo
193 % % MthetaT—angulos de entrada no diagrama polar nos pontos
      discretizados das pernadas [matriz tridimensional]
194 % %
195 %
196 [MthetaT0] = Mths0(rAB,MadosvT0);
197 % [MthetaT]=Mths(MrPG,MadosvT);
198
199 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
200 % DPOLAR
201 % % [vv] = DPOLAR(theta,v)
202 % % Calcula a velocidade do veleiro nos pontos discretizados dum
      trajeto
203 % % rectilineo: theta—angulo de entrada do vento verdadeiro, v—
      intensidade do vento
204
205 % VELPG
206 % % [vel_PG] = VELPG(MthetaT,MventoT)
207 %
208 % % Calculo das velocidades nos pontos discretizados de cada pernada
209 %

```

```

210 vel_AB=DPOLAR(MthetaT0,MventoT0); %Trajeto direto
211 % vel_PG=VELPG(MthetaT,MventoT); %Restantes velocidades
212
213 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
214 % TEMPOAB e TEMPOPG
215 % % [temp_PG] = TEMPOPG(MdPG,vel_PG)
216 % % Calculo dos tempos de percurso no trajeto direto e nas diferentes
      pernas
217 %
218 temp_AB=TEMPOAB(dAB,vel_AB); %Tempo de trajeto direto
219 % temp_PG=TEMPOPG(MdPG,vel_PG);
220
221 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
222 % % Calculo da penalizacao associada ao tempo de guinada
223 % % diferente de zero se pen = 1
224 % % Calculo dos tempos totais de percurso (horas) (distancia em milhas
      nauticas e velocidade em nos)
225 % %
226 tempo_total_AB=temp_AB;
227 % tempo_total_APB=sum(temp_PG,2)+sum(penaly_PG,2);
228
229 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
230 % INICIO OPTIMIZACAO HEURISTICA INSPIRADA EM SIMULATING ANNEALING
231 % %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
232 % % Colocar os valores do tempo total por ordem crescente atraves da
      funcao
233 % % " sort "
234 % %MXep, MYep, tempo_total_APB
235
236 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
237 % [tempo_total_APB_ord, id]=sort(tempo_total_APB);
238 % %
239 % % Reordenar as linhas das matrizes MXep e MYep de acordo com a nova
      ordenacao
240 % % do vetor tempo_total_APB
241 %
242 % MXep_ord=MXep(id,:); % MXep_ord=Matriz MXep ordenada por tempos de
      trajeto crescentes
243 % MYep_ord=MYep(id,:); % MYep_ord=Matriz MYep ordenada por tempo de
      trajetos crescentes
244 % % Guardar o melhor resultado
245 % melhor_tempo=tempo_total_APB_1(1);
246 melhor_X=MXep_1(1,:);
247 melhor_Y=MYep_1(1,:);
248 %

```

```

249 tempo_min=[]; %Vetor linha com os tempos minimos obtidos em cada epoca
250 %
251 sum_penalty_best_route=[]; % Vetor coluna com as penalizacoes temporais
      do melhor trajeto em cada epoca
252
253 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
254 % Inicio do loop
255 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
256 for i1=1:ciclos
257     ciclos=i1
258 % % Guardar o melhor tempo da geracao anterior e as correspondentes
      coordenadas dos pontos de guinada
259 % total_tempo_tmp=melhor_tempo;
260 % melhor_X_tmp=melhor_X;
261 % melhor_Y_tmp=melhor_Y;
262 %
263 amp_per=dAB*exp(-input_k1*i1);
264
265 %
266 %Criacao das matrizes que vao fazer a perturbacao em MXep, MYep
267 MXrandom=-amp_per+2*amp_per*rand(dimEP,numPG); %
268 MYrandom=-amp_per+2*amp_per*rand(dimEP,numPG); %
269
270 % Adicao da perturbacao:
271 MXep_1=plus(MXep_1,MXrandom);
272 MYep_1=plus(MYep_1,MYrandom);
273
274 % % % Substituir o ultimo valor desta epoca perturbada pelo primeiro da
      geracao
275 % % %anterior para nao se perder no caso da perturbacao nao criar
      trajetos melhores
276 MXep_1(end,:)=melhor_X;
277 MYep_1(end,:)=melhor_Y;
278
279 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
280 [MdPG,MrPG]=trajectoPG(MXep_1,MYep_1,A,B);
281 %Linha 147 (distancias e rumos das pernadas)
282 [MPX,MPY]=MPs(A,B,numPG,MXep_1,MYep_1, npassoi); %Linha 116
283 [MventoT, MadosvT] = MTs(Xbase, Ybase, Mvento, Madosv, MPX, MPY);
284 %Linha 139
285 [MthetaT]=Mths(MrPG, MadosvT);
286 %Linha161 (angulos de entrada)
287 vel_PG=VELPG(MthetaT, MventoT);
288 %Linha 178 (velocidades ao longo das pernadas)
289 temp_PG=TEMPOPG(MdPG, vel_PG);

```

```

290 %Linha 188
291
292 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
293 % Calculo da penalizacao temporal se pen = 1
294 % diferente de zero se pen = 1
295
296 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
297 [penaly_PG , BEV,BOL_antes ,BOL_depois ,BEVDIFF, BOLSUM, MATPENAL, ANGVAR,
      VELMED]=penalty(MrPG,MthetaT, vel_PG, MadosvT, pen);
298 sum_penalty=sum(penaly_PG,2);
299 tempo_total_APB=sum(temp_PG,2)+sum_penalty;
300 [tempo_total_APB_ord, id]=sort(tempo_total_APB);
301 MXep_ord=MXep_1(id,:);
302 % MXep_ord=Matriz MXep ordenada por tempos de trajeto crescentes
303 MYep_ord=MYep_1(id,:);
304 % MYep_ord=Matriz MYep ordenada por tempo de trajetos crescentes
305
306 % Evolucao da penalizacao temporal do melhor trajeto do espaco de
      pesquisa
307 %em cada epoca
308 sum_penalty_ord=sum_penalty(id);
309 sum_penalty_best_route=[sum_penalty_best_route; sum_penalty_ord(1)];
310
311 % Constituicao do espaco de pesquisa com os 50% melhores trajetos
312 tempo_total_APB_ord=tempo_total_APB_ord(1:numELEITOS);
313 tempo_total_APB_ord=[tempo_total_APB_ord;tempo_total_APB_ord];
314 MXep_ord=MXep_ord(1:numELEITOS,:);
315 MXep_ord=[MXep_ord;MXep_ord];
316 MYep_ord=MYep_ord(1:numELEITOS,:);
317 MYep_ord=[MYep_ord;MYep_ord];
318
319 %% Substituir o ultimo valor desta geracao pelo primeiro da geracao
      anterior
320 % tempo_total_APB_ord(end)=total_tempo_tmp;
321 % MXep_ord(end,:)=melhor_X_tmp;
322 % MYep_ord(end,:)=melhor_Y_tmp;
323
324 % [tempo_total_APB_ord id]=sort(tempo_total_APB_ord);
325 MXep_1=MXep_ord;
326 % MXep_ord=Matriz MXep ordenada por tempos de trajeto crescentes
327 MYep_1=MYep_ord;
328
329 % Guardar o melhor resultado desta geracao para ser usado na geracao
      seguinte
330 melhor_tempo=tempo_total_APB_ord(1)

```

```

331 %ALARME DE TEMPO NEGATIVO !!!!!
332 if melhor_tempo < 0
333     load handel
334     sound(y,Fs)
335 end
336 melhor_X=MXep_ord(1,:);
337 melhor_Y=MYep_ord(1,:);
338
339 tempo_min=[tempo_min, melhor_tempo];
340 %Criado para ver a evolucao do melhor
341 %tempo de geracao para geracao
342
343 end
344
345 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
346 % Calculo do tempo de cpu
347 tempo_de_cpu=cputime-tpcu
348
349 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
350 % Calculo da penalizacao temporal associada
351 % ao trajeto otimo gerado sem penalizacao
352 if pen == 0
353
354     [MdPG_p0,MrPG_p0]=trajectoPG(melhor_X,melhor_Y,A,B); %
355     [MPX_p0, MPY_p0]=MPs(A,B,numPG,melhor_X,melhor_Y, npassoi); %
356     [MventoT_p0, MadosvT_p0] = MTs(Xbase, Ybase, Mvento, Madosv, MPX_p0,
357     MPY_p0);
358     [MthetaT_p0]=Mths(MrPG_p0, MadosvT_p0);
359     vel_PG_p0=VELPG(MthetaT_p0, MventoT_p0); %Linha 178 (velocidades ao
360     longo das pernadas)
361
362     [penaly_PG, BEV, BOL_antes, BOL_depois, BEVDIFF, BOLSUM, MATPENAL,
363     ANGVAR, VELMED]=penalty(MrPG_p0, MthetaT_p0, vel_PG_p0, MadosvT_p0
364     ,1);
365     penalty_time_with_zero_pen=sum(penaly_PG,2)
366 else
367     [MdPG_p0,MrPG_p0]=trajectoPG(melhor_X,melhor_Y,A,B); %
368     [MPX_p0, MPY_p0]=MPs(A,B,numPG,melhor_X,melhor_Y, npassoi); %
369     [MventoT_p0, MadosvT_p0] = MTs(Xbase, Ybase, Mvento, Madosv, MPX_p0,
370     MPY_p0); %
371     [MthetaT_p0]=Mths(MrPG_p0, MadosvT_p0); %
372     vel_PG_p0=VELPG(MthetaT_p0, MventoT_p0); %Linha 178 (velocidades ao
373     longo das pernadas)
374

```

```

370
371     [penaly_PG_tmp, BEV,BOL_antes,BOL_depois,BEVDIFF, BOLSUM, MATPENAL
, ANGVAR, VELMED]=penalty(MrPG_p0,MthetaT_p0, vel_PG_p0, MadosvT_p0
,1);
372     penalty_time_best_route=sum(penaly_PG_tmp,2)
373 end
374
375     sum_penalty_best_route(end)
376
377 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
378 % GRAVACAO FICHEIRO .mat com dados dos calculos
379 % para processamento futuro
380 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
381 if isave==1;
382 ref_h=clock;
383 fName2=['ano_',num2str(ref_h(1)),'_mes_',num2str(ref_h(2)),'_dia_',
num2str(ref_h(3)),'_hora_',num2str(ref_h(4)),'_min_',num2str(ref_h
(5))];
384 fName1=['otv_'];
385 name_file=[fName1 fName2];
386 save(name_file)
387 end
388
389 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
390 % PROCESSAMENTO GRAFICO PARA VISUALIZACAO DE RESULTADOS
391 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
392 %Plot para ver a evolucao do tempo
393 figure(2)
394 plot(tempo_min,'-k','color','red','LineWidth',1.5);
395 set(gca,'FontSize',10,'FontWeight','bold','LineWidth',2.0,'box','on') ;
396 a1=xlabel(['\it Ciclos ','\rm [ n ]']); set(a1,'FontSize',12,'
FontWeight','bold');
397 a2=ylabel(['\it T','\rm [h]']); set(a2,'FontSize',12,'FontWeight','bold
');
398 a3=title('Evolucao do tempo minimo com o decorrer dos ciclos');
399 set(a3,'FontSize',12,'FontWeight','bold')
400 grid on
401
402 %% Guardar o graficos
403 % if iprint==1;
404 % ref_h=clock;
405 % fName1=['ano_',num2str(ref_h(1)),'_mes_',num2str(ref_h(2)),'_dia_',
num2str(ref_h(3)),'_hora_',num2str(ref_h(4)),'_min_',num2str(ref_h
(5))];

```

```

406 % fig1 = [ 'EVOL_CAL_FIG_PS_', num2str(fName1) ]; print(gcf, '-dpSC', fig1
    )
407 % fig2 = [ 'EVOL_CAL_FIG_DMETA_', num2str(fName1) ]; print(gcf, '-dmeta',
    fig2)
408 % fig3 = [ 'EVOL_CAL_FIG_EPS_', num2str(fName1) ]; print(gcf, '-depSC',
    fig3)
409 % fig4 = [ 'EVOL_CAL_FIG_MAT_', num2str(fName1) ]; savefig(fig4)
410 % %
411 % end
412 %Plot dos trajetos A-B e A-P-B
413 figure(3)
414 pontos=plot(A(1),A(2), 'x', melhor_X, melhor_Y, 'o', B(1), B(2), 's');
415 set(pontos, 'MarkerSize', 8, 'MarkerEdgeColor', 'k', 'LineWidth', 1.5);
416 set(gca, 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold', 'LineWidth', 2.0, 'box', 'on') ;
417 b1=xlabel('Coordenada X'); set(b1, 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
418 b2=ylabel('Coordenada Y'); set(b2, 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
419 b3=title('Trajetos A-B e A-P-B'); set(b3, 'FontSize', 12, 'FontWeight', '
    bold')
420 grid on
421
422 hold on
423 quiver1=quiver(A(1),A(2), B(1)-A(1), B(2)-A(2), 0);
424 set(quiver1, 'MarkerSize', 8, 'MarkerEdgeColor', 'k', 'LineWidth', 1.5);
425 hold on
426
427 plot([A(1) melhor_X B(1)], [A(2) melhor_Y B(2)], '-k', 'LineWidth', 1.5)
428
429 axis equal
430
431 hold on
432
433 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
434 % VENTIO
435 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
436 %px1=px; py1=py;
437 [Xbase, Ybase, dAB, rAB, resolucao]=malhabase(A,B,passos);
438 %quiver(Xbase, Ybase, 0*Xbase+px1, 0*Ybase+py1, 'r')
439 quiver(Xbase, Ybase, 0*Xbase-vx, 0*Ybase-vy, 'r')
440 legend('A', 'P', 'B')
441 text(Xbase(1,1), Ybase(1,1)+resolucao/2, ['Velocidade maxima do vento: ',
    num2str(vento), ' nos'])
442 if pen == 0
443 text(Xbase(1,1), Ybase(end,end)-resolucao/2, ['Tempo trajeto sem
    penalizacao: ', num2str(melhor_tempo), ' horas'])

```

```

444 text(Xbase(1,1),Ybase(end,end)-2*resolucao,['Tempo trajeto directo: ',
      num2str(temp_AB),' horas'])
445 else
446 text(Xbase(1,1),Ybase(end,end)-resolucao/2,['Tempo trajeto com
      penalizacao: ',num2str(melhor_tempo),' horas'])
447 text(Xbase(1,1),Ybase(end,end)-2*resolucao,['Tempo trajeto direto: ',
      num2str(temp_AB),' horas'])
448 end
449 axis equal
450
451 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
452 % Evolucao da penalizacao temporal do melhor trajeto em cada epoca
453 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
454 if pen==1
455 figure(4)
456
457 plot(sum_penalty_best_route,'-k','color','red','LineWidth',1.5);
458 set(gca,'FontSize',10,'FontWeight','bold','LineWidth',2.0,'box','on') ;
459 a1=xlabel(['\it Ciclos ','\rm [ n ]']); set(a1,'FontSize',12,'
      FontWeight','bold');
460 a2=ylabel(['\it T','\rm [h]']); set(a2,'FontSize',12,'FontWeight','bold
      ');
461 a3=title('Evolucao da penalizacao temporal do melhor trajeto em cada
      epoca');
462 set(a3,'FontSize',12,'FontWeight','bold')
463 grid on
464 end

```

CÓDIGO FONTE A.1: Programa *otv*

Apêndice B - Produção científica precedente

Este apêndice é constituído pelos trabalhos científicos realizados e apresentados em conferências:

1. Artigo científico publicado em *Trends in Maritime Technology and Engineering Volume 1* e respetiva apresentação para a Conferência *MARTECH 2022 - 6th International Conference on Maritime Technology and Engineering*, Instituto Superior Técnico, maio de 2022 - "Optimization of sailboat routes under non-uniform wind velocity fields";
2. Artigo e apresentação para a Conferência Jornadas do Mar 2022, Escuela Naval Militar, junho de 2022 - "Otimização de trajetórias de veleiros, em condições de vento estacionário não uniforme".

Optimization of sailboat routes under non-uniform wind velocity fields

F. Maurício

*CINAV, Escola Naval, Instituto Universitário Militar
Base Naval de Lisboa - Alfeite 2810-001, Almada, Portugal*

M. Moreira

*CINAV, Escola Naval, Instituto Universitário Militar
Centre for Marine Technology and Ocean Engineering (CENTEC)
Base Naval de Lisboa - Alfeite 2810-001, Almada, Portugal.*

ABSTRACT: In this work we present an optimization heuristic to approximate optimal minimum time sailing routes under non-uniform steady wind velocity fields. In the application of this heuristic, based in the simulated annealing method, the paths from point A to point B were modeled by concatenating a predefined few number of oriented segments defined by previously established yaw points. The spatial non-uniformity of the wind field suggests the need to describe the trajectories from point A to point B using a cloud of numerous yaw points. The proposed methodology here called VSA (Vectorized Simulated Annealing) can address additionally the problem of existence of land masses or regions over which the crossing cannot be practiced. Preliminary numerical simulations indicate that the VSA methodology is effective in addressing the problem of finding optimal routes under non-uniform steady wind velocity fields. Besides, in the presence of a land masses blocking the way, the algorithm can generate credible alternative routes.

1 INTRODUCTION

The task of minimizing the sailing time between two points is a problem, generally speaking, without an exact and/or analytical solution. As we know, the sailing speed of a sailboat on a certain course depends not only on its characteristics but also on the intensity of the wind and its direction within the chosen course. This dependency is usually described using the so-called polar diagram of speed. It is well known that certain direct routes cannot be carried out, in particular those in which the wind presents an opposite direction with respect to the necessary heading. This situation determines the need to choose and perform different legs that allow the sailboat to reach the desired destination.

The determination of an approximated solution to this optimization problem that is satisfactory is of prime importance, especially since the use of autonomous sailboats in the most varied activities of civil and military nature is becoming increasingly important.

This problem falls within the class of problems designated by *ship wheater routing* in which finding an optimal path considering environmental conditions such as wind and sea conditions as well as the pres-

ence of land masses and icing information, is sought. Ship wheater routing is a subject that has received increasing attention from academia and industry in recent years due to the high economic and environmental impact of this area of activity. Note that around 80 per cent of the volume of international trade in goods is carried by sea (Sirimanne, Hoffman, Juan, Asariotis, Assaf, Ayala, Benamara, Chantrel, Hoffmann, Premti, et al. 2019).

In addressing the problem of ship weather routing, the following approaches have been used: the isochrone method, dynamic programming, calculus of variations, pathfinding algorithms, and optimization heuristics as well as technics based on artificial intelligence and machine learning, see for instance, the surveys by (Thornton 1993, Zis, Psaraftis, & Ding 2020).

This problem can be contextualized in levels of increasing complexity related to the meteorologic characteristics of the verified wind velocity field and sea states.

Assuming a steady and uniform wind velocity field, this problem was recently addressed using a heuristic optimization technique based in the simulated annealing method [(Fedorchuk 2020)]. This approach proved to be reliable and robust [(Vidinha da Costa

2021)] allowing us obtaining optimal trajectories that are not anchored to a predefined fixed spatial mesh.

The simulated annealing method was originally developed by Metropolis and coworkers [(Metropolis, Rosenbluth, Rosenbluth, Teller, & Teller 1953)] and has been efficiently applied to solve the well-known traveling salesman problem. This technique is inspired by the technique of annealing. The term annealing is invoked by analogy with the metallurgical annealing process, in which a metal is heated to high temperatures until it melts and then slowly cooled. During the cooling process, the molecules adjust and rearrange themselves until the crystal lattice reaches a state of minimal energy. The simulated annealing method has the particularity of presenting an intuitive implementation, stripped of complexities and that configures an effective approach to non-linear optimization problems in complex research domains (Press, Vetterling, Teukolsky, & Flannery 1986).

In this work, using the same heuristic optimization technique, we address the same problem, however considering a wind velocity field steady and non-uniform.

For the sake of simplicity the effects of the sea state, ocean surface currents and tidsals, the leeway drift, were not considered and will be postponed for a later approach, as well as the problem of consider a non-steady and non-uniform wind velocity field.

In the application of this heuristic technique, the paths from point A to point B were modeled by concatenating a predefined few number of oriented segments defined by previously established *yaw* points, that is, spatial locations defining the end and beginning of the common positions of consecutive segments. It will be in the positions of the yaw points that changes of course may occur on the sailing route defined by them. Note that the spatial non-uniformity of the wind field suggests the need to describe the trajectories from point A to point B using a cloud of numerous yaw points.

2 FORMULATION

From the wind velocity field \mathbf{v} the travel time T , between points A and B can be calculated using the line integral

$$T = \int_{\Gamma} \frac{ds}{c} \quad (1)$$

where Γ stands for a generic sailing path from A to B and c represents the sailing speed along the path. The sailboat speed, $c = c(\theta, v)$, depends of the true wind angle θ between the true wind velocity $v = \|\mathbf{v}\|$ and the sailboat course and is established, as already mentioned by the polar diagram of speed of the sailboat in question.

Choosing appropriate parameters a_n^m , $0 \leq n \leq 4$ and $1 \leq m \leq 3$ a generic polar diagram of speed can

be well described using the following trigonometric polynomial:

$$c(\theta, v) = \sum_{n=0}^{n=4} \left(\sum_{m=1}^{m=3} a_n^m v^m \right) \cos^n(\theta) \quad (2)$$

The parameters a_n^m , $0 \leq n \leq 4$ and $1 \leq m \leq 3$ used in this work (see Table 1) were determined from the polar diagram of speed of "NRP Sagres" using a least-square approximation based on data extracted from (Mota 2014). In this formulation the sailing boat speed is expressed in knots as well as the wind speed v .

Define N concatenated oriented segments L_i that establish a route Γ between points A and B . This path is thus defined by $N - 1$ yaw points P_i and the travel time T adopting this route is

$$T(P_1, P_2, \dots, P_{N-1}) = \sum_{i=1}^N t(L_i) + \sum_{i=1}^{N-1} \Delta(P_i), \quad (3)$$

where $t(L_i)$ represents the sailing time spent on the partial route corresponding to segment L_i and $\Delta(P_i)$ represents an optional semi-empirical time penalty function associated with the turn maneuver performed at the yaw point P_i .

Knowing the steady non-uniform wind velocity field, the sailing time $t(L_i)$

$$t(L_i) = \int_{L_i} \frac{ds}{c(\theta, v)} \quad (4)$$

is numerically computed along the straight path L_i , $i = 1, \dots, N$.

The penalty function was postulade in (Vidinha da Costa 2021) as

$$\Delta(P_i) = \begin{cases} k_1 \frac{|\alpha_i|}{90} e^{-k_2 v_i} & \text{if tacking} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

where v_i is the average sailing speed verified at routes L_i and L_{i+1} in the neighborhood of the yaw point P_i , α_i is the i yaw total angle in degrees and k_1 and k_2 are adjustable parameters that can be experimentally determined (see Appendix A for details). Addressing the problem of minimizing the sailing time between two points under steady and uniform wind velocity field (Vidinha da Costa 2021) showed that the use of the time penalty algorithm associated with course changes will allow obtaining more realistic optimal trajectories that cannot be obtained using expeditious techniques such as the *velocity made good approach* (VMG).

Assume that the choice of the number of yaw points P_i is adequate to approximate a minimum time route Γ from point A to point B . Clearly, the spatial variability of the wind speed field will determine the above mentioned number of yaw points.

Suppose that the wind velocity field is known in an appropriate mesh that contains the region in which the

mination of optimal sailing routes as well as some comments regarding the computational costs.

For the sake of simplicity we will use plane Cartesian coordinates to describe geographic locations denoting the north-south direction along the Y coordinate axis.

In all simulations we will use the relevant parameters of the tall ship "NRP Sagres", a three-masted barque, namely the corresponding polar diagram of speed formulated in equation (2), as well as the time penalty function (5), materialized in Appendix A. Additionally, the optimal sailing route to be determined in all situations tested, must link positions A (departure point) and B (arrival point), apart 60 nautical miles and located on the same meridian.

In Subsection 3.1, in order to highlight the effect of using the time penalty function (5), we will consider a steady and uniform north wind of intensity 10 knots, adopting a simplified environment.

In Subsections 3.2 and 3.3 we present simulations employing a wind velocity field with spatial variability synthetically generated to display the behavior of the VSA heuristic under such environment. In Subsection 3.3 we consider the presence of a land mass obstructing the optimal path found in Subsection 3.2 to analyze the algorithm ability to generate optimal alternative routes.

Finally, in the last subsection we present some comments about the computational cost presented in the simulations carried out.

Numerical simulations were performed on a system equipped with a 6th generation Intel® Core™ i7-6650U Dual Core™ processor and 16GB of RAM.

3.1 Preliminary simulations - Uniform and steady wind field

In Figures 2 and 3 we display optimal paths found by the VSA heuristic using 2 turning points. In the simulation shown in Figure 2, we did not use the time penalty function that estimates and adds to the calculation of the total travel time, the time spent executing changes of course at the yaw points. As can be seen, the optimal trajectories generated present large changes of course at all yaw points which will cause a delay of 0.0718. The duly corrected total travel time will be 32.5125 hours. In the simulation shown in Figure 3, the optimum trajectory was generated including the time penalty function. In these circumstances, we verify that the purpose of one of the yaw points in the optimal path found is nullified due to the collinear positioning relative to the two paths it defines. This fact reduces the time spending associated with the occurrence of unnecessary tacking, thus allowing to obtain a route that can be sailed in 32.4407 hours. A complete discussion of these details is presented in (Vidinha da Costa 2021).

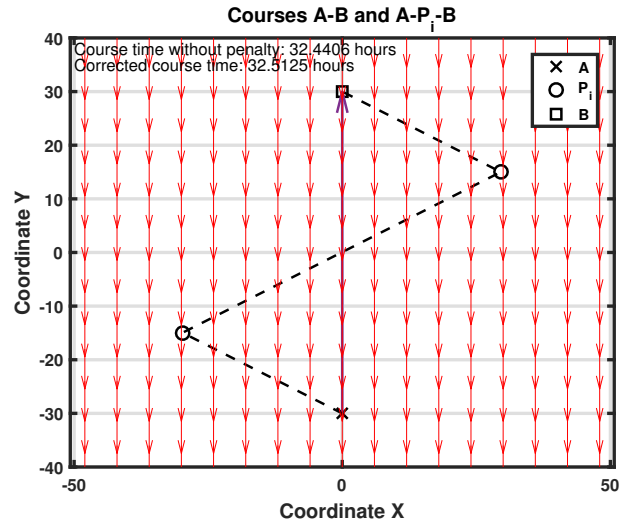


Figure 2: Optimum route with 2 yaw points without using the time penalty function: population size - 400, epochs - 500, CPU time - 367 s.

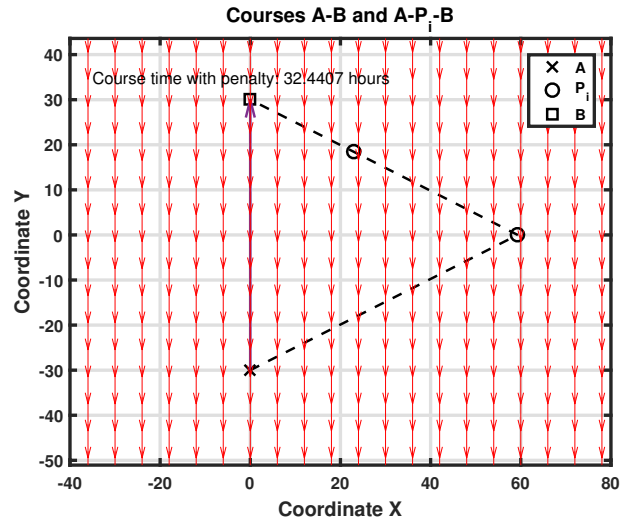


Figure 3: Optimum route with 2 yaw points using the time penalty function: population size - 400, epochs - 500, CPU time - 364 s.

3.2 Non-uniform and steady wind field

In this subsection we apply the VSA heuristic to approximate optimal paths from the same point A to the same point B under a steady but non-uniform wind velocity field. The wind velocity field used is graphically represented in Figures 4 and 5 and was generated with the purpose of displaying satisfactory spatial velocity gradients. In Figure 4 only two yaw points were used while in Figure 5 we used five yaw points. It can be seen that the optimal routes generated are identical, although representing different approximations of the optimal route sought. In fact, the approximate route with five yaw points is covered in less time (23.7942 hours) than the route with only two yaw points (25.6041 hours). The use of more yaw points allows a better adaptation of the VSA heuristic generated routes, to the spatial variability of the wind velocity field.

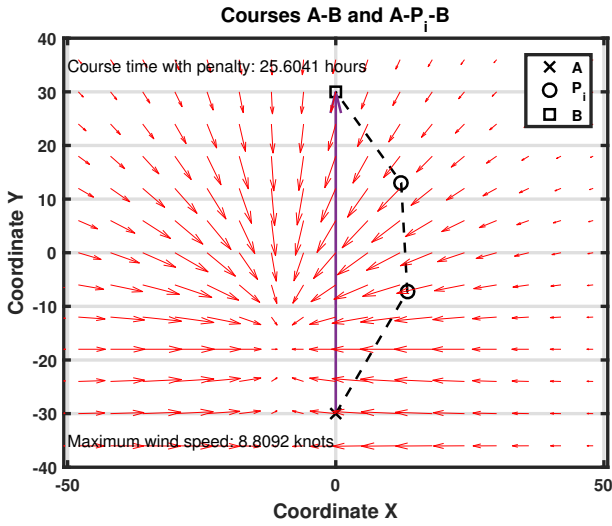


Figure 4: Optimum route with 2 yaw points using the time penalty function: population size - 400, epochs - 1000, CPU time - 630 s.

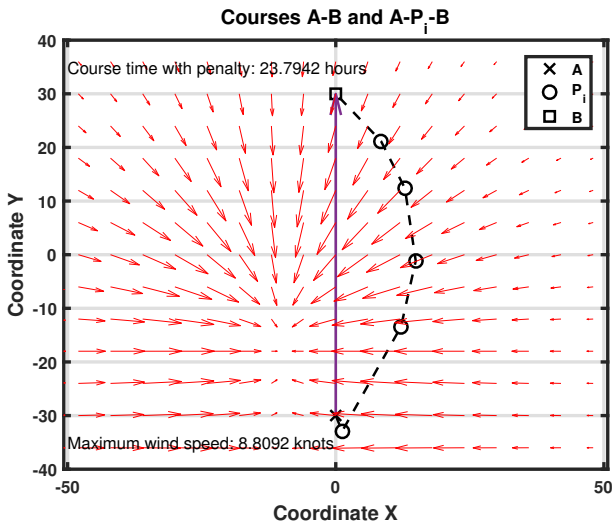


Figure 5: Optimum route with 5 yaw points using the time penalty function: population size - 1000, epochs - 1000, CPU time - 3504 s.

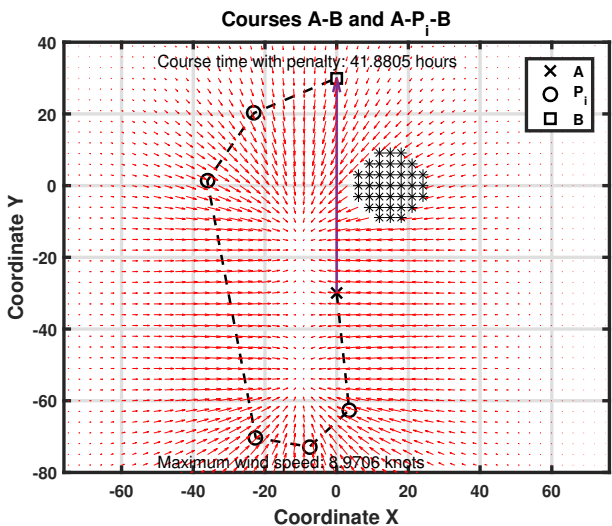


Figure 6: Optimum route with 5 yaw points using the time penalty function: population size - 100, epochs - 1000, CPU time - 392 s

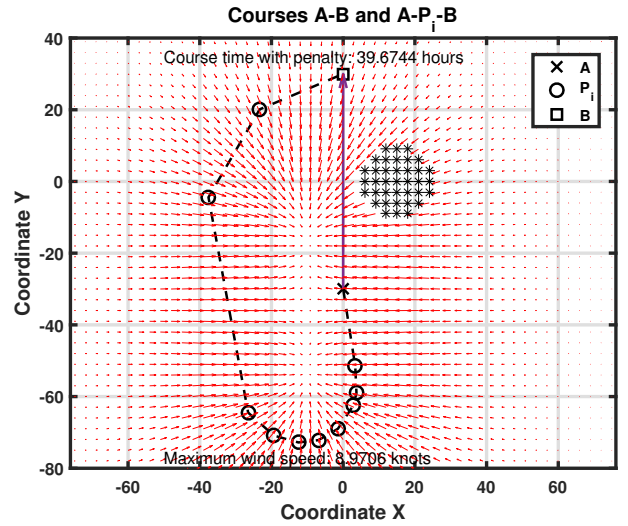


Figure 7: Optimum route with 10 yaw points using the time penalty function: population size - 400, epochs - 1100, CPU time - 2992 s

3.3 Presence of land masses

In the present subsection we use the same environmental conditions used in the simulations carried out in the previous section, Subsection 3.2. The behavior of the VSA heuristic in the presence of land masses is tested in this subsection using five yaw points as well as ten yaw points, as can be seen in Figures 6 and 7. For this purpose, we positioned a circular island, with center (15, 0) and radius 10 miles, in the region of passage of the optimized routes determined in the above mentioned Subsection 3.2. The location of this land mass is represented in Figures 6 and 7 with the symbol '*'. As observed in the simulations displayed in the previous subsection, also here the optimal routes generated are identical, although representing different approximations of the optimal route sought. We found that in both simulations the yaw points are concentrated in the areas of greater spatial variability of the wind velocity field, thus improving the travel time by taking better advantage of the non-uniformity of wind direction. The approximate route with ten yaw points is covered in less time (39.6744 hours) than the route with five yaw points (41.8805 hours).

3.4 Computational cost

As mentioned in Section 2, the choice of the number of epochs adopted, the population size and the number of yaw points must be tentatively adjusted in order to ensure the convergence of the method as well as a satisfactory characterization of an optimal route. Let τ be the calculation time referred to a single epoch, a single representative of the population U and a single yaw point.

From the data recorded in the labels of Figures 2, 3, 4, 5, 6 and 7, we verify that the present implementation of this heuristic leads to τ values that are between $7e - 04$ and $9e - 04$ seconds of CPU. The average value of this parameter, say $8e - 04$ seconds of CPU, can be used to anticipate the impact on calculation

times resulting from choices of the number of epochs adopted, the population size and the number of yaw points and achieve a better balance between them.

4 CONCLUSIONS

In this work we presented an optimization heuristic VSA (Vectorized Simulated Annealing) to approximate optimal minimum time sailing routes under non-uniform steady wind velocity fields. The proposed methodology can address additionally the problem of existence of land masses or regions over which the crossing cannot be practiced.

The VSA methodology seems to be effective in addressing the problem of finding optimal routes under non-uniform steady wind velocity fields. Besides, in the presence of a land masses blocking the way, the algorithm can generate credible alternative routes.

The preliminary satisfactory results of the proposed methodology suggest the following future developments:

1. Compare the results offered by the VSA heuristic with results offered by other approaches to the same problem, evaluating the merits and demerits of the proposed methodology.
2. Improve the computational efficiency of the VSA heuristic with regard to reliability, robustness and computational cost and automate the choice of the main calculation parameters responsible for the convergence and efficiency of the proposed methodology.
3. Extend the VSA heuristic to find approximate minimum time sailing routes under non-steady non-uniform wind velocity fields.
4. Add to the VSA heuristic the possibility of considering the effects of ocean surface currents and tids, as well as, the leeway drift.

5 ACKNOWLEDGMENTS

We thank the Navy Research Center (CINAV) for the financial support in carrying out this work.

A TIME PENALTY FUNCTION PARAMETERS

Consider the time (in hours) penalty function (tacking)

$$\Delta = k_1 \frac{|\alpha|}{90} e^{-k_2 v}$$

and define a time constant $\Delta\tau$ (in hours) of the sailing vessel as the time taken to travel at its maximum speed v_{max} (in knots) the distance corresponding to its length L (in nautical miles). Postulate that k_1 and k_2 must satisfy:

1. $\Delta = 2\Delta\tau$ assuming $v = v_{max}$ and $\alpha = 90^\circ$;

2. $\Delta = 40\Delta\tau$ assuming $v \simeq 0$ and $\alpha = 90^\circ$.

Assuming $v_{max} \approx 12$ knot and $L \approx 100$ m we obtain for "NRP Sagres" :

$$k_1 = 0.180 \quad (6)$$

and

$$k_2 = 0.250 \quad (7)$$

B PERTURBATION FUNCTION

Let i be the i -th epoch and define d_{AB} be the direct distance from A to B in nautical miles. The spatial perturbation (maximum semi-amplitude in nautical miles) function reads

$$\varepsilon(i) = d_{AB} e^{-ki} \quad (8)$$

where

$$k = \frac{\ln(2d_{AB})}{1000}. \quad (9)$$

Using these parameters, $\varepsilon(0) = d_{AB}$ and $\varepsilon(1000) = 0.5$ nautical miles.

REFERENCES

- Fedorchuk, M. (2020). Otimização de trajetórias de veleiros. Master's thesis, Escola Naval.
- Metropolis, N., A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller, & E. Teller (1953). Equation of state calculations by fast computing machines. *The journal of chemical physics* 21(6), 1087–1092.
- Mota, J. M. S. d. (2014). Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento-aplicação prática ao NRP sagres. Master's thesis, Escola Naval.
- Press, W. H., W. T. Vetterling, S. A. Teukolsky, & B. P. Flannery (1986). *Numerical recipes*, Volume 818. Cambridge university press Cambridge.
- Sirimanne, S. N., J. Hoffman, W. Juan, R. Asariotis, M. Assaf, G. Ayala, H. Benamara, D. Chantrel, J. Hoffmann, A. Premti, et al. (2019). Review of maritime transport 2019. Technical report, tech. rep.
- Thornton, T. (1993). A review of weather routeing of sailboats. *Journal of Navigation* 46(1), 113–129.
- Vidinha da Costa, T. (2021). Otimização, em tempo real, de trajetórias de veleiros. Master's thesis, Escola Naval.
- Zis, T. P., H. N. Psarafitis, & L. Ding (2020). Ship weather routing: A taxonomy and survey. *Ocean Engineering* 213, 107697.

Otimização de trajetórias de veleiros, em condições de vento estacionário não uniforme

Francisca Maurício
Escola Naval

francisca.teles.mauricio@escolanaval.pt

Resumo: Neste trabalho apresentamos uma técnica heurística de otimização para calcular trajetórias que minimizam o tempo de navegação à vela entre dois pontos, sob campos de velocidade de vento não uniformes. Na aplicação desta técnica, baseada no método da simulação do recozimento (Simulated Annealing), os caminhos do ponto *A* ao ponto *B* foram modelados concatenando segmentos orientados, definidos por pontos de guinada previamente estabelecidos. A não uniformidade espacial do campo de velocidade do vento sugere a necessidade de descrever as trajetórias do ponto *A* ao ponto *B* usando um conjunto numeroso de pontos de guinada. A metodologia aqui proposta, designada *VSA* (*Vectorized Simulated Annealing*), é inspirada na técnica de simulação do recozimento e pode resolver adicionalmente o problema da determinação de trajectos óptimos na presença de massas de terra ou regiões sobre as quais a travessia não pode ser praticada. Simulações numéricas preliminares indicam que a metodologia *VSA* é eficaz para resolver o problema de encontrar trajectos óptimos sob campos de velocidade de vento não uniformes.

Palavras-chave: otimização de trajetórias de veleiros com vento não uniforme, método de simulação do recozimento

INTRODUÇÃO

A tarefa de minimizar o tempo de navegação entre dois pontos é um problema, em geral, sem uma solução exata e/ou analítica. Como sabemos, a velocidade de um veleiro num determinado percurso, depende não só das suas características, mas também da intensidade do vento e da sua direção, relativamente ao rumo escolhido. Esta relação é geralmente descrita utilizando o chamado diagrama polar de velocidade. É sabido que certas rotas diretas não podem ser realizadas, em particular aquelas em que o vento apresenta a direção oposta ao rumo necessário. Nesta situação coloca-se a necessidade de escolher e executar diferentes pernadas, que permitam que o veleiro alcance o destino pretendido.

A determinação de uma solução aproximada e satisfatória para este problema de otimização, é de extrema importância, especialmente no contexto da utilização de veleiros autónomos nas mais variadas atividades de natureza civil e militar.

Este problema enquadra-se na classe de problemas designados por otimização meteorológica de trajectos, em que se pretende encontrar o caminho óptimo tendo em conta as

condições ambientais, tais como as condições do vento e do mar, bem como a presença de massas de terra e gelo. A otimização meteorológica de trajetos é um assunto que tem suscitado uma atenção progressiva dos meios académicos e da indústria nos últimos anos devido ao elevado impacto a nível económico e ambiental desta área de atividade. Note-se que cerca de 80 por cento do volume do comércio internacional de mercadorias é realizado através do mar (Sirimanne, Hoffman, Juan, Asariotis, Assaf, Ayala, Benamara, Chantrel, Hoffmann, Prenti, et al. 2019).

Na resolução de problemas de otimização meteorológica de trajetos, têm sido utilizadas as seguintes abordagens: método das isócronas, programação dinâmica, geometria diferencial e cálculo variacional, metodologias de otimização heurística, bem como técnicas baseadas em inteligência artificial, entre outras, ver, por exemplo, os trabalhos de (Thornton 1993, Zis, Psaraftis, & Ding 2020).

Este problema pode ser contextualizado em níveis de complexidade crescente relacionada com as características meteorológicas verificadas no campo de velocidade do vento e no estado do mar.

Assumindo um campo de velocidade de vento estacionário e uniforme, este problema foi recentemente abordado utilizando uma técnica heurística de otimização baseada no método de simulação do recozimento [(Fedorchuk 2020)]. Esta abordagem provou ser fiável e robusta [(Vidinha da Costa 2021)], permitindo-nos obter trajetórias ótimas que não estão amarradas a uma malha espacial pré-definida.

O método de simulação do recozimento foi originalmente desenvolvido por Metropolis e colaboradores [(Metropolis, Rosenbluth, Rosenbluth, Teller, & Teller 1953)] e tem sido aplicado eficientemente na resolução do conhecido problema do caixeiro-viajante. Esta técnica é inspirada no processo metalúrgico de recozimento. Neste processo, um metal é aquecido a uma alta temperatura após o que arrefece muito lentamente. Durante o processo de arrefecimento, as moléculas ajustam-se e reorganizam-se até que a malha de cristal atinja um estado de energia mínima. O método de simulação do recozimento tem a particularidade de apresentar uma implementação despida de complexidades, possibilitando uma abordagem eficaz a problemas de otimização não-lineares, em domínios complexos (Imprensa, Vetterling, Teukolsky, & Flannery 1986).

Neste trabalho, utilizando esta técnica de otimização heurística, abordaremos o problema de minimização do tempo de percurso à vela dum ponto *A* para um ponto *B* em condições de vento estacionário, mas não uniforme.

Por uma questão de simplicidade os efeitos do estado do mar, correntes, marés e deriva, não serão agora considerados.

Na aplicação desta técnica heurística, os caminhos do ponto A ao ponto B foram modelados através da concatenação de um pequeno número de segmentos orientados pré-definidos, caracterizados por pontos de guinada previamente estabelecidos. Entenda-se que, os pontos de guinada são posições espaciais que definem o fim e o início de segmentos consecutivos. É precisamente nas posições dos pontos de guinada, que podem ocorrer mudanças de bordo no percurso definido. Note-se que, a não-uniformidade espacial do campo do vento, sugere a necessidade de descrever as trajetórias do ponto A ao ponto B , usando um conjunto de numerosos pontos de guinada.

1. FORMULAÇÃO

A partir do campo de velocidade do vento v , o tempo de viagem T , entre os pontos A e B pode ser calculado através do Integral de Linha,

$$T = \int_{\Gamma} \frac{ds}{c} \quad (1)$$

onde Γ representa um trajeto genérico de A a B e c representa a velocidade ao longo do trajeto. A velocidade do veleiro, $c = c(\theta, v)$, depende do ângulo do vento verdadeiro θ entre a velocidade verdadeira do vento $v = \|v\|$ e o rumo do veleiro, e é estabelecido, como já foi mencionado, pelo diagrama polar de velocidade.

A escolha apropriada dos parâmetros a_n^m , $0 \leq n \leq 4$ e $1 \leq m \leq 3$, permite descrever um diagrama polar genérico, utilizando o seguinte polinómio trigonométrico:

$$c(\theta, v) = \sum_{n=0}^{n=4} \left(\sum_{m=1}^{m=3} a_n^m v^m \right) \mathcal{G}^n \quad (2)$$

Os parâmetros a_n^m , $0 \leq n \leq 4$ e $1 \leq m \leq 3$ utilizados neste trabalho foram determinados a partir do diagrama polar do "NRP Sagres", usando técnicas de interpolação e aproximação a partir de dados extraídos de (Mota 2014). Nesta formulação, quer a velocidade do veleiro, quer a velocidade do vento v é expressa em nós.

Definam-se N segmentos orientados concatenados L_i que estabelecem um caminho Γ entre os pontos A e B . Esta trajetória é, assim, definida por $N - 1$ pontos de guinada P_i e o tempo total de trajeto T associado a este caminho é

$$T(P_1, P_2, \dots, P_{N-1}) = \sum_{i=1}^N t(L_i) + \sum_{i=1}^{N-1} \Delta(P_i) \quad (3)$$

onde $t(L_i)$ representa o tempo de trajeto no segmento L_i e $\Delta(P_i)$ representa uma função semi-empírica de penalização temporal associada às mudanças de bordo executadas nos pontos de guinada P_i .

Conhecendo o campo de velocidade do vento, o tempo percorrido $t(L_i)$

$$t(L_i) = \int_{L_i} \frac{ds}{c(\theta, v)} \quad (4)$$

é calculado por integração numérica ao longo de cada trajeto L_i , $i = 1, \dots, N$.

A função de penalização foi postulada em (Vidinha da Costa 2021) como

$$\Delta(P_i) = \begin{cases} k_1 \frac{|\alpha_i|}{90} e^{-k_2 v_i} & \text{se a proa passar a linha do vento} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5)$$

onde v_i é a velocidade média de navegação verificada nas pernasadas L_i , e L_{i+1} , na vizinhança do ponto de guinada P_i , α_i é o i -ésimo ângulo total de guinada em graus e k_1 e k_2 são parâmetros ajustáveis, que podem ser determinados experimentalmente. Tendo em consideração o problema de minimizar o tempo de navegação entre dois pontos sob campos de velocidade de vento estacionário e uniforme, (Vidinha da Costa 2021) mostrou que a utilização do algoritmo de penalização temporal associado às mudanças de bordo, permite obter trajetórias ótimas mais realistas, que não podem ser obtidas utilizando técnicas expeditas, tais como usando a técnica *Velocity Made Good (VMG)*.

Claramente, a variabilidade espacial do campo de velocidade do vento irá determinar o número de pontos de guinada a utilizar.

Suponha-se que, o campo de velocidade do vento é conhecido numa malha apropriada que contém a região em que os possíveis percursos de A para B podem ser percorridos, por forma a poder obter-se a velocidade do vento v , por interpolação.

A consideração de zonas de terra ou regiões sobre as quais a travessia não pode ser praticada é modelada simplesmente postulando uma velocidade de vento igual a zero, nestas zonas.

A fim de minimizar (3), seguem-se os principais detalhes da técnica heurística proposta, que designaremos pelo acrónimo *VSA (Vectorized Simulated Annealing)*:

1. Gerar um conjunto U de diferentes trajetos de A a B , recorrendo a sequências de $N - 1$ pontos de guinada, com posições espaciais distribuídas aleatoriamente;
2. Calcular o tempo de percurso em cada um dos trajetos em U [utilizando (3), (4) e (5)] e reter um subconjunto $V \subset U$ de alguns dos percursos percorridos no menor tempo;
3. Reconstruir o conjunto U utilizando apenas os trajetos em V ;
4. Perturbar espacialmente as posições de cada um dos pontos de guinada que definem cada uma das trajetórias em U . A perturbação espacial consiste em impor uma alteração de semi-amplitude máxima ε , gerada aleatoriamente, nas coordenadas da posição espacial de cada ponto de guinada;
5. Repetir os passos 2 - 4 diminuindo sucessivamente a semi-amplitude ε da perturbação espacial dos pontos de guinada;
6. Interromper os cálculos quando a melhor trajetória em V não registar melhorias significativas.

Neste contexto, referir-nos-emos à repetição de passos 2-4 como *época*. A cardinalidade, $\#U$, do conjunto U é designada dimensão da população, e os elementos de V são designados como elementos *eleitos*.

Note-se que, $\varepsilon = \varepsilon(i)$, $i = 1, \dots, n, \dots$, deve ser uma função suavemente decrescente com a época i , a fim de assegurar uma exploração adequada do espaço de pesquisa do problema e a diminuição do risco das soluções oferecidas pela heurística serem mínimos locais.

Note-se que, no espaço de pesquisa, podem existir múltiplas trajetórias ótimas, devido à simetria geométrica exibida pelos veleiros e a certas características particulares do campo de velocidade do vento.

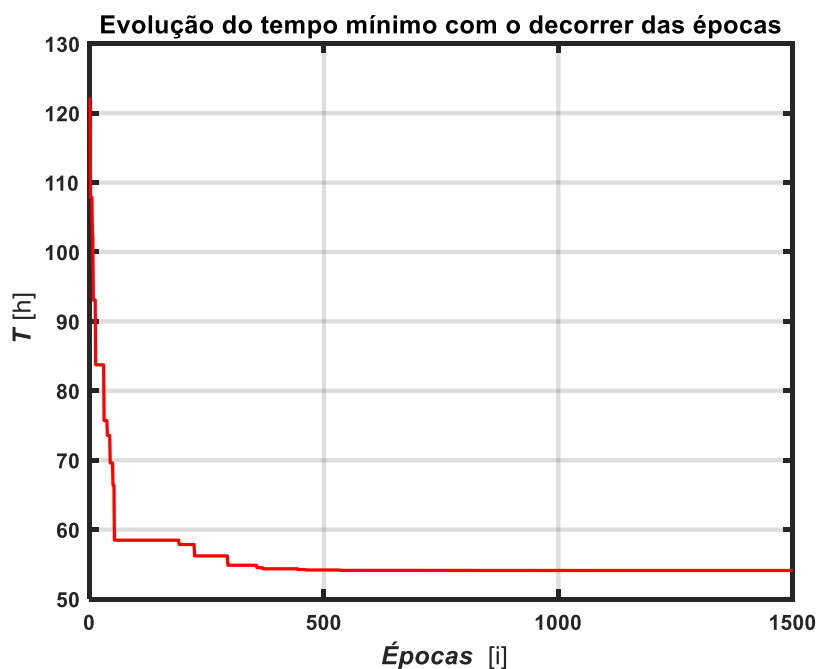


Figura 1- Evolução do tempo mínimo de trajeto com o decorrer das épocas

A convergência e o custo computacional da técnica heurística VSA depende da escolha adequada dos parâmetros, tais como:

1. A taxa de diminuição da perturbação espacial $\varepsilon = \varepsilon(i)$;
2. O número de épocas;
3. A cardinalidade $\#U$ (dimensão da população);
4. A cardinalidade $\#V$ (o número de elementos eleitos em cada época).

A escolha dos parâmetros acima referidos deve ser tentativamente ajustada, tendo em conta o número de pontos de guinada adotados, a resolução da malha em que o campo de velocidade do vento é conhecido e a escala espacial do problema.

Na Figura 1, podemos observar a evolução do tempo do melhor trajeto de cada época qual nos dá indicações relativamente à convergência desta heurística. De facto, nos cálculos associados às últimas épocas consideradas, podemos observar a presença de um planalto que confirma a convergência dos cálculos. A figura mencionada diz respeito à simulação apresentada na Figura 2.

2. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E DISCUSSÃO

Nestas subsecções apresentaremos os resultados da aplicação da heurística VSA na determinação e/ou aproximação de trajetórias ótimas.

Por uma questão de simplicidade, utilizaremos coordenadas cartesianas para descrever localizações geográficas, identificando as direcções este-oeste e norte-sul com os eixos coordenados X e Y , respectivamente. A unidade de distância utilizada neste referencial será a milha náutica.

Em todas as simulações, utilizaremos os dados relativos ao "NRP Sagres", um grande veleiro com armação de barca. Em todas as simulações o ponto A (ponto de partida) e o ponto B (ponto de chegada) localizam-se nas posições $(-30,-30)$ e $(30,30)$ do sistema de coordenadas, estando por isso separados entre si cerca de 85 milhas náuticas.

Na subsecção 3.1, adoptaremos um ambiente simplificado a fim de realçar o efeito da função de penalização temporal (5) e consideraremos um vento NNE, constante e uniforme, de intensidade de 10 nós,

Na subsecção 3.2, apresentamos simulações com um campo de velocidade do vento não uniforme, gerado sinteticamente para ilustrar o comportamento da metodologia VSA..

Por fim, na subsecção 3.3, o campo de velocidade do vento condições é idêntico ao apresentado na subsecção anterior. No entanto, adicionámos zonas de terra e/ou obstáculos, que devem ser evitados ao longo do percurso, tendo por objectivo testar a eficiência da heurística proposta na criação de trajetórias ótimas alternativas.

As simulações numéricas foram realizadas num sistema equipado com uma 6ª geração Intel® Core™i7- 6650U Dual Core™ processador e 16GB de RAM.

2.1 Campo de velocidade estacionário e uniforme – simulações preliminares

Nas Figuras 2 e 3 mostramos os trajetos ótimos determinados pela técnica VSA usando 2 pontos de guinada.

Na simulação exibida na Figura 2, não utilizámos a função de penalização temporal que estima e acrescenta ao cálculo do tempo total percorrido, o tempo gasto na execução das mudanças de rumo nos pontos de guinada. Como se pode observar, as trajetórias ótimas geradas apresentam grandes mudanças de rumo em todos os pontos de guinada determinando um atraso de 0,0719 horas. O tempo total de percurso devidamente corrigido será de 45,9497 horas.

Na simulação mostrada na Figura 3, a trajetória ótima foi gerada, tendo em consideração a função de penalização temporal. Nestas circunstâncias, verifica-se que um dos pontos de guinada que se encontra no caminho ótimo é anulado, devido ao posicionamento colinear em relação aos dois caminhos que define. Este facto reduz o tempo despendido na ocorrência de mudanças de bordo desnecessárias, permitindo assim a obtenção de uma trajetória que pode ser navegada em 45.9138 horas. Uma discussão completa destes detalhes é apresentada em (Vidinha da Costa 2021).

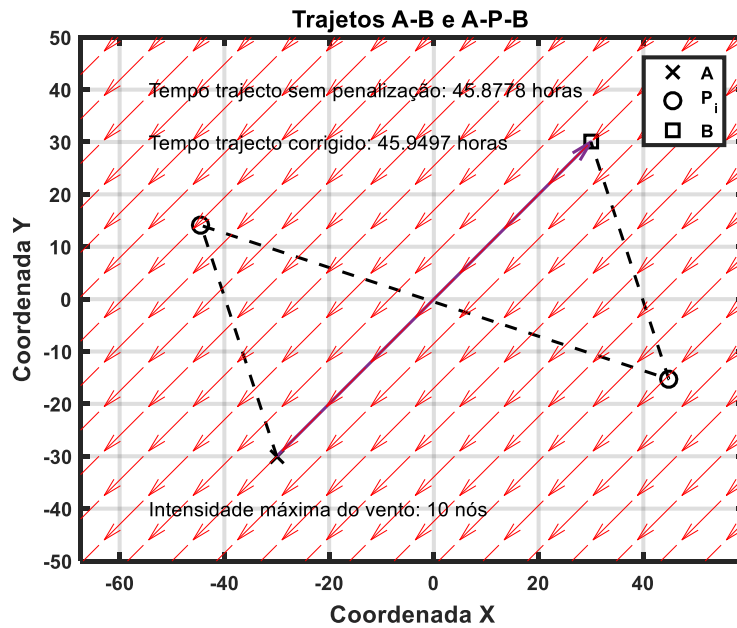


Figura 2- Trajetória ótima com 2 pontos de guinada sem utilizar a função de penalização temporal

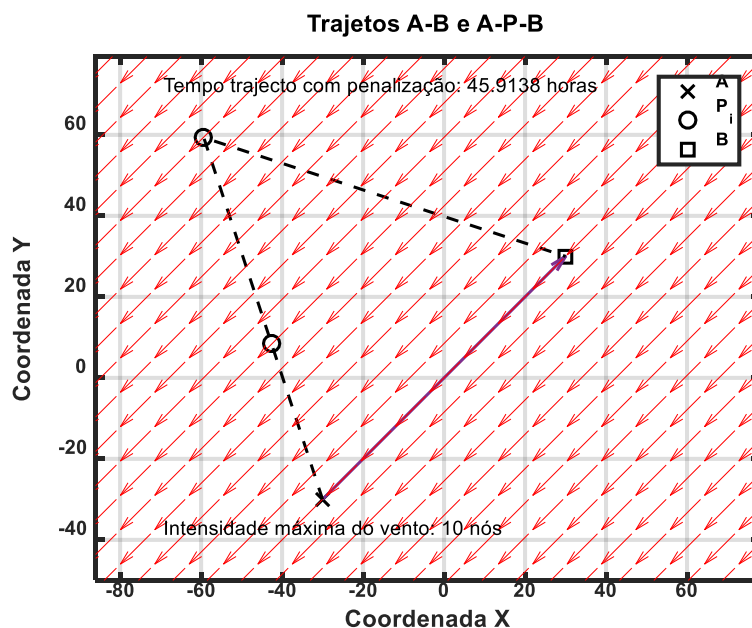


Figura 3- Trajetória ótima com 2 pontos de guinada, tendo em consideração a função de penalização temporal

2.2 Campo de velocidade estacionário e não uniforme

Nesta subsecção, aplicámos a técnica heurística *VSA* para aproximar trajetórias ótimas do mesmo ponto *A* até ao mesmo ponto *B*, sob um campo de velocidade do vento estacionário, mas não uniforme. O campo de velocidade do vento utilizado é representado graficamente nas figuras 4 e 5 e foi gerado recorrendo a um campo potencial de velocidade sintético.

Na Figura 4 foram utilizados apenas dois pontos de guinada, enquanto na Figura 5 utilizámos cinco pontos de guinada. Pode observar-se que as trajetórias ótimas geradas são idênticas. A trajetória aproximada com cinco pontos de guinada é realizada em menor tempo (48,1785 horas) do que a trajetória que utiliza apenas dois pontos de guinada (54,1133 horas). Claramente, a utilização de mais pontos de guinada permite uma melhor adaptação das trajetórias geradas pela técnica *VSA*, à variabilidade espacial do campo de velocidade do vento.

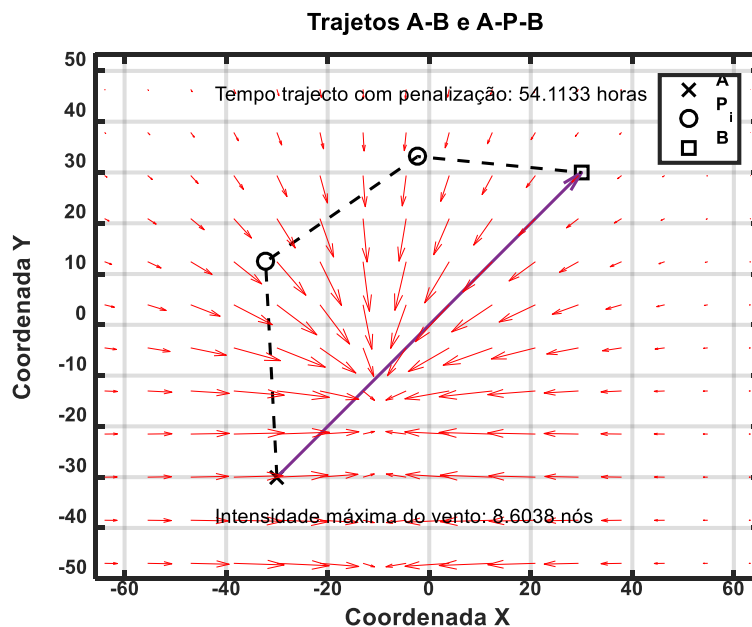


Figura 4- Trajetória ótima com 2 pontos de guinada, tendo em consideração a função de penalização temporal

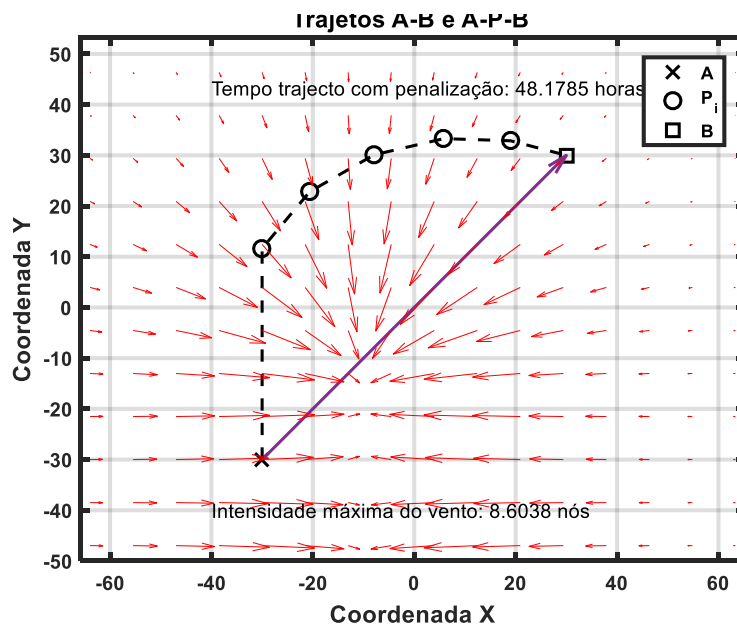


Figura 5- Trajetória ótima com 5 pontos de guinada, tendo em consideração a função de penalização temporal

2.3 Campo de velocidade estacionário e não uniforme – presença de massas de terra

Na presente subsecção utilizámos as mesmas condições ambientais utilizadas nas simulações realizadas na secção anterior, subsecção 3.2. O comportamento da heurística VSA na presença de massas de terra é testada nesta subsecção usando cinco e dez pontos de guinada, respectivamente, como se pode ver nas Figuras 6 e 7.

Para este efeito, posicionámos uma ilha circular, com centro (-25, 0) e raio de 10 milhas, na região de passagem das trajetórias ótimas determinadas na subsecção 3.2. A localização desta zona de terra é representada nas Figuras 6 e 7 com o símbolo '*' a azul. Como podemos observar nas simulações apresentadas nestas figuras, as trajetórias ótimas geradas são idênticas, embora representem diferentes aproximações da trajetória ótima procurada.

Podemos observar que as trajetórias ótimas geradas constituem percursos alternativos credíveis que evitam a massa de terra.

Em ambas as simulações os pontos de guinada estão concentrados nas áreas de maior variabilidade espacial do campo de velocidade do vento. A trajetória aproximada com dez pontos de guinada é realizada em menos tempo (57,3109 horas) do que a trajetória com cinco pontos de guinada (59,2772 horas). Também aqui podemos observar que a utilização de mais pontos de guinada permite uma melhor adaptação das trajetórias geradas pela técnica VSA, à variabilidade espacial do campo de velocidade do vento.

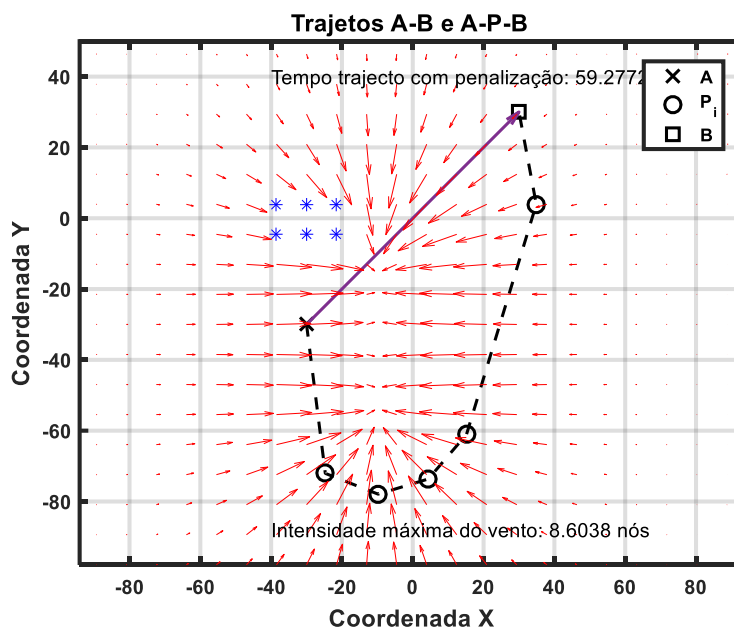


Figura 6- Trajetória ótima com 5 pontos de guinada, tendo em consideração a função de penalização temporal e a existência de terra

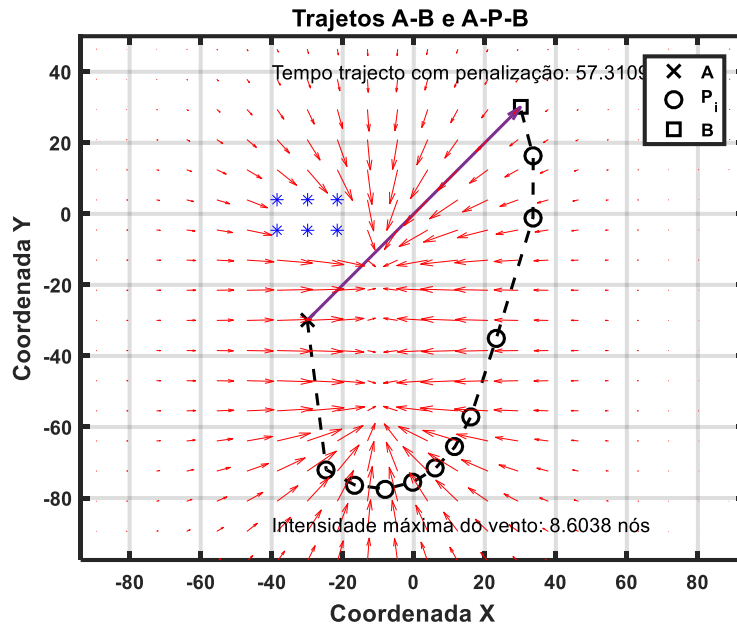


Figura 7- Trajetória ótima com 10 pontos de guinada, tendo em consideração a função de penalização temporal e a existência de terra

3. CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentámos uma técnica de otimização heurística que designámos por *VSA (Vectorized Simulated Annealing)* para minimizar trajectos percorridos por veleiros, com ventos estacionários e não-uniformes.

Constatamos que a técnica proposta oferece respostas satisfatórias e credíveis ao problema formulado. Consegue adicionalmente fornecer trajectos óptimos que evitam massas de terra ou regiões nas quais a travessia não pode ser praticada.

Os resultados preliminares das simulações sugerem os seguintes desenvolvimentos futuros:

1. Comparar os resultados oferecidos pela técnica heurística *VSA* com os resultados oferecidos por outras abordagens do mesmo problema, avaliando os méritos e deméritos da metodologia proposta.
2. Melhorar a eficiência computacional da técnica heurística *VSA* no que diz respeito à fiabilidade, robustez e custos computacional, automatizando a escolha dos principais parâmetros de cálculo responsáveis pela convergência e eficiência da metodologia proposta.

3. Dotar a técnica heurística VSA da possibilidade de otimizar trajetos de veleiros em condições de vento não estacionário e não uniforme.
4. Dotar a técnica heurística VSA, da possibilidade de considerar os efeitos das correntes oceânicas, correntes de maré, assim como da deriva.

Agradecimentos Gostaria de agradecer profundamente ao Professor Miguel Moreira, pelo apoio incessante, pela ajuda e supervisão valiosas na realização deste trabalho, mas principalmente, pela motivação e disponibilidade cruciais ao longo deste percurso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fedorchuk, M. (2020). Otimização de trajetórias de veleiros. Master's thesis, Escola Naval.
- Metropolis, N., A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller, & E. Teller (1953). Equation of state calculations by fast computing machines. *The journal of chemical physics* 21(6), 1087–1092.
- Mota, J. M. S. d. (2014). Otimização de derrotas ao campo sinóptico do vento-aplicação prática ao NRP sagres. Master's thesis, Escola Naval.
- Press, W. H., W. T. Vetterling, S. A. Teukolsky, & B. P. Flannery (1986). *Numerical recipes*, Volume 818. Cambridge University press Cambridge.
- Sirimanne, S. N., J. Hoffman, W. Juan, R. Asariotis, M. Assaf, G. Ayala, H. Benamara, D. Chantrel, J. Hoffmann, A. Premti, et al. (2019). Review of maritime transport 2019. Technical report, tech. rep.
- Thornton, T. (1993). A review of weather routing of sailboats. *Journal of Navigation* 46(1), 113–129.
- Vidinha da Costa, T. (2021). Otimização, em tempo real, de trajetórias de veleiros. Master's thesis, Escola Naval.
- Zis, T. P., H. N. Psaraftis, & L. Ding (2020). Ship weather routing: A taxonomy and survey. *Ocean Engineering* 213, 107697.