



# ESCOLA NAVAL



*talant de bi-faire*

JOÃO AZEVEDO GOULÃO

## **IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DE MANOBRABILIDADE DE UM NAVIO**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia Naval – Ramo Mecânica



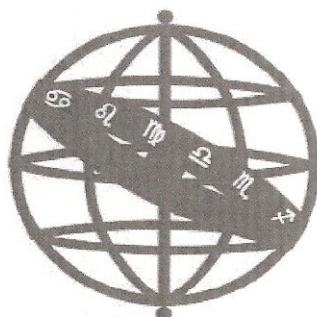
Alfeite  
2019





# ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



JOÃO AZEVEDO GOULÃO

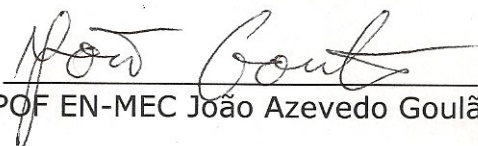
## IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DE MANOBRA- BILIDADE DE UM NAVIO

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências  
Militares Navais, na especialidade de Engenharia Naval –  
Ramo de Mecânica

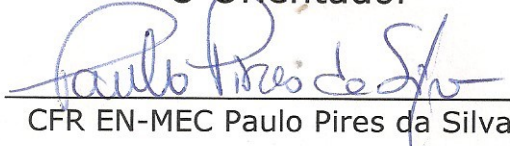
**Orientação de:** CFR EN-MEC Paulo Alexandre Marques Pires da Silva

**Coorientação de:** CFR M Victor Fernando Plácido da Conceição

O Aluno Mestrando

  
ASPOF EN-MEC João Azevedo Goulão

O Orientador

  
CFR EN-MEC Paulo Pires da Silva

Alfeite  
2019



## **Epígrafe**

*"The wind and the waves are always on the side of the ablest navigator."*

Edmund Gibbon (1788)



## **Agradecimentos**

Em geral, a todos quanto contribuíram da uma ou outra forma para a elaboração deste trabalho de investigação.

Em particular, uma referência muito sentida ao meu orientador o CFR EN-MEC Pires da Silva pela sua disponibilidade permanente, sentido crítico apurado ao ínfimo pormenor e palavras de estímulo.

Também aos meus coorientadores CFR M Victor Fernando Plácido da Conceição e Professor Doutor Rui Pedro Chedas Sampaio.

Aos CTEN STH Gomes Carvalho e 1TEN M Liliana Margarida Santos do Instituto Hidrográfico (IH) pela disponibilidade no esclarecimento sobre os conteúdos existentes na Marinha acerca da temática.

Ao CTEN EN-MEC Santos Fonseca e elementos do Departamento da Plataforma (DPA) da Direção de Navios (DN) no auxílio de preparação de informações iniciais para desenvolvimento do algoritmo utilizado.

Aos 1TEN EN-AEL Lucas da Cruz, SAJ. ETI Alves Mateus e restante equipa do Departamento de Armas e Eletrónica (DAE) da DN pela ajuda na montagem e adaptação dos sistemas de bordo para elaboração das provas.

À Divisão de Planeamento do Comando Naval (CN) pela disponibilização do período de embarque que permitiu a realização das provas de manobrabilidade.

Ao Comandante do navio utilizado para a realização das provas necessárias ao projeto e sua guarnição, pela hospitalidade, disponibilidade e empenho na sua realização.

À Esquadilha de Navios de Superfície (ENSUP) por agilizar a ação entre a Escola Naval e os vários navios em que se desenrolaram os trabalhos preparatórios desde o início do projeto.

À Escola Naval (EN) pelos ensinamentos e engrandecimento pessoal e profissional que me possibilitou.

Aos meus pais pelo apoio.



## Resumo

A presente investigação, após uma pequena resenha histórica sobre a evolução naval e respetivo desempenho das plataformas navais, apresenta um trabalho de estudo de critérios internacionais definidos nos normativos de provas de manobrabilidade.

Posteriormente apresenta o estudo, verificação e aquisição de dados reais de provas de manobrabilidade, demonstrando a possibilidade da criação de um sistema automático de aquisição de dados. Este, apresenta-se com custo reduzido e de fácil utilização pela própria guarnição de um navio, que assim, poderá efetuar provas de manobrabilidade com pouco impacto tanto em encargos financeiros, como na disponibilidade operacional do navio. Pode ser utilizado em navegação corrida, para obter e atualizar regularmente as suas características de manobrabilidade.

Verifica-se também a aplicação de um modelo matemático, para simulação de provas de manobrabilidade em duas dimensões, na mesma classe de navios da Marinha Portuguesa de onde foram recolhidos os dados reais. Desta feita, em ambiente simulado não afetado por vento e ondulação.

É efetuada a comparação das provas reais realizadas e as da utilização do algoritmo desenvolvido no trabalho para as provas simuladas.

Conclui-se que o simulador criado se revelou viável para este tipo de testes. Apresentou um bom comportamento na simulação de curvas de giração, apesar de nas provas de ZigZag ou espiral ter apresentado margem de erro. Em todo o caso, não o inviabiliza, apesar de exigir alguma correção.

Também, o sistema expedito de recolha de dados automático, ainda que com erros associados, revelou poder vir a ser uma opção de aplicação prática nos navios, para captura de características de manobrabilidade e atualização de parâmetros da manobra.

**Palavras chave:** provas de manobrabilidade, normas, identificação de parâmetros, simulação de manobrabilidade.

## **Abstract**

This Research, after a brief historic review about naval evolution and respective naval platforms performance, presents a work based in studies about international criteria defined by normative of manoeuvring trials.

In addition shows a study, real data verification and acquisition for manoeuvring trials, showing the possibility of creating an automatic system for data acquisition. This system also reveals itself as low cost and easy to be used by a ship crew, in order to easily perform manoeuvring trials, with small impact both in financial weight and in operational availability. It can be used on normal navigation, aiming to regularly acquire and update the manoeuvring features of a ship.

By other hand, it studies the appliance of a two dimensions mathematical model for manoeuvring trials simulation in the same class of Portuguese navy ship, source of the real data, for a simulated environment without wind and waves.

It compares the real trials to the simulating ones resulted from the algorithm developed in the research.

In conclusion, the created simulator revealed to be practicable for this kind of trials, proving good results when simulating turning circles. Even though in the ZigZag and spiral manoeuvre showed some error, it does not depreciate the developed algorithm at all, just requires some adjustments.

Also significant, is the automatic data acquisition system, with some incorporated errors, revealed that can be an option to be implement in ships to obtain manoeuvring characteristics with a view to update the manoeuvre parameters.

**Keywords:** manoeuvring trials, normative, parameters identification, simulation.

# Índice

Epígrafe.....	i
Agradecimentos .....	iii
Resumo .....	v
Abstract.....	vi
Índice.....	vii
Índice de Figuras.....	viii
Índice de tabelas.....	ix
Índice de equações .....	x
Lista de Abreviaturas, siglas e acrónimos .....	xiii
Introdução.....	1
1 Enquadramento .....	5
1.1 Enquadramento Técnico.....	10
1.2 Problemática e Objetivo .....	12
1.3 Metodologia.....	14
2 Manobrabilidade do Navio.....	15
2.1 Provas de mar .....	19
2.1.1 Curva de giração.....	24
2.1.2 Manobra de ZigZag .....	25
2.1.3 Manobra espiral .....	27
2.1.4 Pullout .....	27
2.1.5 Teste de paragem.....	28
2.2 Importância das Provas.....	28
3 Algoritmo para simulação do movimento 2D de um navio .....	31
3.1 Explicação do modelo MMG .....	32
3.2 Equações matemáticas para aplicação no simulador.....	42
3.2.1 Modelo da máquina do leme.....	44
3.2.2 Modelo do avanço da hélice.....	45
3.2.3 Cálculo dos distúrbios iniciais.....	47
3.3 Algoritmo para simulação de movimento de um navio .....	55
4 Determinação dos dados reais de manobrabilidade de um navio .....	65
4.1 Obtenção de dados das provas de manobrabilidade .....	66
4.2 Algoritmo para tratamentos de dados de manobrabilidade de provas reais	70
5 Resultados.....	77
Conclusão .....	81
Bibliografia.....	83

Apêndice A. Parâmetros do navio usados na simulação.....	93
A.1. Dados gerais do navio.....	93
A.2. Dados calculados com informações iniciais .....	94
A.3. Dados do leme e propulsão .....	95
A.4. Dados específicos da hélice .....	97
A.5. Dados específicos do leme.....	97
Apêndice B. Fichas de controlo de provas de manobrabilidade .....	99
B.1. Ficha de cabeçalho geral .....	99
B.2. Ficha de curvas de giração .....	101
B.3. Ficha de provas de ZigZag.....	102
B.4. Ficha de provas de Espiral.....	103
Apêndice C. algoritmo do simulador.....	105
C.1. Programa base simulado .....	105
C.2. Algoritmo dos coeficientes hidrodinâmico .....	107
C.3. Algoritmo dos dados do navio.....	109
C.4. algoritmo da máquina de leme.....	111
Apêndice D. Algoritmo de aquisição de dados.....	113
D.1. Programa base real.....	113
D.2. Algoritmo de aquisição de dados do GPS .....	115
D.3. Algoritmo de aquisição de dados do anemómetro .....	117
D.4. Algoritmo de aquisição de dados do radar .....	118
D.5. Algoritmo de aquisição de dados do SGP .....	119
D.6. Algoritmo de tratamento de dados .....	120
D.7. Algoritmo de seleção do tipo de prova.....	120
D.8. Algoritmo de criação de gráficos de cruvas de giração.....	121
D.9. Algoritmo de criação de gráficos de provas de espiral.....	123
D.10. Algoritmo de criação de gráficos de provas de ZigZag.....	124

## Índice de Figuras

Figura 1- Recorte do quadro de Joseph M.W.Turner de 1839, representando a última viagem do Temeraire para desmantelamento (fonte: <a href="http://app.regiaocentro.net/sartigo/index.php?x=4944">http://app.regiaocentro.net/sartigo/index.php?x=4944</a> ) .....	9
Figura 2- Momento endireitante (fonte: Aula 5_18 - apresentação de 22 de fevereiro de 2017 em Arquitetura naval).....	16

Figura 3- Forças de sustentação do navio na água (Fonte: ESTADO MAIOR DA ARMADA, 2012) .....	17
Figura 4 - Explicação da guinada de um navio (Fonte: FUWA & KASHIWADANI, 2007) .....	19
Figura 5- Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predicitions, (Fonte: Yasukawa & Yoshimura (2014)).....	34
Figura 6- Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predicitions (Fonte: Yasukawa & Yoshimura, (2014)).....	39
Figura 7- sistemas de coordenadas (Fonte: (SUTULO, 2013)) .....	44
Figura 8 - Fluxograma do algoritmo de simulação do movimento do navio .....	56
Figura 9 - informação introduzida pelo utilizador .....	57
Figura 10 - Definição de saltos da prova de espiral .....	59
Figura 11 - Acompanhamento da progressão .....	60
Figura 12 - Gráfico da curva de giração .....	62
Figura 13 – Gráfico da prova de ZigZag .....	62
Figura 14 - Gráfico da prova de espiral .....	63
Figura 15 - Abertura de portas COM .....	67
Figura 16 - Fluxograma do algoritmo de tratamento de dados reais do navio .	71
Figura 17 - Inserção de dados pelo utilizador .....	72
Figura 18 - Seleção automática de prova .....	73
Figura 19 – Gráfico de curva de giração real .....	74
Figura 20 - Gráfico da prova de ZigZag real .....	74
Figura 21 - Gráfico da prova de espiral real.....	75

## **Índice de tabelas**

Tabela 1 - Identificação e significado da simbologia utilizada .....	34
Tabela 2 - Constantes para cálculo das derivadas hidrodinâmicas.....	53
Tabela 3 - Valores reais de provas de manobrabilidade.....	77
Tabela 4 - Valores de erro para provas reais de curvas de giração.....	77

## Índice de equações

Equação 1 - Forças e momento de 3 GDL .....	35
Equação 2 - Forças e momento de 3 GDL dos distúrbios externos .....	35
Equação 3 - Junção das equações internas e externas .....	36
Equação 4 - Divisão dos distúrbios .....	36
Equação 5 - Forças hidrodinâmicas produzidas pelo casco .....	36
Equação 6 - Componente lateral da velocidade adimensionalizada .....	36
Equação 7 - Taxa de guinada adimensionalizada .....	37
Equação 8 - Forças hidrodinâmicas produzidas pelo casco adimensionalizadas	37
Equação 9 - Avanço produzido pela hélice.....	38
Equação 10 - Impulsão produzida pela hélice .....	38
Equação 11 - Função de rácio de avanço da hélice .....	38
Equação 12 - Rácio do avanço da hélice.....	38
Equação 13 - Coeficiente de esteira da hélice .....	38
Equação 14 - Ângulo geométrico de entrada do fluxo .....	39
Equação 15 - Forças hidrodinâmicas produzidas pelo leme.....	39
Equação 16 - Fator da força lateral a atuar no casco do navio induzida pelo leme .....	40
Equação 17 - Força normal produzida pelo leme.....	40
Equação 18 - Velocidade do fluxo produzido.....	40
Equação 19 - Ângulo do fluxo produzido .....	40
Equação 20 - Velocidade tangencial ao fluxo para ângulo de leme zero.....	40
Equação 21 - Ângulo efetivo de fluxo para o leme .....	41
Equação 22 - Velocidade tangencial ao fluxo com ângulo de leme .....	41
Equação 23 - Velocidade longitudinal do fluxo para o leme .....	42
Equação 24 - Rácio da fração da esteira.....	42
Equação 25 - Modelo MMG para 3 GDL.....	42
Equação 26 - Modelo genérico de ângulos de leme.....	44

Equação 27 - Função genérica de ângulos de leme.....	45
Equação 28 - Variável auxiliar para cálculo de ângulos de leme .....	45
Equação 29 - Força de avanço da hélice .....	46
Equação 30 - Equações cinemáticas a adicionar .....	47
Equação 31 - Formatação das equações de movimento para serem usadas no MATLAB® .....	48
Equação 32 - Matriz jacobiana das velocidades.....	48
Equação 33 - Matriz jacobiana das acelerações.....	48
Equação 34 - Velocidade do navio .....	49
Equação 35 - Velocidade de avanço do navio adimensionalizada .....	49
Equação 36 - Velocidade de deslocamento lateral do navio adimensionalizada	49
Equação 37 - Velocidade de guinada adimensionalizada.....	49
Equação 38 - Força adimensional atuada sobre o casco do navio e sobre o leme devido ao avanço .....	50
Equação 39 - Força adimensional atuada sobre o casco do navio e sobre o leme devido ao deslocamento lateral .....	50
Equação 40 - Força adimensional atuada sobre o casco do navio e sobre o leme devido à guinada.....	50
Equação 41 - Caimento relativo .....	52
Equação 42 - Força dimensional atuada sobre o casco do navio e sobre o leme devido ao avanço .....	54
Equação 43 - Impulsão efetiva .....	55
Equação 44 - Força dimensional atuada sobre o casco do navio e sobre o leme devido ao deslocamento lateral .....	55
Equação 45 - Força dimensional atuada sobre o casco do navio e sobre o leme devido à guinada.....	55



## **Lista de Abreviaturas, siglas e acrónimos**

ABS	American Bureau of Shipping
CN	Comando Naval
CSV	Comma-separated values
DAE	Departamento de Armas e Eletrónica
DGPS	Differential Global Positioning System
DN	Direção de Navios
DPA	Departamento da Plataforma
ECDIS	Electronic Chart Display and Information System
EN	Escola Naval
ENSUP	Esquadrilha de Navios de Superfície
GDL	Graus de liberdade
GT	Gross Tonnage
IH	Instituto Hidrográfico
IMO	International Maritime Organization
INA	Instruções de Navegação da Armada
ISO	International Organization of Standardization
ITTC	International Towing Tank Conference
JTTC	Japanese Towing Tank Conference
LPP	Comprimento entre perpendiculares
MMG	Manoeuvring Modelling Group
NMEA	National Marine Electronic Association
N.R.P.	Navio da República Portuguesa
N.S.	Nuclear Ship
RAS	Reabastecimento no mar
RIEAM	Regulamento Internacional para Evitar Abalroamentos no Mar
SGP	Sistema de Gestão de Plataforma
SNAME	The Society of Naval Architects & Marine Engineers
U.S.S.	United States Ship

VERTREP	Vertical replenishment
W-AIS	Warship Automatic Identification System
WIG	Wing in Ground-effect (vehicle)

## Introdução

Desde há milénios que os navios contribuíram para o desenvolvimento humano e económico. Foram desenvolvidos pelo homem até alcançarem níveis de tal complexidade, que se tornaram ícones arquitetónicos e de engenharia, em que nada é deixado ao acaso, para poderem transportar enormes quantidades de pessoas ou carga em segurança, capazes de enfrentar as forças colossais das massas de água marítimas.

Tal só é possível devido ao desenvolvimento técnico que garanta aos navios a sua flutuabilidade, estabilidade e integridade estrutural, mesmo quando sujeitos às mais adversas e extremas condições, tanto resultantes dos elementos naturais, como das exigentes respostas de versatilidade, que lhe são exigidas na sua manobrabilidade.

Após a construção de um navio, são efetuadas provas de mar, que testam o seu desempenho em termos de manobrabilidade, concordantes com as exigências de normas internacionais para aferirem a competência do navio para os fins que foi concebido.

É criado um caderno de elementos evolutivos que contém os resultados das provas de manobrabilidade e as informações relativas às características do navio, como particularidades da forma do casco, atributos do sistema de propulsão, hélice e informações gerais do deslocamento, calado e caimento.

Contudo, as características técnicas projetadas e verificadas aquando da sua construção, sofrem progressiva degradação ao longo do seu tempo de vida, devido ao *stress* dos materiais, às alterações e às remodelações a que vão sendo continuamente sujeitos. Estas alteram as suas características de versatilidade e de segurança que podem pôr em risco a segurança do próprio e/ou de terceiros.

Assim, as provas de mar devem ser regulares. Para que os responsáveis pela navegação conheçam o desempenho do navio, de forma a decidirem célere e assertivamente aquando da necessidade de manobras a efetuar, principalmente em situações inopinadas e de emergência.

Nos navios da Marinha, tal não difere, até porque, a estes são exigidas condições de manobrabilidade ainda muito superiores, resultantes do tipo de atividade operacional a que são sujeitos, operando a distâncias muito curtas, manobras de evasão e enfrentarem condições extremas de meteorologia e condições do mar já impróprias para outros tipos de navios.

Mas a regularidade esperada não acontece na prática, a não ser em casos específicos por imposição de alguma das exigências previstas nas Instruções de Navegação da Armada (INA) 2. Também, as provas de manobrabilidade são muito caras e habitualmente pouco oportunas, devido ao planeamento operacional dos navios e estes envelhecem e alteram as suas características ao longo dos anos, sem que as suas equipas de navegação conheçam muitas vezes os valores atualizados, trabalhando com registos antigos de provas de manobrabilidade, que no limite podem ser comprometedores da segurança, em caso de sujeitos a condições extremas de manobra.

Assim, para abordar esta problemática, é hoje possível, com o aumento exponencial da tecnologia verificado nos últimos anos, desenvolver ferramentas de auxílio aos utilizadores dos navios, que os ajudem a melhor perceber o seu comportamento no sentido de uma melhor tomada de decisão. No presente trabalho, propõe-se o estudo da questão da atualidade dos valores teóricos de testes de provas, impondo-se como objetivos do mesmo, em primeiro lugar a criação de um sistema simples de aquisição de dados de baixo custo para captura de momentos evolutivos, à disposição da própria tripulação do navio, que possam ser regularmente adquiridos e atualizados, que sirvam de referência para o conhecimento da competência de manobrabilidade do navio por parte da respetiva equipa de navegação.

Em segundo lugar, construir um simulador com base em equações matemáticas pré-estabelecidas e verificar a sua utilização para descrever em ambiente simulado o movimento do navio, podendo desta forma aferir o comportamento aproximado do navio, em face de determinadas condições introduzidas pelo utilizador, para poder ser utilizado para fins de planeamento nas operações de navegação.

Para o efeito, pretende-se desenvolver dois sistemas no software MATLAB<sup>®1</sup> que permitam de uma maneira descomplicada ao utilizador, por um lado efetuar provas de manobrabilidade, por outro simular o comportamento do navio.

Para tal, pretende-se efetuar provas reais de manobrabilidade numa classe de navios da Marinha Portuguesa, de forma a aferir a eficácia dos sistemas desenvolvidos no trabalho, para poderem ser aplicados na prática e como doutrina de Marinha.

Relativamente à sua estrutura, respeitará as normas de elaboração de trabalhos da Escola Naval (EN). Naquilo em que sejam omissas, respeitar-se-ão as normas de formatação da *American Psychology Association (APA) 6th edition*, como opção válida conforme o Cap. 3 e 3.2 das normas da EN.

---

<sup>1</sup> Plataforma de programação criada especialmente para engenheiros e cientistas (Fonte: <https://www.mathwoks.com/discovery/what-is-matlab.html>)



## 1 Enquadramento

Etimologicamente a palavra *Navio*, é um substantivo com origem do latim *navigium*. Numa abordagem simplista, e usando o conceito versado na convenção de (UNITED NATIONS, 1982), “um navio é toda a embarcação flutuante, dotada de certa capacidade de autopropulsão, e tem estatuto jurídico de acordo com a sua finalidade”.

Segundo o Regulamento Internacional para evitar abalroamentos no mar (ORGANIZAÇÃO MARÍTIMA INTERNACIONAL, 2007), “a palavra navio designa todo o veículo aquático de qualquer natureza, incluindo os veículos sem imersão, os veículos WIG e os hidroaviões, utilizado ou suscetível de ser utilizado como meio de transporte sobre a água.”

(LEWIS & O'BRIEN, 1965) definem o navio dos tempos modernos, referindo-se aos grandes transatlânticos, como sendo basicamente “uma caixa de metal flutuante, de quase inimaginável complexidade, equipada pelo homem para carregar milhares de pessoas de cada vez, ou milhares de toneladas de carga através dos vastos oceanos”. Tal definição ilustra bem o culminar do que foi o desenvolvimento naval até ao presente e o seu contributo para a economia e para a sociedade.

Para atingir este objetivo, os navios tiveram que conquistar a capacidade de resistir a enormes forças impostas pelos fenómenos naturais, como por exemplo a ondulação, caracterizada pela aleatoriedade, tanto em direção como em dimensão. São hoje, o resultado de milénios de desenvolvimento e de experiências ousadas de pioneiros arrojados, que muitas vezes acabaram tragicamente.

Desde muitos séculos antes de Cristo (HALL, 2017) que os navios desenvolveram um papel fundamental na evolução humana. Em tempos de paz, permitiram ao ser humano explorar, colonizar e efetuar trocas comerciais. Em tempos de guerra, foram instrumento fundamental do domínio territorial, desde os conflitos do Mediterrâneo na antiguidade até à modernidade.

Perde-se no tempo a memória de quando o homem começou a navegar os mares e os rios. A navegação contribuiu significativamente para o estabelecimento de domínio territorial tanto marítimo como terrestre, permitindo ultrapassar barreiras geográficas colossais.

Segundo Kidcyber (<http://www.kidcyber.com.au/ships-and-boats-timeline/>), o conceito navio terá surgido há milhares de anos, sendo considerado o meio de transporte mais antigo do mundo. Terá iniciado com embarcações construídas fixando vários troncos em paralelo que permitiam flutuação. Mas, o primeiro verdadeiro navio apareceu após a descoberta de que escavando troncos tornando-os ocos, melhorava a flutuabilidade, permitindo transporte de pessoas e bens, sendo este o primeiro meio de deslocação dentro de água.

Apenas com a ajuda das mãos, nem sempre era possível guiar a embarcação no rumo desejado. Surgiu então a estaca forçada no fundo dos rios, para controlo da direção pretendida. Avançando para locais mais profundos, fora do alcance das estacas, desenvolveram-se instintivamente os remos, sempre no intuito de facilitar a locomoção.

O primeiro grande avanço na propulsão dos navios verifica-se quando o Homem substitui a força muscular pela força do vento, que apesar de já existir anteriormente, é por volta de 3000 a.C. no Egito, que a vela se desenvolveu de forma séria, por necessidade de grandes transportes de materiais para a construção de monumentos, aproveitando a via do Rio Nilo.

A embarcação mais antiga descoberta até ao momento, foi segundo (ONLINE EDITORA, 2016) uma canoa em madeira de pinho que terá sido construída há cerca de 10.000 anos, denominada o barco de Pesse, exposto no museu de Drents, na cidade holandesa de Assen. Também, segundo (LAWLER, 2002) foi encontrada no Kuwait, uma embarcação construída em junco, com 7.000 anos.

No séc. XXX a.C. no Egito já se montavam cascos de embarcações. Em 1954, junto às pirâmides, foi descoberto o *Khufu*, um veleiro em perfeito estado de conservação, que hoje ali se encontra em exposição, que ali fora enterrado cerca de 2500 a.C..

Mais recentemente, noticiado pelo Diário de Notícias (23 de outubro 2018), foi descoberto no Mar Negro o navio naufragado mais antigo do mundo, com 2400 anos de idade, apresentando-se em muito boas condições.

Estes e outros registos demonstram que por volta de 2.000 a.C. já existia forte atividade naval no Mediterrâneo, Índia, Sri Lanka, Roma e Grécia antigas.

A Civilização Grega precisou de deslocar-se no Mar Mediterrâneo e defender-se dos Persas. A utilização de embarcações em conflitos armados nas Grécia e Roma antigas levou ao desenvolvimento das galeras, enormes navios com duas ou três fileiras de remadores, denominados respetivamente birremes e trirremes. Respondiam às necessidades de grande velocidade e manobrabilidade. Utilizados em grandes batalhas como a de Salamina em 480 a.C., eram armas poderosas que permitiam manobras precisas para abordagens, permitindo combates corpo a corpo. Há referência aos mesmos já no século VIII a.C. desconhecendo-se a sua origem, mas frequentemente atribuída aos coríntios.

Em 350 a.C. os gregos e fenícios dominavam a navegação marítima, colonizando todo o Mediterrâneo então tido como *o centro do mundo*, cujo domínio marcava o poder dos povos. Os primeiros grandes navegadores terão sido os fenícios, que após a conquista de Fenícia o seu povo fugiu e fundou Cartago, com as suas galeras. Enormes navios de madeira também à vela, que lhes permitiram navegação oceânica, utilizados por exemplo nas guerras púnicas entre 264 a.C. e 146 a.C. contra os Romanos. No século II a.C. Roma iniciou o domínio sobre Cartago passando a dominá-la completamente.

Com a decadência e queda do Império Romano, seguiu-se um grande período histórico sem registo de avanços navais. Foi então que, já no ano 1000 d.C., apareceram os navios longos e estreitos dos Vikings, que permitiram a navegação tanto em rios como no oceano e lhes permitia deslocações no norte da Europa e até ao Mediterrâneo.

Em 1100 d.C., apareceu o Junco Chinês, que já dispunha de leme e de vela arqueada para maior resistência.

A partir de 1450 surgem os grandes veleiros com três ou quatro mastros, utilizados para transporte, exploração e para a guerra, como por exemplo as naus

utilizadas para a descoberta do caminho marítimo para a Índia, conhecidas como naus de Vasco da Gama (São Gabriel, São Rafael, Bérrio e São Miguel) que permitiu aos portugueses domínio sobre as rotas comerciais.

Com o desenvolvimento do armamento, designadamente a adoção de canhões em grande número, dispensou-se alguma da manobrabilidade dos navios, por se terem substituído as abordagens por batalhas a maior distância. Assim, os veleiros passaram a ser os navios de guerra predominantes.

Por volta de 1800, apareceram os *clippers*, veleiros muito rápidos com grandes mastros e casco estreito e longo.

Relativamente à propulsão, esta começou por efetuar-se com recurso à força humana, seguindo-se-lhe o uso de velas. Os primeiros navegadores começaram a usar tecidos ou peles para fazer velas que instalavam num mastro no centro do navio. Em resultado, as embarcações aumentaram de tamanho e passaram a ser desenvolvidos com quilha.

No início do século XIX, verificou-se nova revolução na navegação com a invenção do motor a vapor. O primeiro navio de sucesso foi o *Clermont*, que segundo a (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, sem data) é atribuído a Robert Fulton dos EUA em 1807. Seguiu-se na Europa, em 1812, o *PS Comet*, segundo a («PS Comet - Graces Guide», sem data).

Este tipo de propulsão desenvolveu-se muito durante o século XIX e realça-se também o desenvolvimento do condensador que reduziu a necessidade de água doce a bordo. A propulsão destes navios que se iniciou com uma roda de pás, evoluiu depois para a propulsão a hélice e é por volta de 1845 que surgem os grandes transatlânticos já sem velas. Os seus grandes desenvolvimentos culminaram na turbina marítima a vapor de Sir Charles Parsons aplicada ao navio *Turbínia* em 1897. Esta impulsionou o desenvolvimento de uma nova geração de grandes navios de cruzeiro de grande velocidade na primeira metade do século XX.



Figura 1- Recorte do quadro de Joseph M.W.Turner de 1839, representando a última viagem do Temeraire para desmantelamento (fonte:<http://app.regiaoocentro.net/sartigo/index.php?x=4944>)

A revolução do navio a vapor foi de tal dimensão, que segundo Figueiredo (2011), teve inclusive honras de representação artística (Fig.1), visto que:

“Em 1839 o pintor inglês, Joseph M. W. Turner apresentou num dos seus quadros, intitulado “The Fighting Temeraire tugged to her Last Berth to be broken up” (...) a última viagem do Temeraire, um navio da frota de Lord Nelson na batalha de Trafalgar em 1805. Em 1838 (...) já sem qualquer uso foi rebocado até ao Tamisa para ser desmantelado.

(...) um navio a vapor no primeiro plano e o Temeraire ao fundo a ser rebocado, significa o fim da era da navegação à vela e o início da revolução industrial com a utilização da máquina a vapor.

(...) o velho e ultrapassado Temeraire como um moribundo quase branco e o novo barco a vapor, de um tom escuro, triunfante, cuspidando fogo, com as suas rodas de pás energicamente agitando a água.”

Nova revolução na navegação marítima inicia-se em 1912 com o aparecimento do motor a diesel. Seguiram-se-lhe também as turbinas a gás, sendo estes os tipos de propulsão que se mantêm hoje predominantemente em uso, cabendo a hegemonia ao motor a diesel por ser aquele que se adequa ao maior número de aplicações.

Em 1955 surgem os primeiros *Hovercraft* inventados por Christopher Cockerell e a marinha dos Estados Unidos lança o primeiro submarino nuclear, o U.S.S. Nautilus.

Em 1959 é construído o primeiro navio mercante com propulsão nuclear. O N.S. Savannah.

A partir de 1980 surgem os *Hydrofoil*, grandes cargueiros e posteriormente grandes navios de cruzeiro.

A par dos avanços nos propulsores, também se verificaram avanços nos sistemas auxiliares, designadamente a criação da girobússula.

Atualmente, não seria possível manobrar um navio sem o seu leme e todos os sistemas associados que facilitam esse processo, desde os sistemas mecânicos aos eletrônicos que lhe dão automatismo. Mas nem sempre foi assim. A grande evolução no controlo sobre a proa dos navios deveu-se ao desenvolvimento do giroscópio. O seu princípio resulta na invenção da girobússula, patenteada em 1908 pelo Dr. Anschutz-Kaempfe, segundo a (RAYTHEON ANSCHÜTZ, sem data). Foi revolucionário e no mesmo ano foi introduzida a primeira girobússula balística, patenteada em 1911 por Elmer Sperry, que viria a desenvolver o piloto automático dos navios *gyropilot*, comercializado em 1922, (SPERRY MARINE, sem data).

## **1.1 Enquadramento Técnico**

De acordo com (LEWIS & O'BRIEN, 1965), existem três propriedades fundamentais dos navios, a ter em conta aquando da sua construção:

- A flutuabilidade, traduzida na competência de um navio se manter à tona frente a diversos estados do mar;
- A estabilidade, que é a combinação do dimensionamento e distribuição de pesos num navio, que permite ao navio adornar e recuperar a posição inicial quando acossado por ondas e ventos e outras variáveis de navegação;
- A integridade estrutural, capaz de suportar a ferocidade das águas.

São três parâmetros que se alteram conforme as necessidades dos construtores dependendo das condições de navegabilidade para que os navios são projetados.

As técnicas de projeto e construção naval e da capacidade de manobrabilidade dos navios são compreendidas há muito tempo, apesar de no início, o ser de forma empírica. Desde a antiguidade passando pelos modelos a remos de Gregos e Vikings, pelos veleiros logísticos usados pelos egípcios para transporte de material e até aos navios usados na era dos descobrimentos, onde os portugueses deram forte contributo com as naus e caravelas para navegar os mares desconhecidos, que para desenvolver um novo navio era utilizado o conhecimento baseado na experiência retirada dos navios anteriores. Incluía forma do casco, área velica, tipo de proa e outras, sendo que um dos fatores mais importantes para a sua construção seria a sua performance na obtenção dos resultados de velocidade, manobrabilidade, resistência e durabilidade pretendidos.

Atualmente os navios são desenhados em projeto e existem critérios para todos estes parâmetros. No que à manobrabilidade diz respeito, aquando da sua construção têm que os cumprir e traduzem-se na sua competência de manobrabilidade. Nesta fase, são envolvidas as sociedades classificadoras que efetuam testes, denominadas provas de mar, obtendo valores a partir de sensores e equipamentos.

Os critérios mínimos exigíveis, são quase mundialmente aceites e foram estabelecidos para a marinha mercante, por acordo da International Maritime Organization (IMO), e outras convenções, respondendo às necessidades de regulação, resultante do aumento do tráfego marítimo.

Nos navios militares, designadamente também os da Marinha Portuguesa, essas competências assumem especial importância e são de muito maior exigência, porque efetuam operações de muito maior complexidade a navegar, com grandes proximidades, seja em formaturas, operações de *replenishment at*

*sea*<sup>2</sup> (RAS), operações *vertical replenishment*<sup>3</sup> (VERTREP), operações com helicópteros e outras com manobras evasivas de defesa torpédica ou antimíssil e missões em condições adversas extremas, onde respostas céleres a aceleração, paragem, mudanças de direção são imprescindíveis e sendo fundamental para a guarnição, o conhecimento de comportamento do navio.

## **1.2 Problemática e Objetivo**

Segundo (PIRES DA SILVA & GUEDES SOARES, 2016) as especificações de um navio que permitem uma manobrabilidade descrita aquando a sua construção, são verificadas e registadas antes do início do período operacional do navio, tais como as características do navio, como a forma do casco, as características da propulsão e da hélice, o deslocamento, o caimento, o calado.

Estas, com o passar do tempo sofrem alterações, resultantes do *stress* permanente a que habitualmente são sujeitos, traduzidos em desalinhamentos, expansões, contrações, obstruções e outros. Este tipo de mutações ao longo do tempo, podem alterar significativamente a manobrabilidade do navio, nomeadamente na alteração do deslocamento, caimento e calado, parâmetros mais facilmente afetados, traduzindo-se na incerteza dos parâmetros de manobrabilidade.

No caso específico da Marinha Portuguesa, tal problema é ainda ampliado pelo facto de se operar navios bastantes envelhecidos. Com a idade, o desempenho dos navios no mar é fortemente alterado e considerar como válidos os valores registados no momento da sua construção, poderá traduzir-se em diferenças significativas nos resultados de resposta da embarcação.

Por essa razão, é importante efetuar testes de aferição das capacidades do navio e essencial dispor-se da informação mais atualizada possível quanto ao seu comportamento, sendo de extrema importância que o Comandante e restantes oficiais à ponte conheçam a capacidade do navio e se mantenham valores

---

<sup>2</sup> Reabastecimento (horizontal) no mar, habitualmente entre dois navios.

<sup>3</sup> Reabastecimento vertical, efetuado por helicóptero.

atualizados das provas de manobrabilidade do mesmo, para aferir se a embarcação continua em condições de desempenhar as suas funções ou se necessita de reformas, atualizações, alterações variadas ou, no limite, substituição.

A Marinha utiliza empresas privadas ou equipamentos de elevado custo para efetuar provas de manobrabilidade quando assim tem que ser. Para além da variável financeira, os navios da Marinha Portuguesa têm pouca disponibilidade para a realização das mesmas devido a um empenhamento operacional muito intenso.

Afigura-se-nos assim a necessidade de criação de um sistema de aquisição de dados sobre provas de manobrabilidade atualizável, que represente de forma mais ou menos fiel o desempenho do navio em cada momento do seu ciclo de vida operacional. De obtenção fácil, capaz de ser usado pelo pessoal de bordo sem acréscimo custos, face aos já associados a cada missão, e aproveitando algumas das missões do navio.

Noutra vertente, a existência de simuladores para treino e avaliação do pessoal, é indispensável para aprendizagem e despiste de possíveis erros. É assim importante efetuar as operações e movimentos em ambiente simulado. Para criação do navio simulado, são necessárias equações que representem o movimento aproximado do navio com alguma precisão e é importante conhecê-las, para que nesse ambiente os treinos se aproximem ao máximo da realidade. Desta forma, as guarnições podem preparar-se melhor para diferentes situações inopinadas que se apresentem a um navio enquanto a navegar.

A Marinha dispõe de simuladores, mas nem todas as simulações devolvem características reais do navio.

Impõe-se por isso, como objetivo do presente trabalho, a necessidade de investigação e criação de um sistema de simulação simples que utilizando os dados técnicos do navio, como características técnicas do leme, da hélice, e outros mais gerais (centro de gravidade e de flutuação, deslocamento, comprimento e outros) simule o seu comportamento real, para melhorar o nível de aprendizagem e conhecimento do pessoal de bordo.

### **1.3 Metodologia**

A metodologia estabelecida para o trabalho, consiste na avaliação de parâmetros hidrodinâmicos associados ao movimento do navio. Estes, serão calculados através de sistemas de equações diferenciais não lineares de nível de complexidade muito elevada. Por isso, serão criados simuladores em programação MATLAB® para as resolver.

Estes simuladores servirão para efetuar pesquisa relativa à movimentação de um navio, segundo manobras pré estipuladas.

Será ainda criado um programa MATLAB® com ajuda de *PortVision® Plus* e do sistema de gestão de plataforma (SGP), de modo a possibilitar à Marinha, designadamente às guarnições, efetuar prova de manobrabilidade de forma autónoma.

Os dados retirados dessas provas servirão também para efetuar uma correlação entre as equações de movimento, de forma a aferir a sua validade e/ou respetivo grau de erro.

## 2 Manobrabilidade do Navio

Desde a infância que ficamos perplexos por enormes navios serem capazes de flutuar e deslocar-se na água, sem que nós o possamos fazer. Isso deve-se ao facto de a densidade de um navio ser inferior à massa específica da água<sup>4</sup>, sendo que a massa específica se define na razão entre o volume e a massa de um objeto.

Um navio é um caso interessante de estudo, visto que uma parte está submersa e a outra está emersa, e conforme a variação do seu peso, esta razão altera-se.

Este fenómeno foi explicado já no século III a.C. por Arquimedes de Siracusa. Segundo a lenda, conta-se que um rei, suspeitando que o ourives que lhe fizera a sua coroa não teria gasto todo o ouro que lhe tinha sido entregue para o efeito, encarregou Arquimedes de efetuar esse estudo sem, todavia, destruir a coroa, ou seja, perceber se esta era de ouro puro.

Perante a difícil tarefa, diz-se que quando Arquimedes tomava banho e imergiu o seu corpo reparou que o nível de água subia. Percebeu que também imergindo a coroa na banheira, faria deslocar um certo volume de água. Então, pesando a coroa, e sabendo que a densidade é a massa a dividir pelo volume, comparou a densidade do ouro com a densidade da coroa, tendo assim concluído que a mesma não era de ouro puro.

Surgiu assim o Princípio de Arquimedes: um corpo quando na água, sofre uma força igual ao da água deslocada, com direção perpendicular à superfície da água e válida para corpos parcialmente imersos.

Este é o princípio que justifica a flutuabilidade dos navios. O deslocamento de um navio é a quantidade de água deslocada devido ao seu peso. É possível devido ao grande volume do navio e o seu peso estar disperso por esse volume. Então, num navio temos sempre duas forças a ser aplicadas, o seu peso e a reação oposta – a impulsão.

---

<sup>4</sup> Massa específica da água: 1000 kg/m<sup>3</sup>.

Estas duas forças têm pontos de aplicação diferentes, o centro de impulso e o centro de gravidade. Na prática, o navio não é um objeto estático. Então, mesmo atracado, numa posição de repouso, adorna. Este adornamento deve-se à alteração dos centros referidos, que se movem, deixando de estar ambos na mesma vertical. Quando se dá esta alteração é criado um momento, chamado *momento endireitante*, que resultado do descrito e ilustrado na figura 2, classifica a estabilidade de um corpo, podendo ser:

- Estável, no qual quando o navio adorna, os centros são alterados, mas tendem a voltar à posição inicial;
- Neutro, quando consegue ficar em repouso em qualquer posição
- Instável, ficar em repouso numa nova posição.

Esta abordagem ao estudo do navio pertence ao domínio da estática.

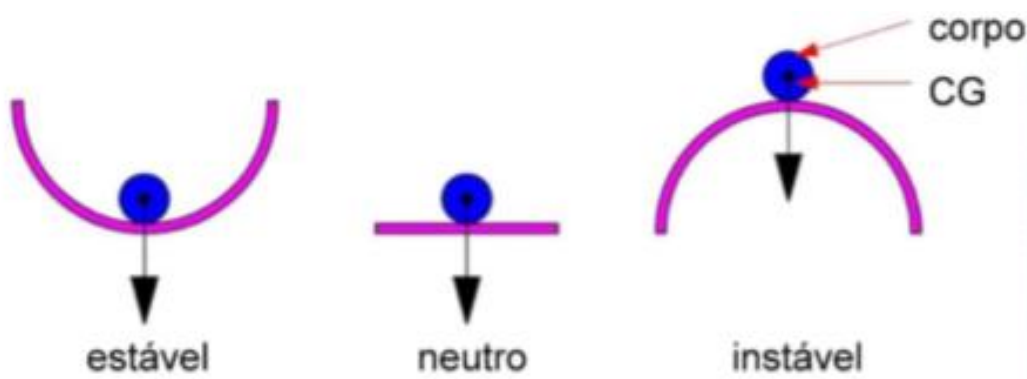


Figura 2- Momento endireitante (fonte: Aula 5\_18 - apresentação de 22 de fevereiro de 2017 em Arquitetura naval)

No domínio da dinâmica, o navio está sujeito a permanentes perturbações do meio ambiente onde opera e por forças *internas* que permitem o seu movimento controlado no meio aquático.

Neste contexto é importante definir os graus de liberdade de um navio em sustentação na água, como ilustrado na figura 3.

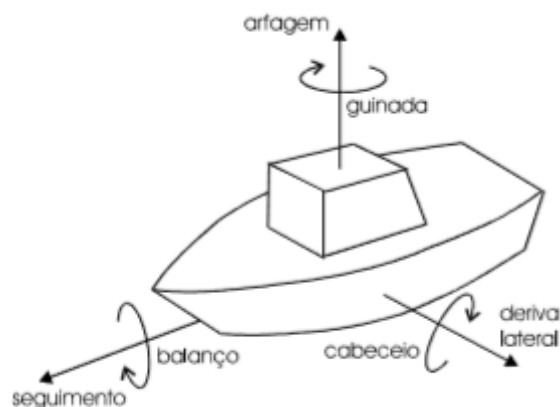


Figura 3- Forças de sustentação do navio na água (Fonte: ESTADO MAIOR DA ARMADA, 2012)

O navio dispõe de seis graus de liberdade (GDL), composto por três forças, avanço, deriva lateral e arfagem e três momentos, balanço, cabeceio e guinada.

Relativamente à propulsão, responsável pelo avanço, existem diversas opções que os navios dispõem, propulsão por remos, vela, hélice ou hidrojato. Sendo a mais usual por hélice. Esta consiste num rotor com pás ligado a um veio que lhe transmite rotação.

Nas pás é onde se dá a criação de força que permite deslocar o navio. Estas, são contruídas com um determinado ângulo de ataque, que pode variar. Este ângulo, em conjunto com a rotação do veio, provocam o deslocamento de uma massa de água. Este deslocamento, oposto ao movimento do navio, cria na hélice uma reação contrária que propulsiona o navio.

A caracterização do impulso quanto à intensidade e direção é dependente de fatores tanto relativos à hélice: - passo, diâmetro, número e área das pás, como relativo ao motor propulsor associado - rotação do veio, potência e binário.

Quanto à guinada é importante considerar o movimento de um navio, permitido pelo leme, no plano horizontal. Que dá ao navio controlo da guinada.

Este controlo está diretamente associado às forças criadas pelo leme, quando é imposto um certo afastamento em graus da linha meia-nau do navio, manifestando-se as forças de sustentação e de arrasto. Quando o leme está a

meio, a sua posição de menor resistência, a força de arrasto está sempre presente. À medida que se impõe um certo ângulo de leme, é criada uma força perpendicular ao leme, chamada sustentação. Esta força pode ser explicada pela variação de pressões hidrodinâmicas, que gera diferentes velocidades de escoamento nos dois lados do leme. É esta força de sustentação que provoca a alteração do movimento do navio, pela ação gerada, desviando-o do rumo inicial.

Quando o navio é desviado do rumo inicial em que navegava, existe afastamento entre a linha de mediania do navio e o seu rumo, inculido pela força de sustentação, que cria uma força idêntica no casco do navio – a força de sustentação do casco. Porque o navio tem uma grande área submersa, essa força é a responsável por fazer o navio guinar.

A força de sustentação provocada pelo leme é muito menor comparada com a força de sustentação do casco, sendo que a força que o leme provoca é apenas impulsionadora do movimento de guinada, a força criada pelo casco, essa sim, é a responsável por fazer um navio guinar.

Tal é descrito em (FUWA & KASHIWADANI, 2007): num navio a navegar num movimento com taxa de guinada igual a zero a força hidrodinâmica lateral é zero, uma vez que o fluxo na superfície do casco é simétrico em ambos os bordos.

Quando é introduzido um determinado ângulo de leme, devido ao *aerofoil effect*, é induzido um momento rotacional que provoca uma pequena guinada no navio. Isto provoca um ângulo de abatimento, *drift angle*, no fluxo do fluido, provocando uma força hidrodinâmica lateral no casco do navio, a força de sustentação do casco, que se comporta como uma asa, *wing*, como descrito na figura 4.

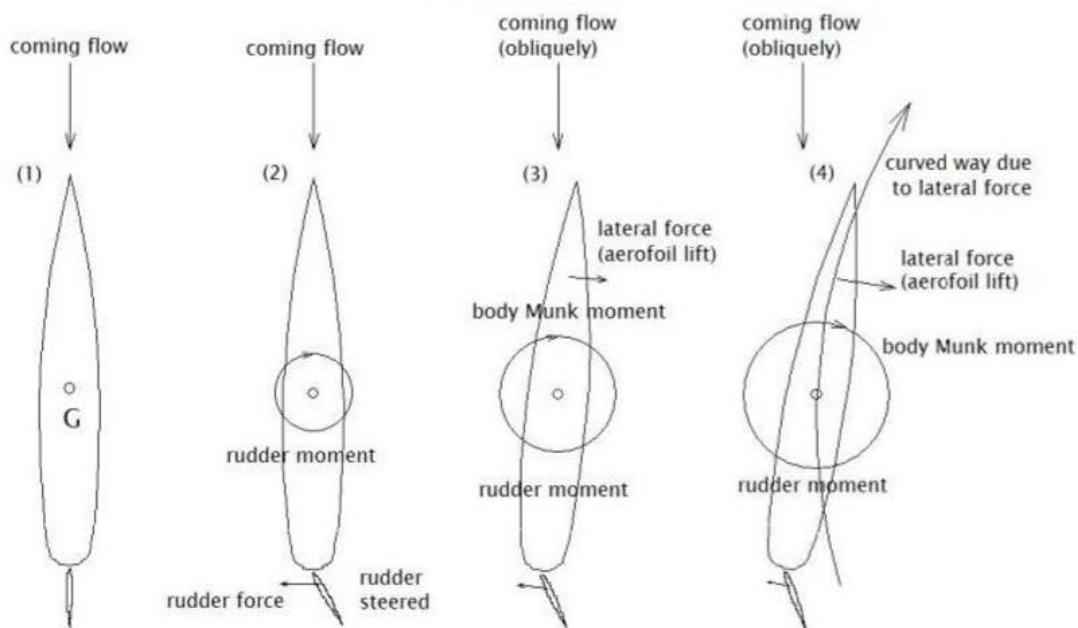


Figura 4 - Explicação da guinada de um navio (Fonte: FUWA & KASHIWADANI, 2007)

## 2.1 Provas de mar

As provas de manobrabilidade, componentes das provas de mar, consistem num conjunto de testes que permitem avaliar uma panóplia de parâmetros de performance de um navio. Avaliam o seu comportamento real em afastamento lateral, velocidade de arranque ou de paragem e tempos associados, diâmetro táctico, tempo de resposta, entre outros. São importantíssimas para companhias marítimas e armadores. Fornecem as informações essenciais sobre a agilidade e rapidez do navio, quer em navegação corrida, quer em espaços reduzidos de portos.

São muito importantes principalmente em áreas de grande tráfego, onde navios de maior calado têm pouco espaço para manobrar e em termos de resposta nos casos de abalroamento e outros imprevistos.

Estas provas têm duas vertentes principais. A primeira, são as provas efetuadas aquando da construção do navio, para verificação de valores reais do

seu desempenho e perceber se os mesmos estão em concordância com os cálculos teóricos estabelecidos e assim demonstrar às companhias que os navios cumprem com os valores necessários às missões para que foram concebidos. A segunda, as provas que deverão ser feitas ao longo do ciclo de vida do navio, para aferir o efeito de alterações resultantes da degradação dos materiais devido ao *stress* a que foram sujeitos ao longo dos anos ou das modificações e alterações.

Este é um processo que todos os navios sofrem ao longo do seu ciclo de vida, que lhe provocam alterações de desempenho. Por isso, é importante que as companhias e armadores tenham fundamentos de apoio à decisão de manter, ou modernizar um navio, mantendo as características mínimas de funcionamento e desempenho.

Por razões económicas, todas elas têm interesse em manter os navios o maior tempo possível, respeitando as regras e critérios estabelecidos tanto pela IMO como pela International Towing Tank Conference (ITTC), que também estabeleceram as regras e critérios para realização das provas de mar e respetivos resultados mínimos a obter para poderem continuar a navegar e transportar carga.

Segundo a (INTERNATIONAL TOWING TANK CONFERENCE, 2002), para fins de operação, as provas devem dizer respeito às seguintes qualidades identificadas pela IMO:

- Estabilidade dinâmica inerente;
- Capacidade de manter um rumo constante;
- Capacidade de alteração de rumo;
- Capacidade de guinada;
- Capacidade de paragem.

Existem diversas provas de mar que poderão ser efetuadas para obter os resultados avaliativos destas capacidades. No âmbito desta dissertação irão ser abordadas as internacionalmente aceites pelas diversas organizações (IMO, ITTC, The Society of Naval Architects & Marine Engineers (SNAME), ISO).

As provas de manobrabilidade estão sujeitas ao cumprimento de determinados fatores a serem cumpridos para serem válidas, desde condições meteorológicas, local de realização dos testes e tipo de sensores usados.

No que diz respeito aos sistemas de aquisição é necessário o registo histórico de diversos dados, entre eles:

- Tempo;
- Posição e velocidade;
- Rumo e taxa de guinada;
- Ângulos de leme;
- Binário e velocidade do veio;
- Ângulo de adorno.

Todos estes dados devem apresentar uma taxa de amostragem que varie entre os 0,5 e as 2 amostras por segundo, conforme sugerido pelos procedimentos das normas de orientação do ITTC.

Também, para a validação das provas é recomendado que os parâmetros inerentes ao navio fiquem documentados, e, segundo a ITTC são necessários:

- Tipo de navio;
- Condições do casco;
- Área lateral submersa;
- Áreas lateral e longitudinal acima da linha de água;
- Parâmetros do tipo de popa;
- Tipo e número de portas do leme;
- Área e ângulo do leme;
- Tipo de propulsão;
- Passo e diâmetro da hélice, se conter este elemento;
- Número de propulsores e direção correspondente;
- Tipo de motor propulsor.

Quanto às condições da prova é importante documentar:

- Data e hora;
- Localização onde é efetuada a prova;
- Velocidade de aproximação e rumo para cada prova;

- Condição de carga do navio;
- Raio de giração;
- Caimento do navio;
- Profundidade;

Por último é necessário documentar as condições meteorológicas das provas, das quais se destacam:

- A velocidade e direção da corrente no início de cada prova;
- Velocidade do vento;
- Direção relativa do vento;
- Estado do mar.

Relativamente a estes dados, segundo a *American Bureau of Shipping* (ABS), em provas é necessária uma profundidade mínima, de pelo menos quatro vezes o calado a meio navio, e estar afastado de bancos, pelo menos dois comprimentos do navio.

Quanto ao vento e ondulação, o estado de mar não deverá exceder o grau 4 e o vento não deverá exceder o grau 5 da escala de Beaufort<sup>5</sup>. Para condições ótimas, estes parâmetros não deverão exceder o grau 2 e o grau 3, respetivamente e as correntes deverão ser minimizadas ao máximo possível.

As organizações também definiram critérios mínimos que os navios têm de obter. Todos estes parâmetros têm como finalidade uma uniformização mundial em termos de gestão logística e de gestão portuária, para ser controlado entrada, saídas e trânsito de embarcações. Isto tem importância devido ao grande fluxo de tráfego marítimo que existe hoje em dia.

Como nos principais portos é onde se dão as trocas de carga, é importante perceber o espaço necessário de manobra. Por exemplo, quando um navio com um grande comprimento e deslocamento chega, se podem existir ali outros navios em trânsito ou se o espaço tem que estar completamente disponível.

---

<sup>5</sup> Escala que reflete a velocidade do vento e ondulação.

Conhecendo os parâmetros de manobrabilidade é fácil otimizar processos de gestão. Por exemplo, considerando velocidade e distância, permite fazer-se melhores estimativas de partidas e chegadas.

Os critérios estão vocacionados para navios de grandes dimensões, e que assim têm a sua capacidade de manobra reduzida. Os valores descritos pelas diversas convenções, que os navios mercantes têm de cumprir dividem-se em diversas capacidades, sendo aplicados os critérios definidos nos *standards* da IMO.

Relativamente ao caso específico dos navios da Marinha Portuguesa, estes, seguem as orientações descritas nas Instruções de Navegação da Armada (INA's), designadamente INA 2 – Disposições Gerais e Conceitos Fundamentais da Navegação, as quais remetem também, as provas de manobrabilidade dos seus navios, para as normas internacionais gerais (ESTADO MAIOR DA ARMADA, 2012, P. 5.1).

Ainda, nas mesmas disposições é descrito que os navios da Marinha Portuguesa deverão calcular os seus elementos evolutivos segundo as seguintes circunstâncias:

“(1) Após o navio ter sido aumentado ao efetivo;

(2) Após o navio ter sido sujeito a quaisquer alterações que afetem as suas características de manobrabilidade, em especial as alterações estruturais, no sistema de governo ou no sistema propulsor;

(3) Sempre que o comportamento do navio difira de forma significativa do que é indicado pelos elementos evolutivos disponíveis.”

Por regra, estas provas são realizadas pelo IH, contudo, poderão ser realizadas provisoriamente pelo próprio navio, segundo o referido pela INA 2 do Estado Maior da Armada (2012, P. 5.3):

“Sempre que se considere necessário para melhorar a segurança do navio ou para a execução da missão, o comandante da unidade naval

poderá realizar provas de manobrabilidade sem a participação do IH, utilizando para o efeito os métodos de navegação e de processamento disponíveis a bordo. Os elementos evolutivos assim determinados são provisórios e deles deve ser dado conhecimento ao IH, não dispensando a realização de novas provas de manobrabilidade”

Especificamente, as provas de manobrabilidade são as seguintes:

### **2.1.1 Curva de giração**

Esta prova é efetuada para testar as capacidades de guinada de um navio. Demonstra como um tipo de casco, um tipo de porta de leme e a hélice funcionam em conjunto para conseguir mover um navio para uma posição desejada, afastada em distância e rumo.

Como o regime de máquinas é mantido constante e a resistência do casco está sempre inerente ao seu movimento, a área da porta de leme é a que vai efetuar a maior alteração no movimento da embarcação.

Serão retiradas características de manuseio desta prova, desde o tempo que demora a guinar ao raio necessário para guinar, ou seja, com esta prova pretende saber-se quanto tempo e qual o espaço necessário quando um navio pretende mudar de direção.

Os parâmetros a calcular e documentar nesta prova serão:

- Diâmetro tático;
- Avanço;
- Deslocamento lateral;
- Perda de velocidade numa curva estável;
- Tempo necessário para alterar o rumo em 90° e 180°.

A prova deverá ser efetuada para ambos os bordos, com o ângulo de leme máximo e deverá ser efetuado uma rotação mínima de 540°.

Segundo os critérios internacionais está definido que:

- 1) O Avanço não deverá ser maior que 4,5 vezes o comprimento do navio;

- 2) O diâmetro tático não deverá ser maior que 5 vezes o comprimento do navio.

### **2.1.2 Manobra de ZigZag**

A manobra de ZigZag, traduz-se na capacidade de uma embarcação se desviar de um obstáculo repentino e retomar o rumo inicial, sem saçostrar.

Dá-nos a indicação da resposta do leme, o quão rápido consegue responder. Por vezes os navios poderão ter uma resposta rápida, mas maior dificuldade em retomar o rumo inicial. Por outro lado, guinar mais devagar, mas poder posteriormente ser mais fácil retomar o rumo inicial. Ambos os casos têm as suas limitações, sendo que o fator que determina este comportamento são as características do casco.

Esta prova tem como objetivo estudar a capacidade de guinada e alteração de rumo, bem como as características de manobra, tal como a curva de giração.

Os parâmetros a calcular e documentar nesta prova são:

- Tempo de guinada inicial, o tempo desde que é posto o leme até atingir o afastamento  $\Psi$  graus da proa inicial;
- Proa de ordem para o leme,  $\Psi$ , onde o leme é revertido;
- *Overshoot angle*, ângulo até ao qual o navio continua a guinar na direção original, depois da aplicação do leme contrário;
- Tempo de guinada, o tempo que vai desde a ordem para o leme até ao tempo de maior taxa de guinada para esse leme na direção original;
- Rumo;
- Alcance, o tempo que passa desde a primeira ordem até ao instante onde se alcança o rumo inicial depois da segunda ordem;
- Tempo para completar um ciclo, o tempo desde a primeira ordem até o navio estar no rumo inicial após a terceira ordem;
- Velocidade angular, a taxa de guinada estabelecida após a segunda execução;

- Tempo unitário, o tempo requerido para o navio percorrer o seu comprimento.

Para efetuar esta prova é necessário ter uma proa inicial  $\delta$ , e alterar  $\Psi$  graus para cada lado alternadamente. São necessárias cinco mudanças de leme. É usada preferencialmente a alteração  $\Psi = 10^\circ$  (ZigZag 10/10). É executada à velocidade de aproximação, ou seja, baixa velocidade e deve ser executada para ambos os bordos, com preferência para estibordo.

Segundo os critérios internacionais está definido que:

- 1) A capacidade de guinada inicial, que se define pela distância percorrida, na aplicação de  $10^\circ$  de leme, após o rumo inicial ter alterado  $10^\circ$ , que não deverá ultrapassar 2,5 vezes o comprimento entre perpendiculares (LPP).
- 2) Capacidade de alteração de rumo e capacidade de manutenção de um rumo de constante, sendo que os valores a retirar são relativos ao primeiro e segundo overshoot, definidos:

- Para o 1º overshoot
  - Não deverá exceder os  $10^\circ$ , para navios com  $\frac{L}{V} < 10 \text{ s}^6$ ;
  - Não deverá exceder  $\left(5 + 0,5 \left(\frac{L}{V}\right)\right)^\circ$ , para navios com  $10 \text{ s} \leq \frac{L}{V} < 30 \text{ s}$ ;
  - Não deverá exceder os  $20^\circ$ , para navios com  $\frac{L}{V} \geq 30 \text{ s}$ ;
- Para o 2º overshoot
  - Não deverá exceder os  $25^\circ$ , para navios com  $\frac{L}{V} < 10 \text{ s}$ ;
  - Não deverá exceder  $\left(17,5 + 0,75 \left(\frac{L}{V}\right)\right)^\circ$ , para navios com  $10 \text{ s} \leq \frac{L}{V} < 30 \text{ s}$ ;
  - Não deverá exceder os  $40^\circ$ , para navios com  $\frac{L}{V} \geq 30 \text{ s}$ ;

---

<sup>6</sup> O  $L$  representa o comprimento (em metros) entre perpendiculares e o  $V$  a velocidade em metros por segundo.

### **2.1.3 Manobra espiral**

Esta manobra serve para avaliar se um navio tem uma instabilidade inerente ou direcional, ou seja, mantendo o leme fixo se o navio se mantém em linha reta. Nesta prova testam-se as capacidades da estabilidade dinâmica inerente e a capacidade de manter um rumo constante. Para navios estáveis é usada a manobra de espiral direta ou de *Dieudonné* e para navios instáveis é recomendável a utilização da manobra de espiral inversa, de *Bench*.

Os parâmetros a calcular e documentar nesta prova são a taxa de guinada para cada ângulo de leme, em ambos os bordos.

Para efetuar esta prova, o navio estará a navegar no rumo inicial e é posto 25° de leme para estibordo e é mantido até a taxa de guinada ser constante. Posteriormente são retirados 5° de leme e é mantido assim novamente até taxa de guinada constante. O processo é repetido até ser atingido 25° de leme para o bordo contrário.

### **2.1.4 Pullout**

Esta, pode ser considerada uma prova secundária, porque embora possa ser executada independentemente, os mesmos valores podem ser retirados da curva de giração e da prova de ZigZag. É efetuada, porque é uma rápida indicação da capacidade de estabilidade em rumo, ou seja, da estabilidade dinâmica inerente.

Nesta prova são documentados e calculados a taxa de guinada para o ângulo de leme correspondente.

Para efetuar a prova é posto 20° de leme, até o navio atingir uma taxa de guinada constante. Quando atingido este ponto, é posto o leme a meio. Caso o navio seja estável a taxa de guinada irá decair para 0 tanto a bombordo como estibordo, caso contrário irá existir no final uma taxa de guinada residual.

### 2.1.5 Teste de paragem

Esta prova testa a capacidade de paragem de um navio. Normalmente é utilizada como velocidade inicial a correspondente a todas as máquinas avante. Após atingida uma velocidade constante é dada ordem de todas as máquinas à ré, até a velocidade atingida ser zero. É uma prova importante por dar a indicação de características de manuseio, indicando-nos o tempo e o espaço necessário para parar o navio. Esta capacidade está diretamente relacionada com o deslocamento do navio. Quanto maior for o seu deslocamento, maior será a sua inércia. Consequentemente, tanto o tempo como o espaço necessário aumentam.

Nesta prova é importante calcular e documentar:

- Rumo, ao longo da distância percorrida;
- Avanço;
- Deslocamento lateral.

Segundo os critérios internacionais está definido que o alcance não deverá ultrapassar:

- 15 vezes o comprimento do navio se  $\frac{\Delta}{MCR} V_{mcr} Fn^2 < 1$  <sup>7</sup>;
- Entre  $5 + 10 \left( \frac{\Delta}{MCR} V_{mcr} Fn^2 \right)$  e 20 vezes o comprimento do navio se  $\frac{\Delta}{MCR} V_{mcr} Fn^2 \geq 1$ .

## 2.2 Importância das Provas

Olhando para as mais recentes estatísticas mundiais, é fácil perceber em face ao forte aumento do comércio de mercadorias, que segundo o *World trade statistical review 2018* aumentou 4,7% desde 2017, refletindo-se nos transportes com um crescimento de 9% e naturalmente no marítimo, como pode ver-se nos indicadores seguintes, é essencial o desenvolvimento na área da segurança da navegação naval.

---

<sup>7</sup> Em que  $\Delta$  é o deslocamento em toneladas; O  $MCR$  é a máxima potência que um navio pode produzir enquanto trabalha de modo contínuo dentro dos limites e condições de segurança em *horse power*;  $V_{mcr}$  é a velocidade do navio em  $\frac{m}{s}$  para a condição descrita em  $MCR$ ;  $F_n$  é o número de Froude

Segundo a *UNCTAD – review of maritime transport 2018* o comércio marítimo mundial em 2017 foi de 10.7 bilhões de toneladas, representando um crescimento anual de 4%, o maior dos últimos 5 anos.

Relativamente à frota mundial tem tido um crescimento constante desde 2014, com um aumento anual de 3,7%.

Segundo *The World Merchant Fleet in 2017 - Statistics from Equasis*, 80% da frota marítima mundial são navios pequenos, inferiores a 500 *Gross tonnage* (GT)<sup>8</sup>, ou médios, inferior a 25000 GT, sendo importante frisar que nessas categorias a idade dos navios é em média superior a 15 anos.

Segundo a *EMSA – Annual overview of marine casualties and incidentes 2018*, entre 2011 e 2017, aproximadamente 65% dos incidentes ocorreram em navios de carga, sendo que 42,5% nos de mercadoria e 22,6% em navios de passageiros. A média de idades dos navios em que ocorreram é aproximadamente de 18 anos.

O número de incidentes aumentou de 2011 a 2014, e estabilizou de 2014 até 2017 em 3200 por ano.

As localizações das vítimas ocorreram em áreas de portos, 42%, e em áreas costeiras, 28,6%. Facilmente intuído como relacionado com as áreas de maior fluxo de navegação.

Por último, é de pertinência referir que em aproximadamente 58% dos casos, a causa dos incidentes se deveu a erro humano.

Urge assim, que o aumento exponencial da tecnologia verificado nos últimos anos, se desenvolva também no sentido da criação de ferramentas de auxílio aos utilizadores de navios, que os ajudem a melhor perceber o seu comportamento no sentido de uma melhor tomada de decisão.

Assim, neste trabalho, passaremos nos próximos capítulos a focar-nos na construção de dois programas. O primeiro possui equações matemáticas que pretendem descrever o comportamento de um navio. O segundo, um programa que

---

<sup>8</sup> Correspondendo à definição em português *Arqueação Bruta* e é, um valor adimensional relativo ao volume interno total de um navio (Fonte: <https://www.britannica.com/technology/tonnage#ref265290>, com tradução nossa)

recorrendo aos dados disponíveis dos sensores do navio, possam ser utilizados de forma expedita para efetuar provas de manobrabilidade. Este último, efetua o tratamento de dados disponíveis, para calcular os movimentos evolutivos atualizados do navio.

### 3 Algoritmo para simulação do movimento 2D de um navio

A utilização de simuladores é uma forma facilitada e relativamente eficaz de perceber a manobrabilidade do navio em diversas situações, como o espaço para efetuar manobras, tempo para parar e tempo e velocidade para desviar de um obstáculo, entre outros.

O estudo da mecânica hidrodinâmica de um navio pode ser dividido em duas grandes partes. A hidrostática, sem movimento em águas calmas, e a hidrodinâmica, que estuda o movimento de um navio para vários tipos de condições de mar. Esta última, poderá ainda ser repartida em comportamento no mar (na terminologia inglesa *Seakeeping*), movimento de um navio com ondulação, tendo em conta fatores externos e manobrabilidade (na terminologia inglesa *manoeuvring*), que estuda o movimento em águas calmas/paradas.

Com o aumento de processamento matemático por computação, foi possível realizar integração numérica num sistema de equações de movimento no domínio do tempo, que permite descrever o histórico temporal de um sistema em resposta a uma ou mais perturbações. Assim, surgiram diversas teorias que permitem fazer a estimativa anteriormente descrita. Previsões baseadas no cálculo das forças hidrodinâmicas envolvidas no movimento de um navio.

Embora este estudo possa ser efetuado com modelos reais dos navios, é uma opção muito cara. Desde a construção do modelo e alteração ao longo do seu ciclo de vida, até ao sistema de captura de dados e mão de obra específica. Assim, o estudo de modelos matemáticos que consigam resultados aproximados revelam-se uma opção mais viável.

Vários estudos foram efetuados no cálculo de derivadas *slow motion* e hidrodinâmicas usando modelos para testes em diferentes locais descritos em (SUTULO & KIM, 1998), (SUTULO & GUEDES SOARES, 2006) e (YOON & RHEE, 2003) citados por (PIRES DA SILVA & GUEDES SOARES, 2016).

Sendo que como descrito no capítulo 2, o comportamento de um navio pode ser representado por 6 GDL, nestes estudos, foi criado um modelo de 3

GDL para simular o comportamento de um navio, descrito em Guedes Soares & Sútulo (2011).

Partindo do pressuposto que a navegação é efetuada em águas calmas e com profundidade elevada, nestas condições, o efeito do cabeceio (*pitch*), da arfagem (*heave*), e do balanço (*roll*) podem considerar-se desprezáveis.

Utilizando as forças e momentos do plano horizontal – avanço (*surge*) a deriva lateral (*sway*) e a guinada (*yaw*). Por isso, a maioria das simulações são em 3 GDL, ou 4 GDL, neste caso, se não se desprezar o efeito do balanço.

Vários métodos e modelos foram criados e estão descritos e analisados em *Uncertainty modelling in ship manoeuvring models*, (Paulo P. Silva e C. Guedes Soares, 2016) e em *A review and Comparison of ship Maneuvering Simulation Methods*, (Barr 1993)

O simulador que se construirá neste trabalho tem por base esse modelo. É um sistema de 3 GDL não lineares, com equações de Euler padrão, considerando o navio como um corpo rígido e é um modelo proposto por (Sutulo & Guedes Soares, 2014), variante do modelo *Maneuvering Modeling Group* (MMG) e baseado em *Basics of Ship Manoeuvrability* de S. Sutulo (2013).

### **3.1 Explicação do modelo MMG**

O modelo MMG para simulação de manobrabilidade de um navio, foi um modelo proposto na *Japanese Towing Tank Conference* (JTTC), pelo MMG em 1977, com o intuito da uniformização de um modelo matemático.

Segundo a *Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions* (H. Yasukawa & Y. Yoshimura, 2014), o modelo padrão MMG é composto por 4 fases:

1. Modelo de simulação para manobrabilidade;
2. Testes, em modelos, para calcular características de forças hidrodinâmicas;
3. Métodos de análise para determinar coeficientes de forças hidrodinâmicas;
4. Previsão da manobrabilidade de um navio à escala real.

A simulação é efetuada por uma combinação de modelos que calculam as características das forças hidrodinâmicas no casco, na hélice e no leme.

Por ser característico de navios mercantes, as equações de movimento têm por base navios com uma hélice e uma porta de leme.

Por definição, segundo Yasukawa & Yoshimura (2014) é assumido que:

- O navio é um corpo rígido;
- As forças hidrodinâmicas que atuam num navio são tratadas como aproximadamente constantes;
- A componente lateral da velocidade é muito menor comparada com a componente longitudinal da velocidade;
- A velocidade de um navio não é elevada o suficiente para os efeitos da ondulação serem desprezados;
- A altura metacêntrica é grande o suficiente, para o efeito do balanço ser desprezado.

Assim, passa-se, na próxima tabela, à descrição do modelo tendo também como base Yasukawa & Yoshimura (2014).

Assim, são utilizados dois sistemas de coordenadas:

- Um fixo no espaço, não inercial ou referencial Terra,  $O_0-x_0y_0z_0$ , onde o plano  $xOy$  é coincidente com a superfície da água;
- e outro, inercial que se move com o navio e que é coincidente com o meio-navio,  $O-xyz$ .

Conforme se pode ver na Figura 5.

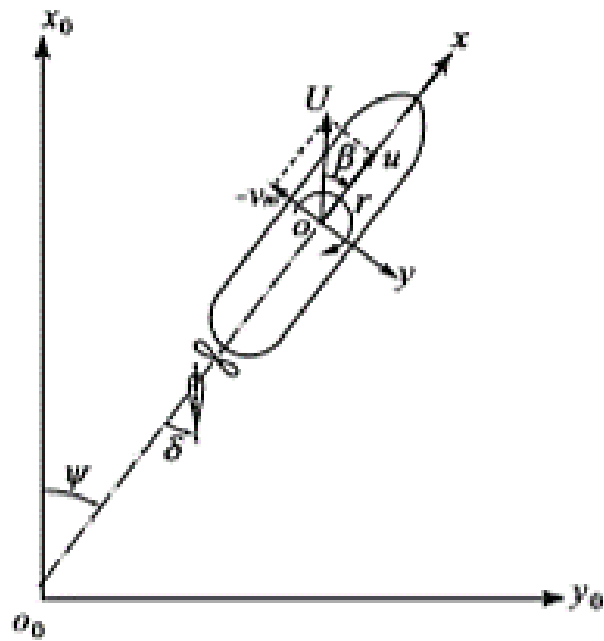


Figura 5- Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions, (Fonte: Yasukawa & Yoshimura (2014)).

Na tabela 1, encontra-se uma identificação e significado da simbologia utilizada:

Tabela 1 - Identificação e significado da simbologia utilizada

Simbologia utilizada:	Descrição
$O_0 - x_0 y_0 z_0$	Sistema coordenado fixo no espaço, onde o plano $x_0 y_0$ é coincidente com a superfície da água.
$o - xyz$	Sistema coordena coincidente com o meio-navio, onde o plano $x_0 y_0$ é coincidente com a superfície da água.
$\psi$	Proa, representado pelo ângulo ente $x_0$ e $x$ . ( $^\circ$ )
$\delta$	Ângulo de leme. ( $^\circ$ )
$r$	Taxa de guinada. ( $\frac{rad}{s}$ )

$u$	Velocidade em x. ( $\frac{m}{s}$ )
$v_m$	Velocidade em y. ( $\frac{m}{s}$ )
$\beta$	Ângulo de deriva, ( $^\circ$ ), definido por: $\beta = \tan^{-1}\left(\frac{-v_m}{u}\right)$
$U$	Velocidade total, ( $\frac{m}{s}$ ), definida por: $U = \sqrt{u^2 + v_m^2}$
$(x_G, 0, 0)$	Posição do centro de gravidade.
$v$	Componente lateral da velocidade no centro de gravidade, ( $\frac{m}{s}$ ), definido por: $v = v_m + x_G r$

### 1) Equações iniciais

O modelo foi construído para simular as forças e momentos horizontais - o avanço, a deriva e a taxa de guinada (velocidade de guinada) que podem ser expressas, respetivamente, por:

$$\begin{cases} F_x = m (\dot{u} - v r) \\ F_y = m (\dot{v} + u r) \\ M_z = I_{zG} \dot{r} \end{cases}$$

*Equação 1 - Forças e momento de 3 GDL*

### 2) Aplicação de distúrbios externos

$$\begin{cases} F_x = (-m_x \dot{u}) + (m_y v_m r) + X \\ F_y = (-m_y \dot{v}_m) - (m_x u r) + Y \\ M_z = -J_z r + N_m - (x_G F_y) \end{cases}$$

*Equação 2 - Forças e momento de 3 GDL dos distúrbios externos*

### 3) Junção das equações anteriores:

$$\begin{cases} X = ((m + m_x) \dot{u}) - ((m + m_y) v_m r) - (x_G m r^2) \\ Y = ((m + m_y) \dot{v}_m) + ((m + m_x) u r) + (x_G m \dot{r}) \\ N_m = ((I_{zG} + x_G^2 m + J_z) \dot{r}) + (x_G m (v_m + u r)) \end{cases}$$

*Equação 3 - Junção das equações internas e externas*

4) Os distúrbios podem ser divididos quanto à sua origem, no casco, H, na porta do leme, R, e na hélice, P.

$$\begin{cases} X = X_H + X_r + X_P \\ Y = Y_H + Y_r \\ N_m = N_H + N_r \end{cases}$$

*Equação 4 - Divisão dos distúrbios*

4.1) O símbolo ' representa adimensionalização, neste caso forças hidrodinâmicas produzidas no casco podem ser definidas como:

$$\begin{cases} X_H = \frac{1}{2} \rho L_{pp} d U^2 X'_H(v'_m, r') \\ Y_H = \frac{1}{2} \rho L_{pp} d U^2 Y'_H(v'_m, r') \\ N_H = \frac{1}{2} \rho L_{pp} d U^2 N'_H(v'_m, r') \end{cases}$$

*Equação 5 - Forças hidrodinâmicas produzidas pelo casco*

Em que:

$v'_m$  Componente lateral da velocidade adimensionalizada, definida como:

$$v'_m = \frac{v_m}{U}$$

*Equação 6 - Componente lateral da velocidade adimensionalizada*

$r'$  Taxa de guinada adimensionalizada, definida como:

$$r' = \frac{r L_{pp}}{U}$$

Equação 7 - Taxa de guinada adimensionalizada

$X'_H$  Soma do coeficiente de resistência,  $R'_0$ , e da função polinomial de 2ª e 4ª ordem de  $v'_m$  e  $r'$ .

$Y'_H, N'_H$  função polinomial de 1ª e 3ª ordem de  $v'_m$  e  $r'$ .

Cada componente da força pode ser decomposta em vários contributos como se segue:

$X'_{vv}, X'_{vr}, X'_{rr}, X'_{vvvv}, Y'_v, Y'_R, Y'_{vvv}, Y'_{vvr}, Y'_{vrr}, Y'_{rrr}, N'_v, N'_R, N'_{vvv}, N'_{vvr}, N'_{vrr}$  e  $N'_{rrr}$  São denominadas de derivadas hidrodinâmicas da manobrabilidade, hydrodynamic derivatives on maneuvering

Assim  $X'_H, Y'_H, N'_H$  podem ser definidas como:

$$\begin{cases} X'_H(v'_m, r') = -R'_0 + (X'_{vv} v_m'^2) + (X'_{vr} v'_m r') + \\ \quad (X'_{rr} r'^2) + (X'_{vvvv} v_m'^4) \\ Y'_H(v'_m, r') = (Y'_v v'_m) + (Y'_R r') + (Y'_{vvv} v_m'^3) + \\ \quad (Y'_{vvr} v_m'^2 r') + (Y'_{vrr} v'_m r'^2) + (Y'_{rrr} r'^3) \\ N'_H(v'_m, r') = (N'_v v'_m) + (N'_R r') + (N'_{vvv} v_m'^3) + \\ \quad (N'_{vvr} v_m'^2 r') + (N'_{vrr} v'_m r'^2) + (N'_{rrr} r'^3) \end{cases}$$

Equação 8 - Forças hidrodinâmicas produzidas pelo casco adimensionalizadas

#### 4.2) Forças hidrodinâmicas produzidas pela hélice

$$X_p = (1 - t_p) T$$

*Equação 9 - Avanço produzido pela hélice*

Definida como:

- $X_p$  O avanço produzido pela hélice ( $m$ ).
- $t_p$  Fator de dedução de impulsão, assumido constante por simplificação.
- $T$  Impulsão produzido pela hélice, ( $N$ ):
- $$T = \rho n_p^2 D_p^4 K_T J_p$$

*Equação 10 - Impulsão produzida pela hélice*

- $K_T$  Função polinomial de 2ª ordem do rácio de avanço da hélice,  $J_p$ , dado por:

$$K_T(J_p) = k_2 J_p^2 + k_1 J_p + k_0$$

*Equação 11 - Função de rácio de avanço da hélice*

- $J_p$  Rácio de avanço da hélice, dado por:

$$J_p = \frac{u (1 - w_p)}{n_p D_p}$$

*Equação 12 - Rácio do avanço da hélice*

- $w_p$  Coeficiente da esteira da hélice quando o navio está em guinada, pode ser dado por:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{w_p}{w_{p0}} = e^{-4\beta_p^2} \\ \frac{(1 - w_p)}{(1 - w_{p0})} = 1 + C_1 (\beta_p + C_2 \beta_p |\beta_p|)^2 \\ \frac{(1 - w_p)}{(1 - w_{p0})} = 1 + (1 - \cos^2(\beta_p)) (1 - |\beta_p|) \end{array} \right.$$

*Equação 13 - Coeficiente de esteira da hélice*

- $w_{p0}$  Coeficiente da esteira da hélice quando o navio está em rumo constante.

$\beta_P$  Ângulo geométrico de entrada do escoamento do fluido na hélice, (°). Quando o navio está em guinada pode ser dado por:

$$\beta_P = \beta - x'_P r'$$

Equação 14 - Ângulo geométrico de entrada do fluxo

4.3) Forças hidrodinâmicas efetivas produzidas pelo leme quando o navio está em guinada, (N).

$$\begin{cases} X_R = -(1 - t_r) F_N \sin(\delta) \\ Y_R = -(1 - a_H) F_N \cos(\delta) \\ N_R = -(x_R + a_H x_H) F_N \cos(\delta) \end{cases}$$

Equação 15 - Forças hidrodinâmicas produzidas pelo leme

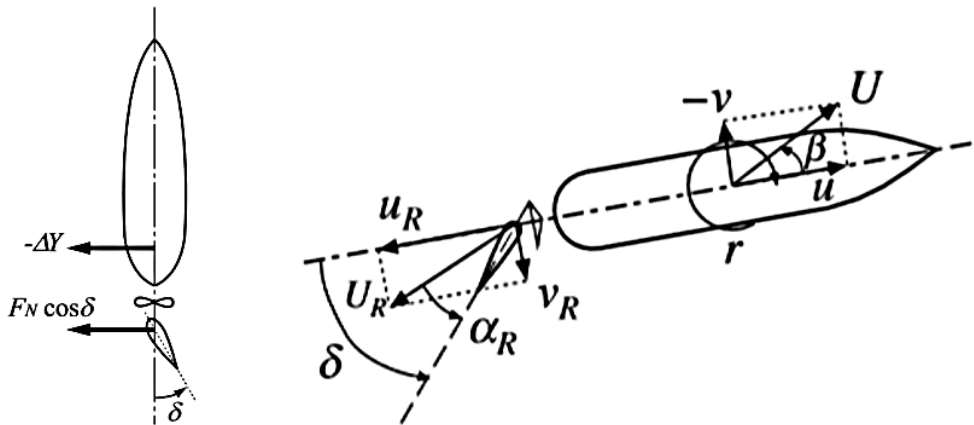


Figura 6- Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions (Fonte: Yasukawa & Yoshimura, (2014))

$t_r, a_H, x_H$  Coeficientes representativos da interação entre o casco do navio e a madre do leme.

$t_r$  Fator de resistência à rotação da madre do leme.  
Também é o fator de aumento de impulsão induzido pela hélice.

$a_H$  Fator da força lateral a atuar no casco do navio induzida pelo leme.  
Definida por:

$$\alpha_H = \frac{-\Delta Y}{F_N \cos(\delta)}$$

*Equação 16 - Fator da força lateral a atuar no casco do navio induzida pelo leme*

$\Delta Y$  Força induzida no casco, representada na figura 6. (N).

$x_H$  Ponto de aplicação longitudinal da componente lateral da força, (m).

$F_N$  Força normal produzida pelo leme, (N). A força tangencial é desprezível.

Definida por:

$$F_N = \frac{1}{2} \rho A_R U_R^2 f_\alpha \sin(\alpha_R)$$

*Equação 17 - Força normal produzida pelo leme*

$U_R$  Velocidade do fluxo produzido, ( $\frac{m}{s}$ ), definido por:

$$U_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2}$$

*Equação 18 - Velocidade do fluxo produzido*

$\alpha_R$  Ângulo do fluxo produzido, (°), definido como:

$$\alpha_R = \delta - \tan^{-1}\left(\frac{v_R}{u_R}\right) \approx \delta - \frac{v_R}{u_R}$$

*Equação 19 - Ângulo do fluxo produzido*

$v_R$  Assumindo que o ângulo de leme é zero quando  $\beta$  e  $r'$  são zero, a velocidade tangencial ao fluxo, ( $\frac{m}{s}$ ), pode ser definido como:

$$v_R = U \gamma_R \beta_{R0}$$

*Equação 20 - Velocidade tangencial ao fluxo para ângulo de leme zero*

$\gamma_R$  Coeficiente endireitante do fluxo.

$\beta_{R0}$  É a soma do ângulo de deriva,  $\beta$ , e da mudança de velocidade do fluxo devido à guinada,  $-x'_R r'$ .

$x'_R$  Coordenada longitudinal da posição da porta do leme, adimensional.

$\beta_R$  O fenômeno de endireitamento de fluxo não é simples, portanto este parâmetro corresponde ao ângulo efetivo de fluxo para o leme, ( $^\circ$ ). Podendo calcular-se por:

$$\beta_R = \beta - l'_R r'$$

*Equação 21 - Ângulo efetivo de fluxo para o leme*

Sendo que  $l'_R$  substitui a coordenada  $x'_R$ .

$l'_R$  Constante experimental que expressa  $v_R$  com maior exatidão. Calculada por testes em modelos.

$v_R$  Por alteração anterior, este parâmetro, ( $\frac{m}{s}$ ), para a calcular-se:

$$v_R = U \gamma_R \beta_R$$

*Equação 22 - Velocidade tangencial ao fluxo com ângulo de leme*

$\gamma_R$  Este coeficiente afeta consideravelmente a simulação, normalmente possui magnitudes diferentes para bombordo e estibordo. Uma das razões pelas quais a guinada para bordos contrários ser diferente.

$u_R$  Velocidade da componente longitudinal do fluxo para o leme, ( $\frac{m}{s}$ ). Representado na figura 6. Definido por:

$$u_R = \varepsilon u (1 - w_p) \sqrt{\eta (1 + k \left( \sqrt{1 + \frac{8 K_T}{\pi J_p^2}} - 1 \right))^2 + (1 - \eta)}$$

Equação 23 - Velocidade longitudinal do fluxo para o leme

$\varepsilon$  Rácio da fração da esteira para um certo ângulo de leme. Definido por:

$$\varepsilon = \frac{(1 - w_R)}{(1 - w_p)}$$

Equação 24 - Rácio da fração da esteira

$k$  Constante experimental.

### 3.2 Equações matemáticas para aplicação no simulador

O simulador construído foi um método baseado no modelo MMG, retirado de (SUTULO, 2013).

O modelo aplicado é não linear com 3 GDL, é um sistema de equações Euler, considerando o navio como um corpo rígido e a movimentar-se sobre o plano horizontal (Sutulo & Guedes Soares, 2014).

O modelo é então definido por:

$$\begin{cases} (m + u_{11}) \dot{u} - m v r - m x_g r^2 = X_q + X_p \\ (m + u_{22}) \dot{v} + ((m x_g) + u_{26}) \dot{r} + m u r = Y_q \\ ((m x_g) + u_{62}) \dot{v} + (I_{zz} + u_{66}) \dot{r} + m x_g u r = N_q \end{cases}$$

Equação 25 - Modelo MMG para 3 GDL

$u$  Velocidade de avanço, *Surge*, ( $\frac{m}{s}$ ).

$v$  Velocidade de deslocamento lateral, *Sway*, ( $\frac{m}{s}$ ).

$r$	Velocidade de guinada, <i>Yaw</i> , ( $\frac{rad}{s}$ ).
$m$	Massa do navio ( <i>Kg</i> ).
$X_q$	Força de avanço que atua sobre o casco do navio e sobre o leme ( <i>N</i> ).
$X_p$	Força de avanço que atua sobre o casco do navio devido à hélice, impulsão efetiva ( <i>N</i> ).
$Y_q$	Força de deriva lateral que atua sobre o casco do navio e sobre o leme ( <i>N</i> ).
$N_q$	Momento de guinada que atua sobre o casco do navio e sobre o leme ( <i>N</i> ).
$u_{11}$	Coeficiente de massa acrescentada devido ao carregamento produzido pela inercia do fluído no avanço devido à aceleração de avanço.
$u_{22}$	Coeficiente de massa acrescentada devido ao carregamento produzido pela inercia do fluído no deslocamento lateral devido à aceleração de deslocamento lateral.
$u_{26}$	Coeficiente de massa acrescentada devido ao carregamento produzido pela inercia do fluído no deslocamento lateral devido à aceleração de guinada.
$u_{62}$	Coeficiente de massa acrescentada devido ao carregamento produzido pela inercia do fluído na guinada devido à aceleração de deslocamento lateral.
$u_{26} = u_{62}$	Assumido iguais segundo "Sutulo, Basics of Ship Manoeuvrability, 2013"

$u_{66}$  Coeficiente de massa acrescentada devido ao carregamento produzido pela inercia do fluído na guinada devido à aceleração de guinada.

A nomenclatura do sistema de coordenadas utilizado foi o descrito em Sutulo, *Basics of Ship Manoeuvrability* (2013) representado na figura abaixo:

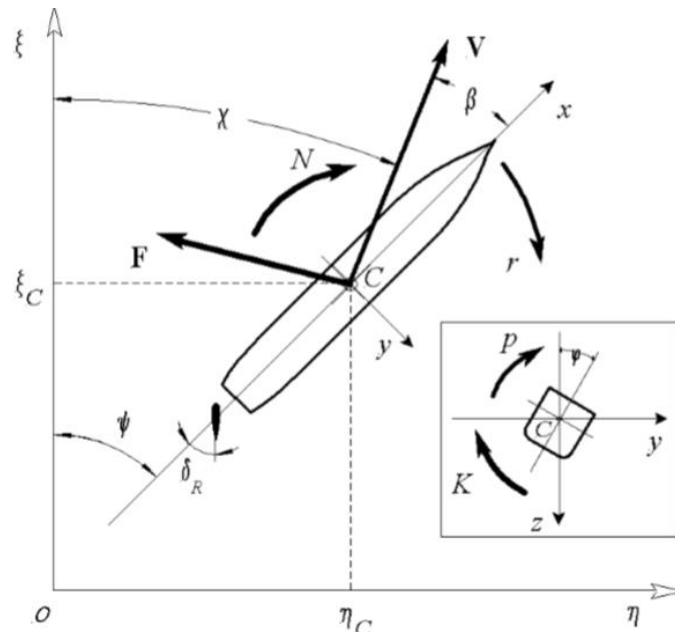


Figura 7- sistemas de coordenadas (Fonte: (SUTULO, 2013))

### 3.2.1 Modelo da máquina do leme

O sistema de direção foi retirado de *Basics of Ship Manoeuvrability* (Sutulo, 2013, pp. 99 – 100) e representa uma máquina leme típica de um navio onde a resposta são os ângulos de leme.

O modelo genérico de uma máquina do leme pode ser descrito como uma equação diferencial não linear de primeira ordem, também transcrito de *Basics of Ship Manoeuvrability* (Sutulo, 2013) e definido como:

$$\dot{\delta}_R = F_R(\delta^*, \delta_R)$$

Equação 26 - Modelo genérico de ângulos de leme

Com,

$$F_R(\delta^*, \delta_R) \begin{cases} \min \left[ \frac{1}{T_R} (|\delta^{**} - \delta_R| - \delta_0), \varepsilon_m \right] \text{sign}(\delta^{**} - \delta_R), & L = \text{Falso} \\ 0, & L = \text{Verdadeiro} \end{cases}$$

*Equação 27 - Função genérica de ângulos de leme*

$L$  Variável booleana definida como:

$$L = (|\delta^{**} - \delta_R| < \delta_0) \vee [ (|\delta_R| \geq \delta_m) \wedge (\text{sign}(\delta^{**} - \delta_R) = \text{sign}(\delta_R)) ]$$

$\varepsilon_m$  Taxa de deflexão máxima, ( $\frac{^\circ}{s}$ ).

$\delta_m$  Ângulo de leme máximo, ( $^\circ$ ).

$T_R$  Atraso temporal da máquina do leme, (s), normalmente:

$$T_R = 3.5 \text{ s}$$

$\delta^{**}$  Variável auxiliar, definida como:

$$\delta^{**} = \begin{cases} (\delta_m + \delta_0) \text{sign}(\delta^*), & |\delta^*| \geq \delta_m \\ \delta^*, & |\delta^*| < \delta_m \end{cases}$$

*Equação 28 - Variável auxiliar para cálculo de ângulos de leme*

$\delta^*$  Ângulo de leme ordenado, ( $^\circ$ ).

$\delta_0$  Largura de banda morta, ( $^\circ$ ).

### 3.2.2 Modelo do avanço da hélice

O modelo da força de avanço da hélice é baseado no descrito em "4-quadrant model proposed by OLTmann & Sharma de 1985 e ajustado por Sutulo & Guedes Soares (2011).

$$T_E = (1 - t_p) \frac{\rho}{2} A_d C_T V_B^2$$

*Equação 29 - Força de avanço da hélice*

$t_p$  Coeficiente de impulso.

$A_d$  Área do disco da hélice, ( $m^2$ ).

$$C_T = \begin{cases} C_{T0} + C_T^c c_B + C_T^s s_B, & c_B \geq 0,9336 \\ C_T^{cc} |c_B| c_B + C_T^{ss} |s_B| s_B, & c_B < 0,9336 \end{cases}$$

$$V_B^2 = u_A^2 + v_{CP}^2$$

$$u_A = u (1 - w_p)$$

$$v_{CP} = 0.7 \pi D_p n$$

$w_p$  Coeficiente de esteira.

$D_p$  Diâmetro da hélice, ( $m$ ).

$n$  Frequência de rotação da hélice ( $rps$ )

$$c_B = \frac{v_{CP}}{V_B}$$

$$s_B = \frac{u_A}{V_B}$$

$$C_{T0} = -0.833$$

$$C_T^c \qquad C_T^c = 1.02$$

$$C_T^s \qquad C_T^s = -0.332$$

$$C_T^{cc} \qquad C_T^{cc} = 0.099$$

$$C_T^{ss} \qquad C_T^{ss} = -0.671$$

### 3.2.3 Cálculo dos distúrbios iniciais

Para poderem ser resolvidas numericamente, as equações anteriores têm que ser reescritas em forma matricial para poderem ser calculados os valores a cada intervalo de tempo, definido inicialmente pelo programa.

Deste modo além das 3 equações relativamente aos 3 GDL, são adicionadas mais 3 equações cinemáticas relativas à proa e posição x e y no referencial inercial  $O_0-X_0Y_0Z_0$ , definidas como:

$$\begin{cases} \frac{d\psi}{dt} = r \\ \dot{\eta} = u \sin(\psi) + v \cos(\psi) \\ \dot{\xi} = u \cos(\psi) - v \sin(\psi) \end{cases}$$

*Equação 30 - Equações cinemáticas a adicionar*

Portanto as equações a serem resolvidas no sistema produzido no software MATLAB<sup>®</sup> são transformadas na forma de matriz, resultando no seguinte sistema:

$$F = \begin{bmatrix} (m + u_{11}) \dot{u} - m v r - m x_g r^2 - X_q - X_p = 0 \\ (m + u_{22}) \dot{v} + ((m x_g) + u_{26}) \dot{r} + m u r - Y_q = 0 \\ ((m x_g) + u_{62}) \dot{v} + (I_{zz} + u_{66}) \dot{r} + m x_g u r - N_q = 0 \\ \dot{\psi} - r = 0 \\ \dot{\eta} - u \sin(\psi) - v \cos(\psi) = 0 \\ \dot{\xi} - u \sin(\psi) + v \cos(\psi) = 0 \end{bmatrix}$$

*Equação 31 - Formatação das equações de movimento para serem usadas no MATLAB®*

Que resultam em:

$$\frac{dF}{dx_i} = \begin{bmatrix} 0 & -m r & -m v - 2 m x_g & & 0 & 0 & 0 \\ m r & 0 & m u & & 0 & 0 & 0 \\ m x_g r & 0 & m x_g u & & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\psi) & -\cos(\psi) & 0 & & -u \cos(\psi) + v \sin(\psi) & 0 & 0 \\ -\cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 & & u \sin(\psi) + v \cos(\psi) & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

*Equação 32 - Matriz jacobiana das velocidades*

$$\frac{dF}{d\dot{x}_i} = \begin{bmatrix} (m + \mu_{11}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (m + \mu_{22}) & (m x_g + \mu_{26}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (m x_g + \mu_{62}) & (I_{zz} + \mu_{66}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

*Equação 33 - Matriz jacobiana das acelerações*

Sabendo que as condições iniciais são:

$u(0) = V_0$ , com  $V_0$  sendo a velocidade do navio definida pelo utilizador

$v(0) = 0$

$r(0) = 0$

A cada intervalo de tempo é efetuada integração para obter os valores de:

$$V = \sqrt{u^2 + v^2}$$

*Equação 34 - Velocidade do navio*

$$u' = \frac{u}{V}$$

*Equação 35 - Velocidade de avanço do navio adimensionalizada*

$$v' = \frac{v}{V}$$

*Equação 36 - Velocidade de deslocamento lateral do navio adimensionalizada*

$$r' = r \frac{L}{V}$$

*Equação 37 - Velocidade de guinada adimensionalizada*

“Em cada intervalo de tempo são deste modo calculado as forças adimensionais, usando coeficientes adimensionais, determinados por regressão de coeficientes retirados de dados experimentais em provas de manobrabilidade” (Sutulo, 2015), e velocidade adimensionais.

$$X'_q = X'_{uu} u'^2 + X'_{vr} v' r' + X'_{\delta\delta} \delta_R^2$$

Equação 38 - Força adimensional atuada sobre o casco do navio e sobre o leme devido ao avanço

$$Y'_q = Y'_0 + Y'_v v' + Y'_r r' + Y'_{vvv} v'^3 + Y'_{vvr} v'^2 r' + Y'_\delta \delta_R + Y'_{\delta vv} v'^2 \delta_R \\ + Y'_{\delta\delta v} v' \delta_R^2 + Y'_{\delta\delta\delta} \delta_R^3$$

Equação 39 - Força adimensional atuada sobre o casco do navio e sobre o leme devido ao deslocamento lateral

$$N'_q = N'_0 + N'_v v' + N'_r r' + N'_{vvv} v'^3 + N'_{vvr} v'^2 r' + N'_\delta \delta_R + N'_{\delta vv} v'^2 \delta_R \\ + N'_{\delta\delta v} v' \delta_R^2 + N'_{\delta\delta\delta} \delta_R^3$$

Equação 40 - Força adimensional atuada sobre o casco do navio e sobre o leme devido à guinada

Para navios do tipo “twin screw” pode ser definido:

$$Y'_0 = 0$$

$$N'_0 = 0$$

Sendo os coeficientes adimensionais definidos por:

$$X'_{uu} \quad X'_{uu} = -k_{xuu} \frac{2 m C_{TL}}{\rho L^2 T}$$

$$X'_{vr} \quad X'_{vr} = -k_{xvr} \frac{1.3 \mu_{22}}{\rho L^2 T}$$

$$X'_{\delta\delta} \quad X'_{\delta\delta} = K_R k_{x\delta\delta} X'_{\delta\delta 0}$$

$$Y'_0 \quad Y'_0 = k_{y0} Y'_{00}$$

$$N'_0 \quad N'_0 = k_{n0} N'_{00}$$

$$Y'_v \quad Y'_v = k_{yv} (1 + b_1 \tau') Y'_{v0}$$

$$N'_v \qquad N'_v = k_{nv} (1 + b_3 \tau') N'_{v0}$$

$$Y'_r \qquad Y'_r = k_{yr} (1 + b_2 \tau') Y'_{r0}$$

$$N'_r \qquad N'_r = k_{nr} (1 + b_4 \tau') (N'_{r0} + m' x'_G u')$$

$$Y'_\delta \qquad Y'_\delta = K_R k_{y\delta} Y'_{\delta 0}$$

$$N'_\delta \qquad N'_\delta = K_R k_{n\delta} N'_{\delta 0}$$

$$Y'_{vvv} \qquad Y'_{vvv} = k_{yvvv} Y'_{vvv0}$$

$$N'_{vvv} \qquad N'_{vvv} = k_{nvvv} N'_{vvv0}$$

$$Y'_{vvr} \qquad Y'_{vvr} = k_{yvvr} Y'_{vvr0}$$

$$N'_{vvr} \qquad N'_{vvr} = k_{nvvr} N'_{vvr0}$$

$$Y'_{\delta vv} \qquad Y'_{\delta vv} = K_R k_{y\delta vv} Y'_{\delta vv0}$$

$$N'_{\delta vv} \qquad N'_{\delta vv} = K_R k_{n\delta vv} N'_{\delta vv0}$$

$$Y'_{\delta\delta v} \qquad Y'_{\delta\delta v} = K_R k_{y\delta\delta v} Y'_{\delta\delta v0}$$

$$N'_{\delta\delta v} \qquad N'_{\delta\delta v} = K_R k_{n\delta\delta v} N'_{\delta\delta v0}$$

$$Y'_{\delta\delta\delta} \qquad Y'_{\delta\delta\delta} = K_R k_{y\delta\delta\delta} Y'_{\delta\delta\delta 0}$$

$$N'_{\delta\delta\delta} \qquad N'_{\delta\delta\delta} = K_R k_{n\delta\delta\delta} N'_{\delta\delta\delta 0}$$

$k$  Coeficientes de ajuste assumidos igual a 1.  
 (ex.  $k_{xuu}$ ,  
 $k_{xvr}$ , ...)

$C_{TL}$  Coeficiente de arrasto adimensionalizado por  $\frac{m}{L} V^2$

$K_R$  Área da porta do leme, ( $m^2$ ).

$\tau$  Caimento relativo, definido como:

$$\tau = \frac{T_{aft} - T_{fwd}}{T}$$

*Equação 41 - Caimento relativo*

$m'$  Massa do navio adimensionalizada

$$m' = \frac{2 m}{\rho L^2 T}$$

Que pode ser definido como:

$$m' = 0.172$$

$x'_G$  Abcissa do centro de massa adimensionalizada.

$$x'_G = \frac{x_G}{L}$$

Parâmetros constantes, contendo valores base para as derivadas hidrodinâmicas ( $X', Y', N'$ ), representados na tabela 2.

Tabela 2 - Constantes para cálculo das derivadas hidrodinâmicas

$C_{TL}$	0.07
$Y'_{00}$	-0.0008
$N'_{00}$	0.00059
$Y'_{v0}$	-0.244
$N'_{v0}$	-0.0555
$Y'_{r0}$	0.067
$N'_{r0}$	-0.0349
$Y'_{vvv0}$	-1.702
$N'_{vvv0}$	0.345
$Y'_{vvr0}$	3.23
$N'_{vvr0}$	-1.158
$Y'_{\delta 0}$	-0.0586
$N'_{\delta 0}$	0.0293
$X'_{\delta\delta 0}$	-0.02
$Y'_{\delta vv0}$	-0.25
$N'_{\delta vv0}$	-0.1032
$Y'_{\delta\delta v0}$	-0.0008
$N'_{\delta\delta v0}$	0.00264
$Y'_{\delta\delta\delta 0}$	0.00975

$N'_{\delta\delta\delta\delta}$	-0.00482
$b_1$	0.6667
$b_2$	0.8
$b_3$	$b_3 = -0.27 \frac{Y'_{v0}}{N'_{v0}}$
$b_4$	0.3
$k_H$	$k_H = 2 \frac{T}{L}$
$k_{11}$	$k_{11} = 0.25 k_H$
$\mu_{11}$	$\mu_{11} = k_{11} m$
$k_{22}$	$k_{22} = 2 \frac{T}{B} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{B}{L}\right)$
$\mu_{22}$	$\mu_{22} = k_{22} m$
$\mu_{26}$	$\mu_{26} = \mu_{22} x_G$
$k_{66}$	$k_{66} = 2 \frac{T}{B} \left(1 - 1.6 \frac{B}{L}\right)$
$I_{zz}$	$I_{zz} = 0.0625 m L^2$
$\mu_{66}$	$\mu_{66} = k_{66} I_{zz}$

Deste modo que a cada intervalo de tempo são calculadas as forças dimensionalizadas, ( $N$ ), definidas como:

$$X_q \quad X_q = X'_q \frac{\rho}{2} V^2 L T$$

*Equação 42 - Força dimensional atuada sobre o casco do navio e sobre o leme devido ao avanço*

$X_p$ 

Impulsão efetiva

$$X_p = T_E = \frac{1}{2} (1 - t_p) A_d C_T V_B^2$$

*Equação 43 - Impulsão efetiva* $Y_q$ 

$$Y_q = Y'_q \frac{\rho}{2} V^2 L T$$

*Equação 44 - Força dimensional atuada sobre o casco do navio e sobre o leme devido ao deslocamento lateral* $N_q$ 

$$N_q = N'_q \frac{\rho}{2} V^2 L^2 T$$

*Equação 45 - Força dimensional atuada sobre o casco do navio e sobre o leme devido à guinada*

### 3.3 Algoritmo para simulação de movimento de um navio

Para aplicação das equações anteriores foi criado um programa no software MATLAB®, que resolve as equações de movimento de um navio e reproduz as mesmas graficamente.

Resolve três tipos de provas de manobrabilidade, curvas de giração, prova de ZigZag e prova de espiral, as provas base de manobrabilidade segundo várias sociedades classificadoras e organizações marítimas.

Para simplificação da explicação do processo de programação efetuada, optou-se por apresentá-lo sob a forma de fluxograma que se apresenta na figura 8 e os respectivos códigos, são apresentados no apêndice C.

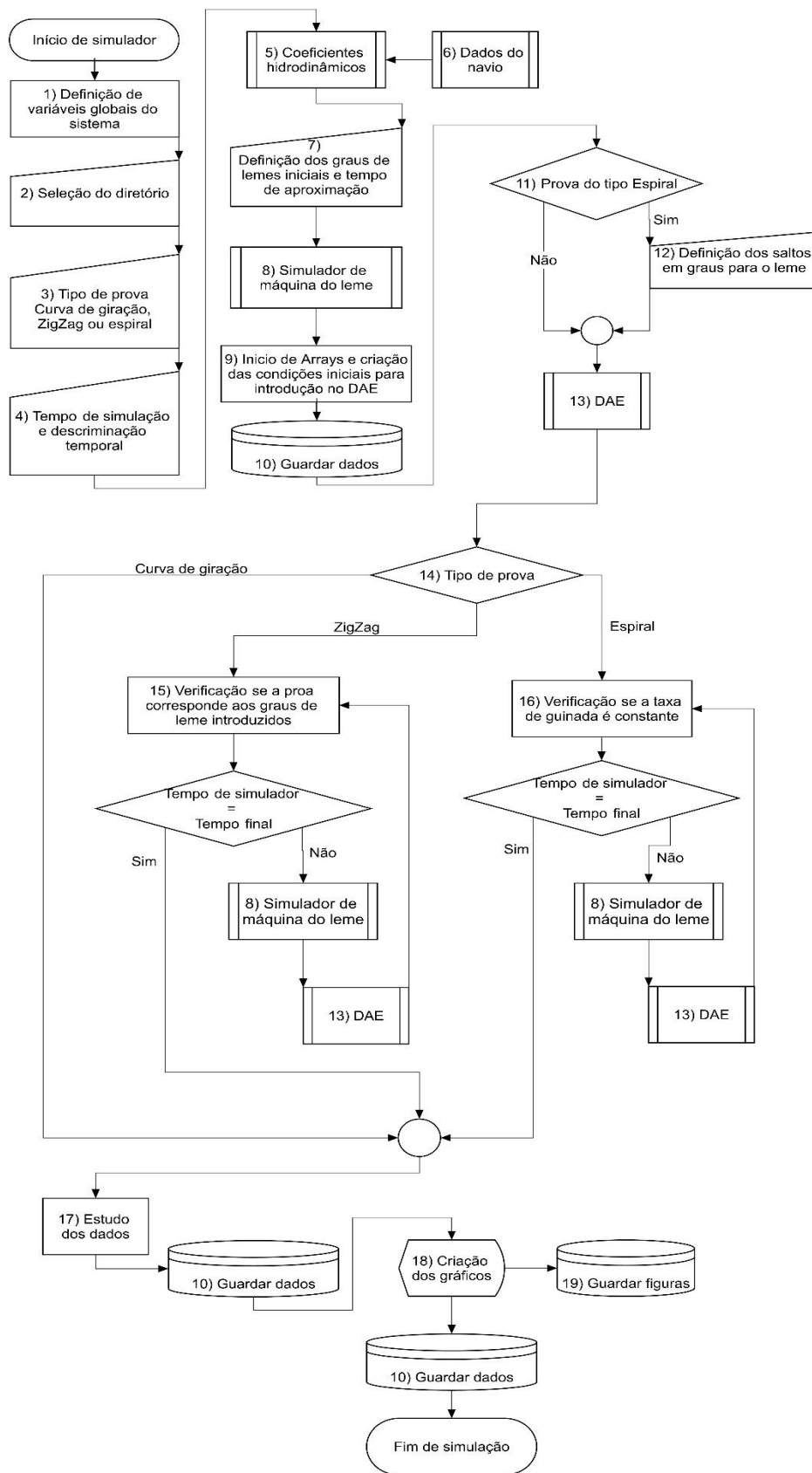


Figura 8 - Fluxograma do algoritmo de simulação do movimento do navio

O programa está definido em diversas fases, inicialmente são definidas variáveis globais que servirão posteriormente para passagem de informação entre o programa e os subprocessos.

Seguidamente, nos pontos de um a quatro, temos a informação introduzida pelo utilizador, que contém a seleção do diretório, a seleção do tipo de prova, entre curva de giração, ZigZag e Espiral e por último a seleção do tempo de simulação e discriminação temporal, que nos diz o número de pontos em cada segundo.

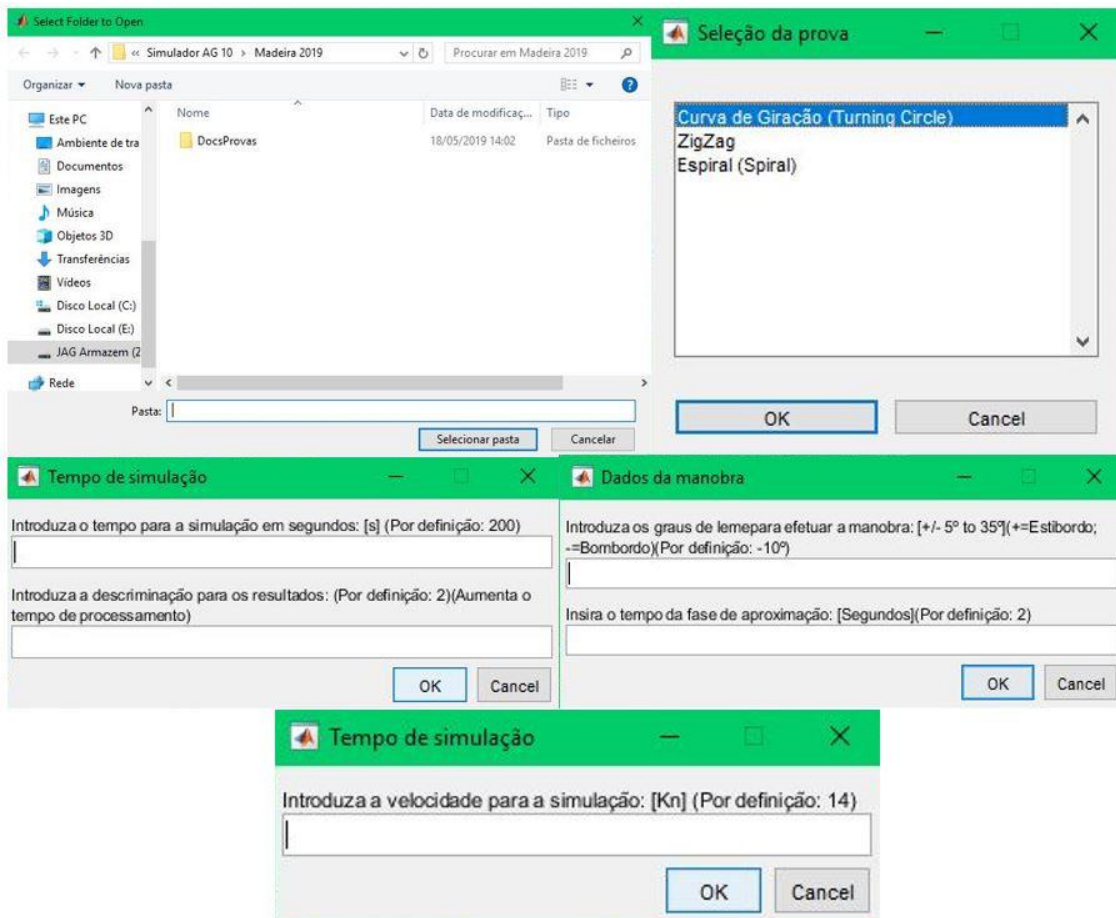


Figura 9 - informação introduzida pelo utilizador

Começa depois a computadorização de dados utilizando um subprocesso relativo aos coeficientes hidrodinâmicos, *Coef\_Hydro.m*. Este subprocesso calcula os parâmetros dos coeficientes adimensionais para cálculo posterior de perturbações externas.

Para além dessa função, também calcula a força de avanço da hélice, a impulsão efetiva, referida no 3.2.2. e produz a avaliação da estabilidade direcional, apresentada ao utilizador.

Para estas funções este subprocesso utiliza um subprocesso complementar, *DadosNavio.m*, que contém todos os dados necessários sobre o navio. Em caso de o simulador vir a ser utilizado noutra tipo de navio, este ficheiro é necessário ser alterado.

Este subprocesso está dividido em várias as fases, como apresentado no apêndice C.3., com os valores característicos do navio simulado omitidos por motivos de confidencialidade.

A primeira fase é composta pelos dados iniciais do navio, que contém os dados definidos no apêndice A.1.

Numa segunda fase, são dados calculados com informação introduzida no primeiro ponto, especificados no apêndice A.2.

No ponto três são dados relativos ao leme e propulsão, definido no apêndice A.3.

No ponto 3.1 são dados específicos da hélice, definido no apêndice A.4.

No ponto 3.2 são dados específicos da porta do leme, definido no apêndice A.5.

Por último, são criadas as variáveis de tempo de referência, que é a divisão do comprimento do navio pela velocidade nominal ou máxima do navio, e seguidamente os dados do navio são guardados no ficheiro *DadosNavios\_workspace.mat*.

No ponto sete do fluxograma, à semelhança do ponto um a quatro existe a inserção por parte do utilizador dos graus de leme a utilizar e do tempo de aproximação da manobra, como representado na figura 9.

Os valores introduzidos serão depois utilizados no ponto oito que é a utilização do subprocesso *ModeloLeme.m*, que corre o simulador da máquina de leme referido em 3.2.1.

No ponto nove há a inicialização de vetores para serem utilizados no cálculo do movimento do navio. No ponto dez são guardados todos os dados iniciais no ficheiro *RunSim\_1\_workspace.mat*.

No ponto onze e doze é a primeira divisão do código. Se a prova for do tipo espiral, definida anteriormente pelo utilizador, é pedido, por último, os saltos em graus do leme para a execução da prova.

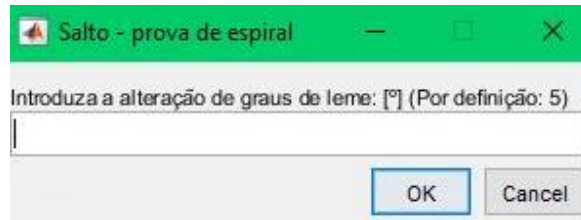


Figura 10 - Definição de saltos da prova de espiral

No ponto 13 a 16 é a parte de cálculo do sistema, onde vai simulando o movimento de um navio segundo os dados introduzidos pelo utilizador. Para tal, inicialmente, no ponto 13 corre o ficheiro *dae4.m*.

Este ficheiro foi retirado de (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/28-differential-algebraic-equation-solvers>) que é um programa MATLAB® que resolve um sistema de equações diferenciais algébricas por um método de quarta ordem a cada intervalo de tempo.

O sistema de equações utilizado é definido na função *eq\_GenericModel.m* relativo ao descrito no Cálculo das perturbações iniciais em 3.2.3.

Corre a simulação no tempo total definido pelo utilizador. Seguidamente entra num ciclo de condição conforme o tipo de prova.

- Se a prova for do tipo ZigZag é verificado o ponto onde a proa corresponde à alteração de graus pretendida. Seguidamente é utilizado o subprocesso de simulação da máquina do leme e é novamente feita a simulação desse ponto até ao tempo final, com as novas condições introduzidas. Este processo repete-se até que o tempo de verificação seja igual ao tempo final.

- Se a prova for tipo espiral, o processo é semelhante ao descrito anteriormente, mas neste caso o ponto usado para alteração da simulação é quando a taxa de guinada é aproximadamente zero.

Nesta fase o programa abre uma figura onde é atualizada a simulação em tempo real conforme são calculadas as equações de movimento, que está demonstrado nas duas janelas da figura 11, onde a primeira é quando é efetuada uma simulação da prova de ZigZag e a segunda quando é efetuada uma simulação da prova de Espiral. Também é aberta uma barra de progresso juntamente com a criação das figuras.

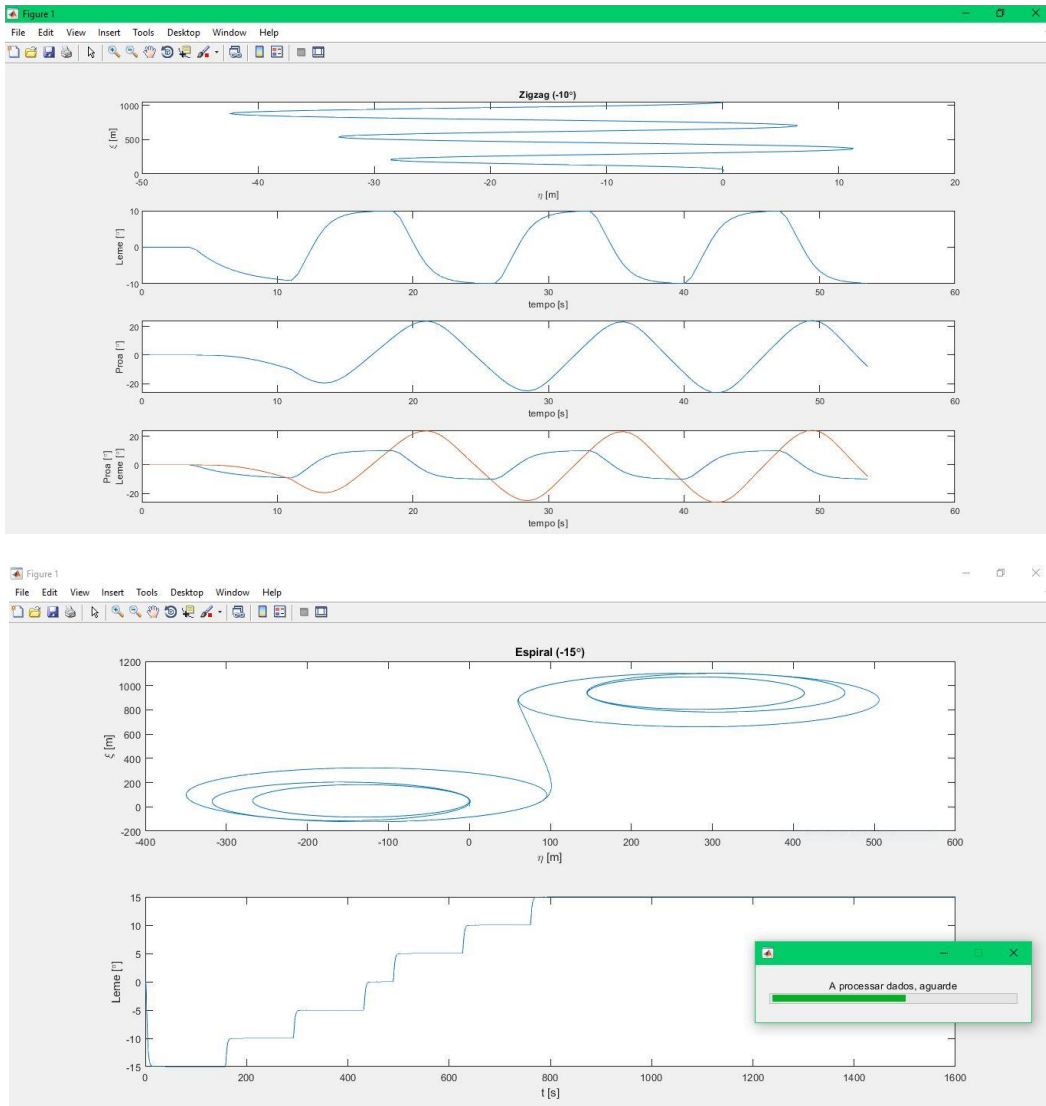


Figura 11 - Acompanhamento da progressão

Após este ciclo, ou se a prova for uma curva de giração, chega-se ao ponto 17, que é o estudo dos dados.

Neste ponto o estudo é efetuado conforme o tipo de prova, se for:

- Curva de giração são encontradas as proas com afastamento de  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$ , verificando nas duas primeiras o avanço e o diâmetro tático, respetivamente. Também são encontrados os pontos de maior avanço, afastamento, através de diferenças entre todos os pontos relativamente aos pontos iniciais. Seguidamente é usada a função *find* para encontrar a posição dessas informações;
- Na prova de ZigZag é utilizada a função *findpeaks* que corre o vetor de proa e de graus de leme encontrando os máximos. Com estas posições são retirados os valores máximos em graus de proa e leme e o tempo a que ocorre, a diferença entre ambos será o *overshoot angle*, ou seja, a diferença entre a execução do leme e a guinada máxima, respetivamente.

A função referida anteriormente, *findpeaks*, volta a ser utilizada para cálculo dos zeros da proa e do leme, para deste modo ser possível calcular o alcance e o tempo que demora a efetuar um ciclo completo;

- Na prova de espiral são calculados diversos pontos relativos à taxa de guinada e graus de leme relativos, através das funções *islocalmax* e *islocalmin*.

Seguidamente são guardados os dados tratados em *VariaveisTotais\_Graph.mat*, e são criados os gráficos da simulação, no ponto 18.

São criados diversos gráficos para cada tipo de prova, sendo que os mais importantes, são:

- Para a curva de giração o gráfico cartesiano de posições, onde são apresentadas juntamente as informações calculadas no ponto 17, estudo de dados;

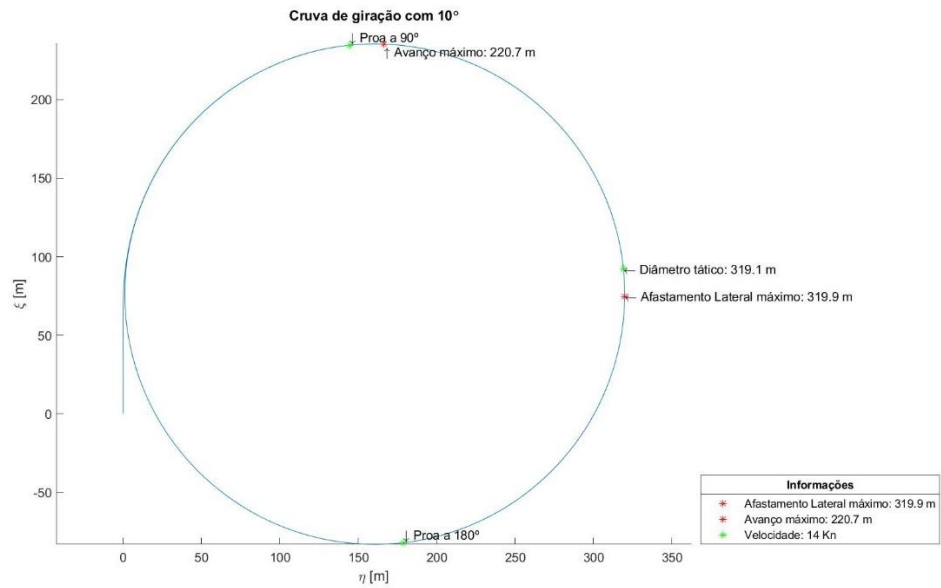


Figura 12 - Gráfico da curva de giração

- Para a prova de ZigZag é apresentado um gráfico cartesiano onde no eixo das abcissas é representado o tempo e no eixo das ordenadas são apresentados os graus de leme e os graus de proa. Em conjunto, são também apresentadas as informações estudadas e referidas anteriormente;

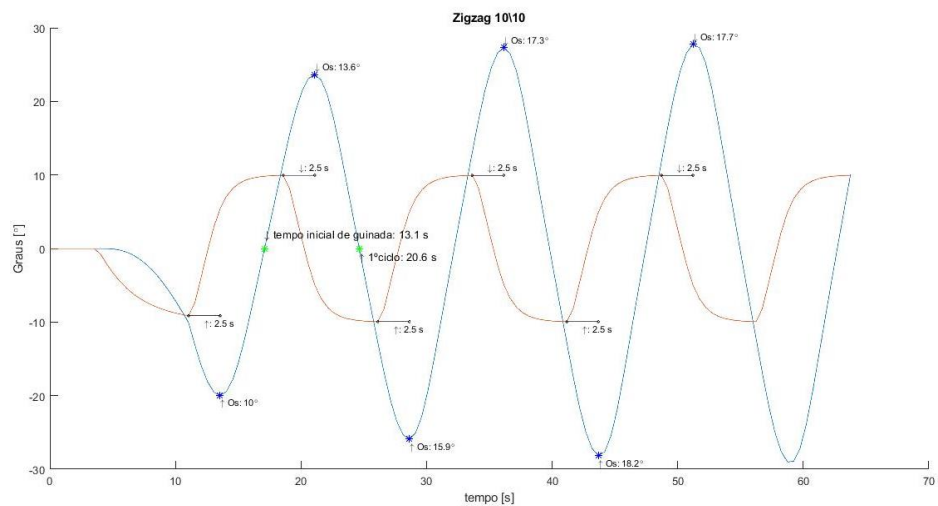


Figura 13 – Gráfico da prova de ZigZag

- Para a prova de espiral, é apresentado um gráfico cartesiano onde no eixo das abcissas é apresentado os graus de leme e no eixo das ordenadas é apresentada a taxa de guinada.

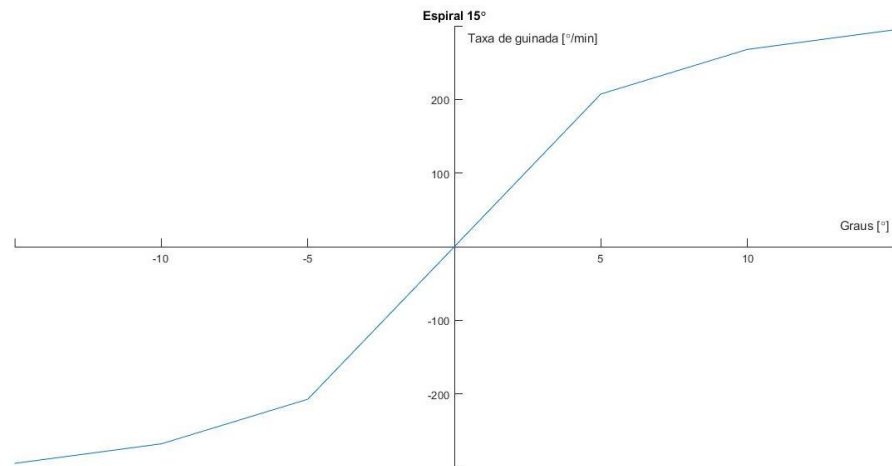


Figura 14 - Gráfico da prova de espiral

No ponto 19 as figuras criadas são guardadas, com data e hora, no diretório escolhido inicialmente pelo utilizador.

Por último os dados totais são guardados em *RunSim\_2\_workspace.mat*.



## **4 Determinação dos dados reais de manobrabilidade de um navio**

O estudo foi efetuado utilizando um navio da Marinha Portuguesa para efetuar provas de manobrabilidade.

O objetivo a concretizar foi a criação de um sistema de baixo custo que conseguisse realizar as provas e obter dados de forma prática e fácil.

Deste modo, partiu-se para o estudo de diversas opções de trabalho.

A primeira opção seria utilizar o sistema que o instituto hidrográfico dispõe, que permite realizar as provas montando no navio uma unidade de movimento relativo, *motion relative unit* (MRU).

Este dispositivo dispõe de um giroscópio e um acelerómetro, entre outros equipamentos integrados, que permitem obter a maioria dos dados necessários para efetuar o estudo de movimento de um navio, com exceção dos ângulos de leme e dados atmosféricos como o vento. Por esta razão, este sistema apresentava limitações, porque esses dados teriam de ser retirados manualmente em cada prova, provocando assim limitação no processamento automático dados.

Para além disso, a unidade a montar apresentava-se muito dispendiosa, não estando os respetivos custos incluídos nos critérios iniciais da investigação.

Em resultado, desenvolveu-se a ideia de montar um sistema de custo reduzido, obtendo diversos sensores de baixo custo, capazes de devolver os dados necessários, obtendo-se assim um sistema portátil para obter dados de provas de manobrabilidade.

O principal problema encontrado foi a montagem dos sensores no navio e a acumulação dos dados de informação num único dispositivo. Por outro lado, esta solução também limitava o seu uso a pessoal com formação específica para o efeito, nomeadamente, na montagem e calibração dos sensores.

Em resultado das ideias e dificuldades iniciais, obteve-se uma solução de sistema que resolvia todas as barreiras iniciais, quer financeiras quer relativas à praticabilidade e facilidade de execução do mesmo.

Partiu-se assim para um sistema, que utiliza os próprios sensores já disponíveis e montados a bordo para recolha de dados. Com base nestes, foi criado um algoritmo em MATLAB® para tratamento e visualização dos mesmos.

#### **4.1 Obtenção de dados das provas de manobrabilidade**

Os sensores do navio estão todos ligados em rede NMEA, tipo de rede *standard* utilizado em sensores marítimos, que é utilizado pela maioria dos navios da Marinha Portuguesa. Esse facto, poderá permitir no futuro, a utilização do programa em diversas classes de navios.

Os navios têm uma *master device* onde é recebido o sinal dos sensores, por rede NMEA, e é possível obter esses dados no computador da ponte. Foi utilizado o software *PortVision® Plus* que permite conectar com a *master device*, e obter os dados, ligações *COM*, em tempo real e fazer o registo dos dados recebidos em ficheiro *TXT*.

Para não condicionar a ação de navegação normal do navio, a recolha de dados foi efetuada no computador da ponte, onde é utilizado o *Electronic Chart Display and Information System (ECDIS)*, em segundo plano. Para o efeito foram virtualizadas as portas *COM*, para ser disponibilizada a informação no ECDIS como habitual, e no *PortVision® Plus*.

A recolha foi efetuada utilizando a ferramenta *Wcom2 – Test Terminal* do programa, que permite a abertura da informação das portas *COM* quando se pretende realizar uma prova e fechá-las quando terminadas, exemplificado na figura 15.

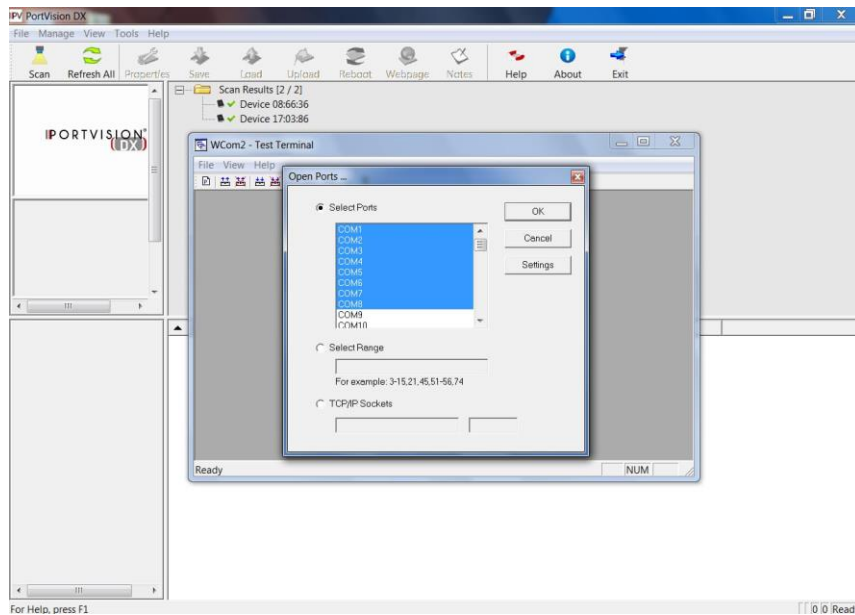


Figura 15 - Abertura de portas COM

Um das mais-valias na utilização deste sistema é o facto de permitir uniformização do formato dos dados. Embora estes sejam oriundos de diferentes sensores, a forma como são recebidos os resultados é igual.

O início da mensagem é iniciado pelo símbolo \$ e possui cinco caracteres seguidos, sendo que os últimos três definem o tipo de informação da linha. Seguidamente os campos de informações são separados por vírgulas, sendo que termina com o símbolo \*, seguida da soma de verificação, como o exemplo seguinte:

$$\text{\$--XXX,Dados,*hh<CR><LF>}$$

Este tipo de codificação de dados permite posteriormente uma fácil leitura automática e separação de dados.

Os sensores utilizados foram o *Differential Global Positioning System* (DGPS), o *Warship Automatic Identification System* (W-AIS), o anemómetro, o giroscópio, retirados da rede NMEA e os sensores de medição de rotação dos motores principais, dos veios e dos ângulos de leme retirados do SGP.

Do DGPS puderam ser extraídos os dados seguintes:

- GLL, Posição geográfica

\$--GLL,yyyy.yy<sup>1</sup>,a<sup>2</sup>,xxxxx.xx<sup>3</sup>,a<sup>4</sup>,hhmmss.ss<sup>5</sup>,A<sup>6</sup>,a<sup>7</sup>\*hh<CR><LF>

1	yyyy.yy	Latitude
2	a	N/S
3	xxxxx.xx	Longitude
4	a	E/W
5	hhmmss.ss	UTC
6	A	estado
7	a	Tipo de posição (poderá ser campo em branco)

- \$--GGA,hhmmss.ss<sup>1</sup>,yyyy.yy<sup>2</sup>,a<sup>3</sup>,xxxxx.xx<sup>4</sup>,a<sup>5</sup>,x<sup>6</sup>,xx<sup>7</sup>,x.x<sup>8</sup>,x.x<sup>9</sup>,M<sup>10</sup>,x.x<sup>11</sup>,M<sup>12</sup>,x.x<sup>13</sup>,xxxx<sup>14</sup>\*hh<CR><LF>

1	hhmmss.ss	UTC
2	yyyy.yy	Latitude (poderá ser campo em branco)
3	a	N/S
4	xxxxx.xx	Longitude
5	a	E/W
6	x	Qualidade do sinal GPS
7	xx	Numero de satélites em utilização
8	x.x	Precisão relativo à diluição horizontal
9	x.x	Altitude
10	M	Metros
11	x.x	Separação geoidal em metros
12	M	Metros
13	x.x	Tempo da informação desde que foi atualizada
14	xxxx	Estação de referência

- \$--VTG,x.x<sup>1</sup>,T<sup>2</sup>,x.x<sup>3</sup>,M<sup>4</sup>,x.x<sup>5</sup>,N<sup>6</sup>,x.x<sup>7</sup>,K<sup>8</sup>,a<sup>9</sup>\*hh<CR><LF>

1	x.x	Rumo verdadeiro em graus
2	T	Tipo de rumo (poderá ser campo em branco)
3	x.x	Rumo magnético em graus
4	M	Tipo de rumo
5	x.x	Velocidade verdadeira em nós
6	N	Unidade da velocidade
7	x.x	Velocidade verdadeira em $\frac{Km}{h}$
8	K	Unidade da velocidade
9	a	Tipo de informação

- \$--GNS,hhmmss.ss<sup>1</sup>,1111.11<sup>2</sup>,a<sup>3</sup>,yyyyy.yy<sup>4</sup>,a<sup>5</sup>,c<sup>6</sup>,xx<sup>7</sup>,x.x<sup>8</sup>,x.x<sup>9</sup>,x.x<sup>10</sup>,x.x<sup>11</sup>,x.x<sup>12</sup>\*hh<CR><LF>

1	hhmmss.ss	UTC
2	1111.11	Latitude

3	a	N/S
4	yyyyy.yy	Longitude
5	A	E/W
6	c-c	Tipo de dados
7	Xx	Número de satélites total
8	x.x	Precisão relativo à diluição horizontal
9	x.x	Altitude
10	x.x	Separação geoidal em metros
11	x.x	Atraso de tempo da informação
12	x.x	Estação de referência

- \$--ZDA,hhmmss.ss<sup>1</sup>,xx<sup>2</sup>,xx<sup>3</sup>,xxxx<sup>4</sup>,xx<sup>5</sup>,xx<sup>6</sup>\*hh<CR><LF>

1	hhmmss.ss	UTC
2	xx	Dia
3	xx	Mês
4	xxxx	Ano
5	xx	Horas da zona local
6	xx	Minutos da zona local

São utilizados vários campos de DGPS por redundância de informação.

Do radar obtém-se os dados seguintes:

- \$--OSD,x.x<sup>1</sup>,A<sup>2</sup>,x.x<sup>3</sup>,a<sup>4</sup>,x.x<sup>5</sup>,a<sup>6</sup>,x.x<sup>7</sup>,x.x<sup>8</sup>,a<sup>9</sup>\*hh<CR><LF>

1	x.x	Proa verdadeira
2	A	Validade da informação
3	x.x	Rumo verdadeiro
4	a	Referência do rumo
5	x.x	Velocidade
6	a	Unidades da velocidade
7	x.x	Proa verdadeira introduzida manualmente
8	x.x	Velocidade de abatimento, introdução manual
9	a	Unidades da velocidade

Relativamente ao anemómetro obtém-se:

- \$--MWV,x.x<sup>1</sup>,a<sup>2</sup>,x.x<sup>3</sup>,a<sup>4</sup>,A<sup>5</sup>\*hh<CR><LF>

1	x.x	Ângulo do vento, de 000 a 359 (°)
2	a	Referência: <ul style="list-style-type: none"> <li>• R = relativo</li> <li>• T = verdadeiro</li> </ul>
	x.x	Velocidade do Vento
4	a	Unidades da velocidade
5	A	Validade da informação

Relativamente aos sensores de informação de gestão da plataforma, foi utilizado SGP do navio que permite fazer exportação dos dados em formato *comma-separated values* (CSV)<sup>9</sup> num período específico selecionado pelo utilizador. Dos sensores do mesmo, obteve-se a informação da rotação das máquinas e veios e dos ângulos de leme. Os principais dados obtidos foram os ângulos de leme com taxa de amostragem de um por segundo.

Noutro tipo de navios poderão existir outro tipo de sensores instalados, contudo, poderão ser montados na rede NMEA obtendo assim a mesma codificação demonstrada anteriormente.

## **4.2 Algoritmo para tratamentos de dados de manobrabilidade de provas reais**

Foi criado um programa em *software* MATLAB<sup>®</sup> que permite leitura automática dos ficheiros referidos no subcapítulo anterior, criação de gráficos e estudo de parâmetros de manobrabilidade.

O navio onde foram efetuadas as provas por ser um navio militar, tem grande capacidade de resposta, e como tal, o tratamento utilizado para estudo automático de parâmetros poderá não se aplicar diretamente a outro tipo de navios.

O programa foi concebido de modo a ser o mais independente possível do utilizador e assim facilitar a sua utilização de forma bastante prática.

O programa foi feito para estudo automático de provas do tipo curva de giração, ZigZag e espiral.

Para simplificação da explicação do processo da programação efetuada, optou-se pela apresentação em forma de fluxograma que se apresenta na figura 16 e os respetivos códigos, são apresentados no apêndice D.

---

<sup>9</sup> Tipo de formato utilizado para guardar dados de formato de tabela em texto corrido, onde cada campo é separado por uma vírgula.

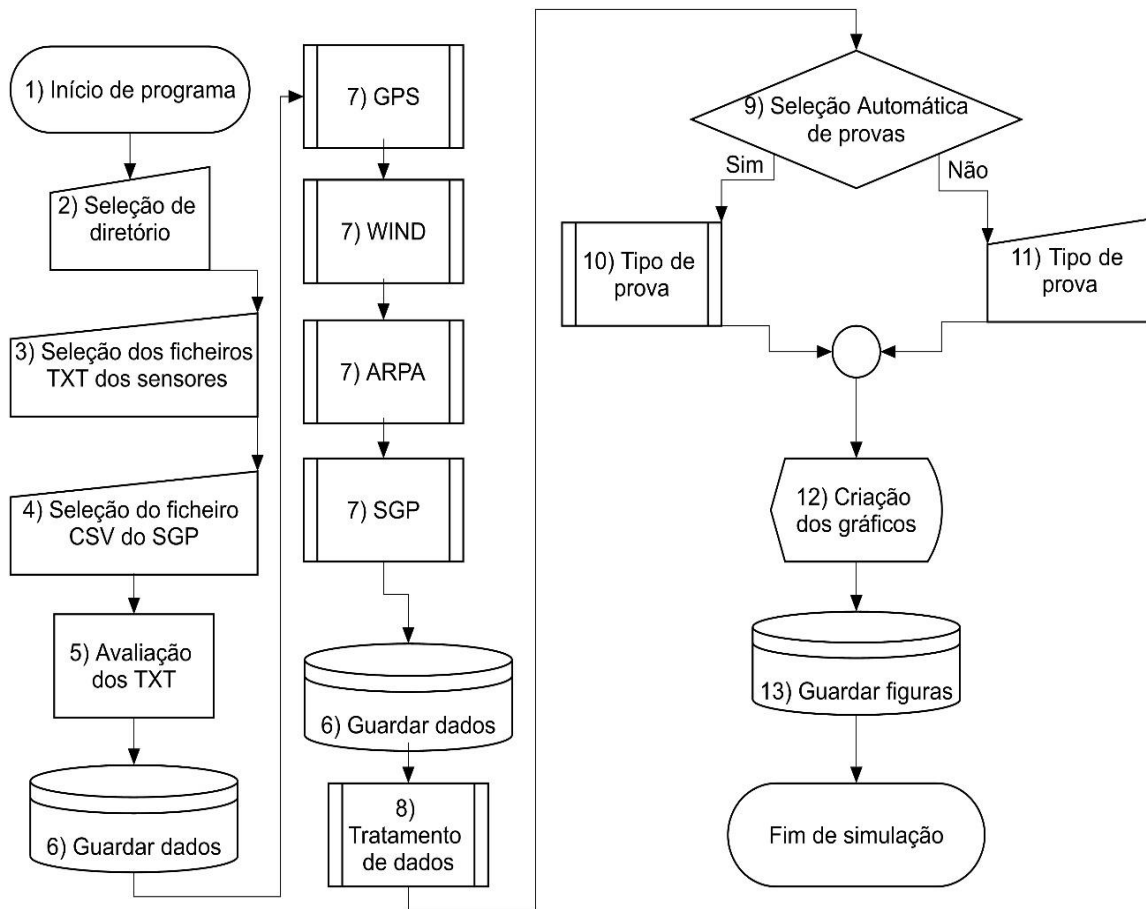


Figura 16 - Fluxograma do algoritmo de tratamento de dados reais do navio

Numa explicação mais exhaustiva:

O programa está separado por partes. Nos pontos dois a quatro são dados introduzidos pelo utilizador, designadamente a seleção de diretório, onde devem estar os ficheiros do programa e onde vão ser guardados os dados, a seleção dos ficheiros de texto e também o ficheiro do sistema de gestão da plataforma, exemplificado na figura 17.

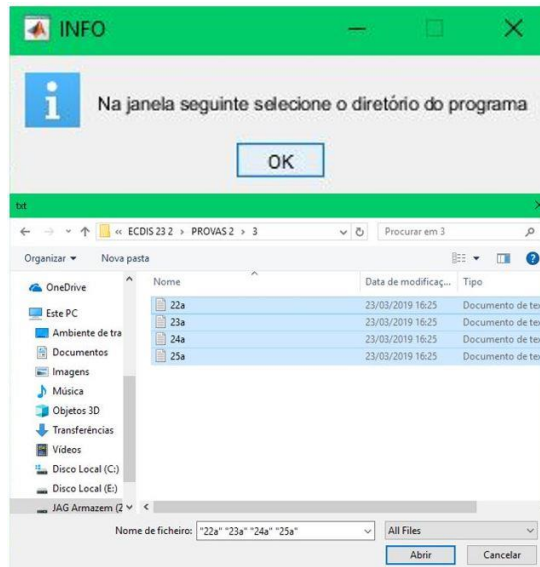


Figura 17 - Inserção de dados pelo utilizador

No ponto cinco é feita uma pequena avaliação dos ficheiros de texto, para apurar se contêm os campos necessários à simulação.

Seguidamente, todos os dados necessários são guardados no ficheiro *VariableGetData.mat*.

No ponto sete é onde é feita a leitura automática dos ficheiros, segundo a codificação já explicada no subcapítulo anterior. Os ficheiros, por terem uma formatação pré-definida são de fácil leitura.

Para fazer importação dos dados é utilizada a função *importdata*. Para divisão de campos usada a função *contains*. Para divisão dos dados dentro de cada campo, utilizada a função *strsplit*.

Seguidamente os dados tratados são guardados no ficheiro *DataTotal1.mat*.

No ponto oito dá-se o tratamento dos dados, ou seja, uniformização de vetores retirando o tempo de aproximação.

No ponto nove existe um processo de decisão por parte do utilizador, no qual se decidiu se a seleção do tipo de prova é feita automaticamente ou por sua decisão. No caso da escolha automática, é usado o subprocesso *TipoDeProva.m*, (ponto 10 do fluxograma).

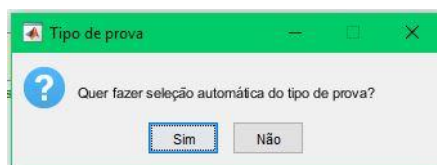


Figura 18 - Seleção automática de prova

Neste subprocesso a avaliação é feita com base nos ângulos de leme. Usa-se a função *findpeaks* e a média e moda do leme para decisão automática.

No caso de ser decidido pelo utilizador não efetuar a seleção automática, é aberta uma janela para inserção manual do tipo de prova, representado no ponto 11.

No ponto 12 dá-se o estudo de parâmetros, também definidos para o caso apresentado no subcapítulo 3.3 e a criação dos gráficos dependendo do tipo de prova.

Neste estudo, a correlação de dados para a prova de ZigZag é efetuada através de igualar temporalmente a 2ª alteração de leme com a proa afastada 10º ou 20º relativamente à proa inicial, conforme a prova for ZigZag 10/10 ou 20/20.

Relativamente à prova de espiral, é efetuada igualando temporalmente a 1ª alteração do leme com, aproximadamente, o início de alteração da proa do navio.

Estas aproximações não são exatas, mas demonstraram estar relativamente bem ajustadas ao que é suposto obter neste tipo de provas, por definição, e como tal considera-se uma boa aproximação.

Relativamente à prova de curva de giração os valores reais são ajustados para tentar minimizar o efeito das forças externas, como vento e ondulação. Para tal é calculado um vetor, caracterizado por distância e azimute, entre o ponto de início de guinada, representado na figura 19 por "1ª volta", e o ponto de começo da segunda volta, representado na figura 19 por "2ª volta". Este vetor é retirado aos pontos de avanço máximo e de afastamento lateral máximo. Foi efetuada

esta correção porque sem o efeito de forças externas os pontos referidos deveriam ser coincidentes, como representado na figura 12.

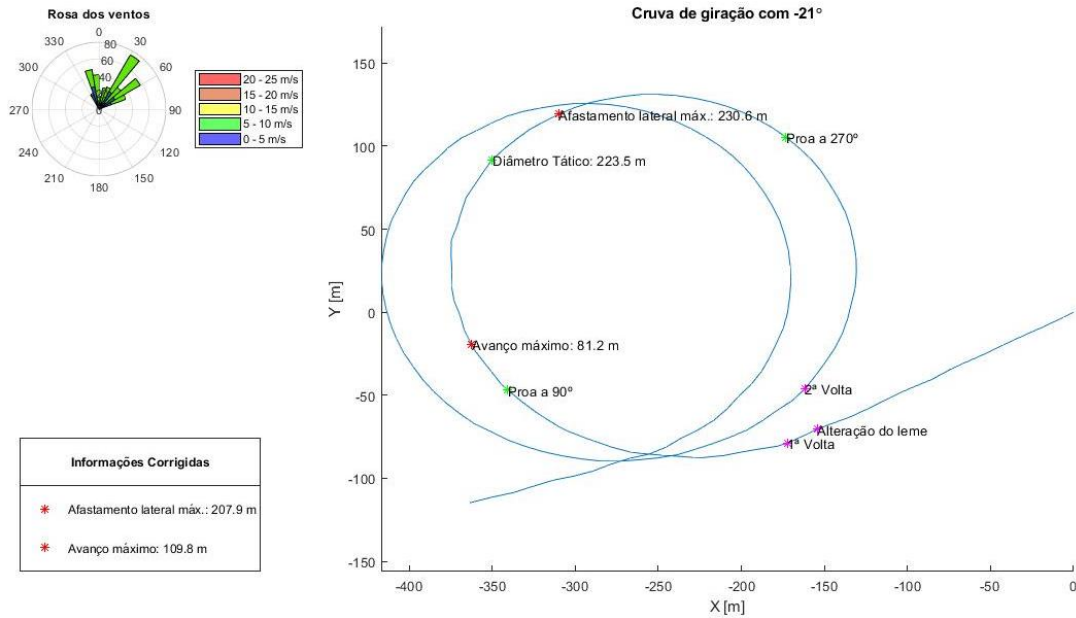


Figura 19 – Gráfico de curva de giração real

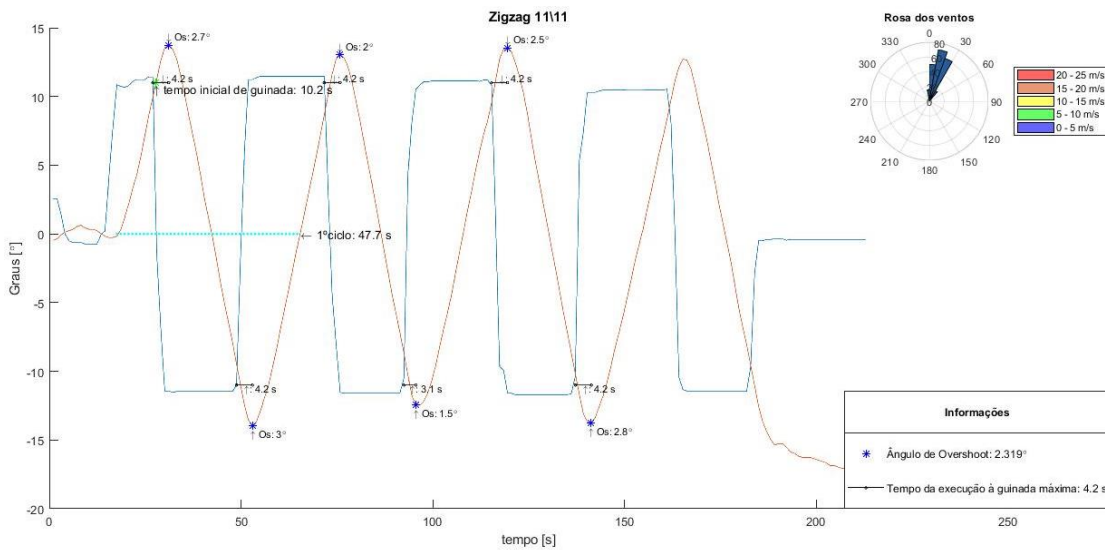


Figura 20 – Gráfico da prova de ZigZag real

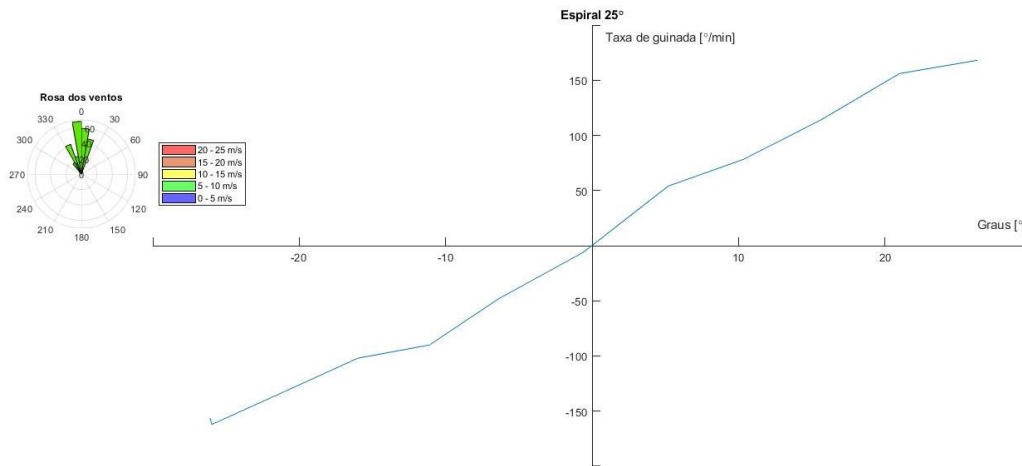


Figura 21 - Gráfico da prova de espiral real

Finalmente no ponto 13 as figuras criadas são guardadas, com data e hora, no diretório escolhido inicialmente pelo utilizador.



## 5 Resultados

Para comparação dos resultados foram utilizados os valores do caderno de elementos evolutivos do IH, de provas efetuadas em outubro de 2016, nas quais apenas foram realizadas curvas de giração. Como tal serão comparadas apenas este tipo de provas.

As colunas corrigidas das provas de 2019 são os valores do programa para aproximação de uma curva de giração real, sem efeitos externos, como explicado no capítulo 4.2.

As colunas com sombreado cinzento na tabela 3 são valores não utilizados no cálculo do erro.

Tabela 3 - Valores reais de provas de manobrabilidade

	Curva de Giração - 2016			
	Diâmetro tático		Avanço Máximo	
	Normal	Corrigido	Normal	Corrigido (*)
20° BB	242 m	-	193 m	116 m
20° EB	227 m	-	207 m	117 m
10° BB	512 m	-	350 m	233 m
10° EB	506 m	-	318 m	171 m
	Curva de Giração - 2019			
	Diâmetro tático		Avanço Máximo	
	Normal	Corrigido	Normal	Corrigido
21° BB	220,4 m	231,2 m	94,9 m	73,7 m
21° EB	230,6 m	207,9 m	81,2 m	109,8 m
11° BB	406 m	445,4 m	191,1 m	147,2 m
12° EB	389,8 m	418,9 m	175,2 m	231,6 m

\* Valores relativos ao início de guinada, para comparar com os do programa em MATLAB®

Foram obtidos os seguintes valores de erro:

Tabela 4 - Valores de erro para provas reais de curvas de giração

	Curva de Giração – Erro (%)			
	Diâmetro tático		Avanço Máximo	
	Normal	Corrigido	Normal	Corrigido
21° BB	8,9	4,5	18,2	36,5
21° EB	1,6	8,4	30,6	6,2
11° BB	20,7	13	18	36,8
12° EB	23	17,2	2,5	35,4

A tabela apresenta um erro total relativo de 18%, de salientar a maior alteração no avanço para as curvas de 21°, e a maior alteração de diâmetro tático para as curvas de menor ângulo.

As diferenças ocorridas poderão ser devidas principalmente as condições de carga diferenciadas em cada uma das situações, nas provas realizadas em 2016 o navio dispunha de 9% menos de deslocamento do que as realizadas a sul da madeira, em 2019, para teste do programa.

Outra razão para a diferença poderão ser as condições atmosféricas, nas provas de 2016 o vento foi maioritariamente dos setores sul com força 2, nas provas realizadas em 2019 o vento foi maioritariamente dos setores oeste e oeste-sudoeste com força entre 2 e 3. Difere das figuras mostradas anteriormente por estar representado o vento relativo.

Relativamente à corrente e ondulação não se verificou grande influência, visto ter sido medida e apresentou valores inferiores a 1 nó para a corrente e 0,5 m para a ondulação.

Existe ainda a possibilidade de alterações estruturais ao longo dos 3 anos que o tenha feito alterar a sua capacidade de manobrabilidade, que no caso de veracidade, justifica a necessidade, como referido anteriormente, de possuir sempre os dados mais atualizados dos elementos evolutivos do navio.

No programa realizado em MATLAB®, os valores dos ângulos dos lemes são retirados do sistema de gestão da plataforma do navio, o que leva em erros na correlação de dados de ambos os sistemas, rede NMEA e SGP. Como tal os valores utilizados para estudo da curva de giração são relativos ao início de guiada e não relativos à alteração do leme. Não correspondendo assim à definição de avanço definida pela IMO.

Relativamente aos valores obtidos por simulação matemática, foram utilizados os valores da sua construção, onde se dispunha de todos os dados necessários.

Os dados alterados para corresponder as provas efetuadas em 2016 e 2019 foram os calados do navio, o deslocamento e o *KRudd*, valor de correção

para aproximação dos dados de provas reais. Este último parâmetro foi alterado para obter o menor erro possível na simulação.

Assim foram efetuadas oito simulações, quatro para comparativo com as provas de 2016 e outras quatro para confrontação com as provas de 2019.

Para as provas de 2016 o *KRudd*, usado em simulação, que melhor descreveu as curvas reais foi de 0,6 ou 0,7, obtendo erros médios de 14% e 17%, respetivamente. Sendo de salientar que as curvas de maior grau, 20°, têm um erro menor em comparação com as curvas de 10°, respetivamente, um erro de 9% e 22%.

Para as provas de 2019 os valores obtidos por simulação foram relativamente piores, obtendo um erro médio de cerca de 17% e 19% para *KRudd* de 0,5 e 0,6, respetivamente, sendo que o que melhor caracteriza tanto as curvas de maior grau como as de menor grau é o último. As restantes elações retiradas no paragrafo anterior continuam a ser validas neste estudo.

Nestas provas foi ainda efetuado um estudo, relativamente aos valores com a correção de fatores externos, como explicado anteriormente, obtendo um aumento de aproximadamente 4%, logo, a correção não será a mais adequada, sendo preferível os valores originais.

Relativamente às provas de ZigZag e espiral, foi realizado um comparativo entre os dados reais obtidos e uma simulação efetuada. A percentagem de erro foi elevada, com resultado de cerca de 60%, presumivelmente devido ao simulador da máquina do leme ser construído para navios mercantes, assim como os coeficientes hidrodinâmicos calculados. Como referido anteriormente, esses navios possuem baixa capacidade de manobrabilidade, o que aplicado equivalentemente a um navio de guerra, faz aumentar em muito o tempo e distância aquando de uma alteração de leme e como as provas referidas alteram muitas vezes o leme num curto espaço de tempo, os valores de erro tendem a aumentar.

Isto concluído, porque nas provas de giração não se verifica o mesmo, uma vez que só é efetuada uma mudança de leme e depois é mantido os ângulos introduzidos durante toda a simulação.



## Conclusão

Atualmente a tecnologia desenvolve-se de forma acelerada. Tal deverá também ser aproveitado no desenvolvimento de novas ferramentas em prol da segurança marítima, face a um grande aumento de tráfego que responde à procura do transporte marítimo a que também deve corresponder aumento da ação reguladora e fiscalizadora, que inclui as marinhas de guerra.

Esse aumento de tráfego e o interesse crescente no prolongamento da posse dos navios, reflete-se no aumento das suas idades médias e tendência para baixa priorização das atividades de atualização dos seus elementos evolutivos.

Isto porque a sua verificação resulta de processos complicados e dispendiosos.

Por isso, neste trabalho, propôs-se desenvolver formas mais expeditas e de fácil uso pela própria equipa de navegação para a obtenção dos valores de provas de manobrabilidade, que permitam obter dados atualizados de desempenho, tanto através de obtenção de dados reais transformados em resultados eficazes, como em ambiente simulado, pois, a utilização de simuladores é uma forma facilitada e relativamente eficaz de perceber a manobrabilidade do navio em diversas situações, como o espaço para efetuar manobras, tempo para parar e tempo e velocidade para desviar de um obstáculo, entre outros.

Concluiu-se a criação de dois programas. O primeiro possuindo equações matemáticas que pretendem descrever o comportamento de um navio. O segundo, um programa que recorrendo aos dados disponíveis dos sensores do mesmo navio, permite que possam ser utilizados de forma expedita para efetuar provas de manobrabilidade e retirar os parâmetros relevantes das mesmas.

Este último, efetua o tratamento de dados disponíveis, para calcular as condições atualizadas de manobrabilidade do navio.

Entende-se assim, que os objetivos da investigação foram alcançados.

Enfrentaram-se dificuldades, designadamente o ajustamento de datas para efetuar provas de manobrabilidade, relativamente ao plano operacional dos

navios, a recolha de dados no navio, pois o *log* produzido no *Wcom2 – Test Terminal* zerava ao fim de poucos minutos, tendo sido só descoberto durante as provas que para guardar todos os dados das provas era necessário realizar um *log* direto para um ficheiro *TXT*, e a correlação entre os dados do SGP e da rede NMEA, onde não se obteve dados sincronizados entre as diversas provas, mesmo efetuando uma correção temporal.

Assim em face destas conclusões, deixam-se como sugestão para futuros trabalhos, otimização do sistema de recolha de dados para, de forma precisa, correlacionar os dados do SGP e da rede NMEA, e desta forma do tratamento de dados para corresponder com os critérios internacionais, nomeadamente no diâmetro tático e avanço, ser efetuado relativo à alteração do leme; Otimização do simulador, nomeadamente da máquina do leme, para corresponder a navios de alta capacidade de manobrabilidade, porque alguns resultados, como as simulações das provas de ZigZag e espiral, apresentaram ainda alguma margem de erro relativamente elevada. Contudo, provou-se que o sistema funciona, necessitando de alguma melhoria.

Deste modo, o sistema de recolha de dados contruído, embora com erros associados, como descritos no capítulo 5, poderá ser implementado para obtenção de características de manobrabilidade atualizadas, de forma não definitiva e doutrinária, mas como uma forma de auxílio às equipas de navegação.

O desenvolvimento de tecnologia com base neste trabalho de investigação, que permita uma certa normalidade deste tipo de resultado de provas a obter regularmente e até, em hipótese, ser a base de desenvolvimento de tecnologia a introduzir nos navios, que pelo demonstrado na investigação não se vislumbra de concretização difícil, e permita aos oficiais responsáveis pelos mesmos efetuar de forma automática os testes de manobrabilidade, sem necessidade de recurso a entidades exteriores, mantendo sempre resultados atualizados de desempenho.

## Bibliografia

ABDEL-LATIF, S., ABDEL-GELIEL, M., & ELDIN ZAKZOUK, E. (2013, Junho 25). *Simulation of ship maneuvering behavior based on the modular mathematical model*. Apresentado na 21st Mediterranean Conference on control and automation, Grécia.

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING. (2006a). *ABS – Guide for vessel manoeuvrability*. Houston.

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING. (2006b). *Guide for vessel manoeuvrability*. Houston.

ANISH. (2013, Dezembro 3). 10 Points to ensure safe and smooth sea trials of ships. Obtido 31 de Agosto de 2018, de Marine Insight website: <https://www.marineinsight.com/guidelines/10-points-to-ensure-safe-and-smooth-sea-trials-of-ships/>

APRI, M., BANAGAAY, N., VAN DEN BERG, J. B., BRUSSEE, R., BOURNE, D., FATIMA, T., ... RADERNACHER, J. (sem data). Analysis of a model for ship manoeuvring. Em *Proceedings of the 79th European study group mathematics with industry* (pp. 83–116).

ASSIS, V. E. S. (2013). *Manobrabilidade do navio*. Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, Rio de Janeiro.

ASSOCIATED PRESS. (sem data). The Navy's newest stealthy destroyer is cutting sea trials short due to equipment failure. Obtido 31 de Agosto de 2018, de Business Insider website: <https://www.businessinsider.com/uss-michael-monsoorzumwalt-destroyer-ending-sea-trials-2017-12>

Autoridade da mobilidade e dos transportes. (sem data). *O tráfego marítimo de mercadorias no contexto da intermodalidade 2017*. Obtido de <https://www.amt->

[autoridade.pt/media/1783/transporte\\_maritimo\\_mercadorias\\_contexto\\_intermodalidade\\_2017.pdf](http://autoridade.pt/media/1783/transporte_maritimo_mercadorias_contexto_intermodalidade_2017.pdf)

BARR, R. A. (1993). A review and comparison of ship manoeuvring simulation methods. *Centennial Meeting*. Apresentado na SNAME, New York.

CHAKRABORTY, S. (2017, Outubro 9). How does a rudder help in turning a ship? Obtido 21 de Janeiro de 2019, de Marine Insight website: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/rudder-ship-turning/>

CHUN-KI, L., & SAM-GOO, L. (2008). Investigation of ship manoeuvring with hydrodynamic effects between ship and bank. *Journal of Mechanical Science and Technology*, (22), 1230–1236.

CLAYTON, B. R., & BISHOP, R. E. D. (1982). *Mechanics of marine vehicles* (2ª). London: E. & F. N. Spon Ltd.

DELTA MARINE SERVICES. (sem data). Haul out & Seat trials. Obtido 31 de Agosto de 2018, de Delta Marine Service website: <https://www.delta-marine.com/services/haul-out-sea-trials/>

DIÁRIO DE NOTÍCIAS. (2018, Outubro 23). Descoberto o barco naufragado mais antigo do mundo [Notícias]. Obtido 25 de Janeiro de 2019, de Diário de Notícias website: <https://www.dn.pt/vida-e-futuro/interior/descoberto-no-fundo-do-mar-barco-mais-antigo-do-mundo-10072395.html>

EMSA. (2018). *Annual overview of marine casualties and incidents 2018*. Obtido de <http://www.emsa.europa.eu/emsa-documents/latest/item/3406-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2018.html>

ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA. (sem data). Clermont. Obtido 27 de Maio de 2019, de Encyclopedia Britannica website: <https://www.britannica.com/topic/Clermont-steamboat>

- EQUASIS. (2018). *The world merchant fleet in 2017 - Statistics from Equasis*. Obtido de <http://www.equasis.org/EquasisWeb/public/PublicStatistic?fs=About>
- ESTADO MAIOR DA ARMADA. (2012). *Disposições gerais e conceitos fundamentais da navegação - INA2*. Lisboa.
- EURONEWS. (2005, Junho 28). Reino Unido celebra os 200 anos da Batalha de Trafalgar. Obtido 19 de Dezembro de 2018, de euronews website: <https://pt.euronews.com/2005/06/28/reino-unido-celebra-os-200-anos-da-batalha-de-trafalgar>
- Explanatory notes to the interim standards for ship manoeuvrability.* , Pub. L. No. IMO Circular MSC/Circ. 644 (1994).
- EYRES, D. J., & BRUCE, G. J. (2012). *Ship construction (7ª)*. Waltham USA: Butterworth-Heinemann.
- FERREIRA, L. P. P. (sem data). *Melhoria das condições de manobra de navios no acesso a portos*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- FIGUEIREDO, R. A. (2011, Abril 2). Viajando pela História; Do navio à vela ao navio a vapor. Obtido 25 de Janeiro de 2019, de A.P.P. Associação dos Portos de Portugal website: <http://app.regiaoocentro.net/sartigo/index.php?x=4944>
- FOSSEN, T. I. (sem data). *A nonlinear unified state-space model for ship maneuvering and control in a seaway*.
- FUWA, T., & KASHIWADANI, T. (2007). Theory, Analysis, and Design Methodology for Ship Manoeuvrability. *SHIPS AND OFFSHORE STRUCTURES*, 2.
- GERMANISHER LLOYD SE. (2012). *Rules for classification and construction, Additional ruler and guidelines*. Hamburg.
- GHOSH, S. (2017, Setembro 30). Understanding different types of manoeuvres of a vessel. Obtido 18 de Setembro de 2018, de Marineinsight.com website:

<https://www.marineinsight.com/naval-architecture/different-types-of-ma-noeuvres-of-a-vessel/>

GHOSH, S. (2018, 2017). Understanding design of ship propeller. Obtido 21 de Janeiro de 2019, de Marine Insight website: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/design-of-ship-propeller/>

GUEDES SOARES, C., SUTULO, S., FRANCISCO, R. A., MOREIRA, L., & LARANJINHA, M. (2002). Ensaios de manobrabilidade em lanchas e corvetas. *O Mar Fonte de Desenvolvimento sustentado*, 251–270.

HALL, J. R. (2017, Novembro 2). Dionysius the Phocaeen - An Archaic pirate. *Ancient World Magazine*. Obtido de <https://www.ancientworldmagazine.com/articles/dionysius-phocaeen-archaic-pirate/>

HART, C. (2000). Measurements during SWATH ship sea trials. *IEEE Instrumentation Measurement Magazine*, 3(3), 38–43. <https://doi.org/10.1109/5289.863910>

HIRANO, M., TAKASHINA, J., FUKUSHIMA, M., & MORIYA, S. (sem data). *A computer program system for ship maneuvering motion prediction*.

HMY YACHTS. (sem data). A timeline of ships, boats and yachts. Obtido 22 de Dezembro de 2018, de <https://www.hmy.com/a-timeline-of-ships-boats-and-yachts>

*Interim Standards for ship manoeuvrability*. , Pub. L. No. IMO resolution A.751 (1993).

INTERNATIONAL TOWING TANK CONFERENCE. (2002). *Recommended procedures and guidelines; Full scale measurements manoeuvrability, full scale manoeuvring trials*.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. (sem data). business.un.org. Obtido 12 de Janeiro de 2019, de <https://business.un.org/en/entities/13>

- JÚNIOR, E. S. C. (2014). *Modelação-hidrodinâmica de um navio em um simulador através de um modelo empírico* (Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica). Obtido de <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/mono-poli10011960.pdf>
- KARAN, C. (2011, Agosto 3). The history of ships: Ancient maritime world. Obtido 22 de Dezembro de 2018, de Marine Insight website: <https://www.marineinsight.com/maritime-history/the-history-of-ships-ancient-maritime-world/>
- KIDCYBER. (sem data). Ships and boats: A timeline. Obtido 22 de Dezembro de 2018, de kidcyber website: <http://www.kidcyber.com.au/ships-and-boats-timeline/>
- KYO, M., HIYAZAKI, E., TSUKIOKA, S., OCHI, H., AMITANI, Y., TSUCHIYA, T., ... TAKAGAWA, S. (1995). The sea trial of «KAIKO», the full ocean depth research ROV. *OCEANS '95 MTS/IEEE «Challenges of Our Changing Global Environment»*. *Conference Proceedings, 3*, 1991–1996 vol.3. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1995.528882>
- LAWLER, A. (2002). Report of oldest boathints at early trade routes. *Science*, 296(5574), 1791–1792. <https://doi.org/10.1126/science.296.5574.1791>
- LEWIS, V. E., & O'BRIEN, R. (1965). *Ships*. Canadá: Time Inc.
- LIN, B. (2006). Behavior of ship officers in maneuvering to prevent a collision. *Journal of Marine Science and Technology*, 14(4), 225–230.
- MANOBRAS PADRONIZADAS. (sem data). Manobras padronizadas. Obtido 25 de Abril de 2018, de Índice de Giro - Engenharia Naval e Oceânica - UFRJ website: [http://www.deno.oceanica.ufrj.br/deno/prod\\_academic/relatorios/2006-/RicardoGoreski/relat2/Relatorio02\\_arquivos/indice\\_arquivos/Dinamica%2011%2012.pdf](http://www.deno.oceanica.ufrj.br/deno/prod_academic/relatorios/2006-/RicardoGoreski/relat2/Relatorio02_arquivos/indice_arquivos/Dinamica%2011%2012.pdf)

- MARTINS, paulo T., & LOBO, V. (sem data-a). *Determinação de parâmetros de comportamento de navios utilizando redes neuronais*. Obtido de [http://www.no-vaims.unl.pt/docentes/vlobo/Publicacoes/3\\_11\\_raios\\_giracao.pdf](http://www.no-vaims.unl.pt/docentes/vlobo/Publicacoes/3_11_raios_giracao.pdf)
- MARTINS, paulo T., & LOBO, V. (sem data-b). Estimating maneuvering and sea-keeping characteristics with neural networks. *IEEE*.
- MARTINS, A. M., & COBO, G. E. (2004). Los periplos de Eudoxo de Cízico en la Mauritania Atlántica. *Researchgate*, 22(1), 215–233.
- MOREIRA GUERREIRO, C. (2018, Julho 13). As provas de mar do NRP SINES [Revista da Marinha]. Obtido 31 de Agosto de 2018, de <https://revistademarinha.com/provas-de-mar/>
- MORENO, C. A. S. (2010). *Interferência hidrodinâmica no comportamento em ondas entre navios com velocidade de avanço* (Universidade Federal do Rio de Janeiro -). Obtido de [http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe\\_d/CesarAugustoSalhuaMoreno.pdf](http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_d/CesarAugustoSalhuaMoreno.pdf)
- NPTELHRD. (2008). *Lecture - 37 Ship Trials and Manoeuvres - I*. Obtido de <https://www.youtube.com/watch?v=R7TjMnFgsnI>
- ONLINE EDITORA. (2016). *Guia história: Navio* (5ª). Obtido de <https://books.google.pt/books?id=xA1HDQAAQBAJ&pg=PA7&dq=Pesse+canoa&hl=pt-PT&sa=X&ved=0ahUKEwjDmaDLm4rgAhUC2OAKHTIwArYQ6AEIKDAA#v=one-page&q&f=false>
- ORGANIZAÇÃO MARÍTIMA INTERNACIONAL. (2007). *Regulamento internacional para evitar abalroamentos no mar - 1972* (7ª Ed.). Lisboa: Instituto Hidrográfico.
- PIRES DA SILVA, P. (2017, Fevereiro). *Arquitetura Naval*. Apresentado na Escola Naval. Escola Naval.

- PIRES DA SILVA, P., & GUEDES SOARES, C. (2016). Uncertainty modelling in ship manoeuvring models. Em *Maritime Technology and Engineering III* (pp. 361–369). Lisboa.
- PRECEDEN. (sem data). History of ships and boats timeline. Obtido 22 de Dezembro de 2018, de <https://www.preceden.com/timelines/303714-history-of-ships-and-boats>
- PS Comet - Graces Guide. (sem data). Obtido 27 de Maio de 2019, de [https://www.gracesguide.co.uk/PS\\_Comet](https://www.gracesguide.co.uk/PS_Comet)
- RAYTHEON ANSCHÜTZ. (sem data). A Pioneer in Navigation Technology. Obtido 27 de Maio de 2019, de <https://www.raytheon-anschutz.com/company/history/>
- REUTERS. (2018, Maio 13). China's first home-built carrier sets out for sea trials. *Reuters*. Obtido de <https://af.reuters.com/article/worldNews/idAFKCN1IE020>
- RODRIGUES, S. R. A. (2010). *Movimento de navios em manobra induzidos pela agitação marítima* (Universidade de Aveiro). Obtido de <https://ria.ua.pt/bitstream/10773/7366/1/238298.pdf>
- SCARAMELO, V. A. S. (2017). *Diferenciação entre modelos matemáticos hidrodinâmicos e a inclusão do efeito de águas rasas* (Universidade Federal do Rio de Janeiro - Escola Politécnica). Obtido de <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10021158.pdf>
- SEA SHARP MARINE SERVICES. (sem data). Sea-Trials. Obtido 31 de Agosto de 2018, de <http://www.seasharpmarine.ca/Sea-Trials.html>
- SKEJIC, R. (2013). Ships maneuvering simulations in a seaway - How close are we to reality? *International workshop on next generation nautical traffic models*.
- SKJETNE, R. (2003). Ship manoeuvring: The past, the present and the future. *Sea Technology*, 44, 33–37.

- SPERRY MARINE. (sem data). History of Sperry Marine. Obtido 27 de Maio de 2019, de <http://www.sperrymarine.com/corporate-history/sperry-marine>
- SUTULO, S. (2013). *Basics of ship manoeuvrability*. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- SUTULO, S., & GUEDES SOARES, C. (2011). Mathematical models for simulation of manoeuvring performance of ships. Em *Marine Technology and Engineering* (pp. 661–698). London: Taylor & Francis Group.
- SUTULO, S., & GUEDES SOARES, C. (2014). An algorithm for offline identification of ship manoeuvring mathematical models from free-running tests. Em *Ocean Engineering* (Vol. 79, pp. 10–25).
- SUTULO, S., & GUEDES SOARES, C. (2016). Development of a multi-factor regression model of ship maneuvering forces based on optimized captive-model tests. *Journal of Ship Research*, 50(4), 311–333.
- SUTULO, S., & KIM, S.-Y. (1998). *Systematic approach to PMM/Rotating arm experiment planning*. 57–67. Val de Reuil, France.
- THORNHILL, E. (2013). *Trials plan: Post HCM/FELEX first class standardization and manoeuvring/controllability trials on HMCS Calgary*. Defense R&D Canadá - Atlantic.
- UNCTAD. (2018). *Review of maritime transport 2018*. Obtido de [https://unctad.org/en/Pages/Publications/Review-of-Maritime-Transport-\(Series\).aspx](https://unctad.org/en/Pages/Publications/Review-of-Maritime-Transport-(Series).aspx)
- UNITED NATIONS. (1982, Dezembro 10). *United Nations treaties chapter XXI: 6. Convention on the law of the sea. 21*. Obtido de [https://treaties.un.org/Pages/ViewDetailsIII.aspx?src=TREATY&mtdsg\\_no=XXI-6&chapter=21&Temp=mtdsg3&clang=en](https://treaties.un.org/Pages/ViewDetailsIII.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXI-6&chapter=21&Temp=mtdsg3&clang=en)

WARTSILA ENCYCLOPÉDIA. (sem data). Archimedes, Principle and ship equilibrium. Obtido 20 de Janeiro de 2019, de <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/archimedes-principle-and-ship-equilibrium>

WEST, R. (2016). *ECPINS 6.2 - Technician's Guide*. North America: OSI Maritime Systems Ltd.

WOODFORD, C. (2018, Dezembro 17). Ships and boats. Obtido 20 de Janeiro de 2019, de Explain that Stuff website: <http://www.explainthatstuff.com/how-ships-work.html>

WORLD TRADE ORGANIZATION. (2018). *World trade statistical review 2018*. Obtido de [https://www.wto.org/english/res\\_e/statistics\\_e/wts\\_e.htm](https://www.wto.org/english/res_e/statistics_e/wts_e.htm)

YASUKAWA, H., & YOSHIMURA, Y. (2015). Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions. *1, 20*, 37–52.

YOON, H. K., & RHEE, K. P. (2003). Identification of hydrodynamics coefficients in ship manoeuvring equations of motion by Estimation-Before-Modelling technique. *Ocean Engineering, 30*(18), 2379–2404.



## Apêndice A. Parâmetros do navio usados na simulação

### A.1. Dados gerais do navio

$\rho$	<p>Massa específica da água,  <math>\left(\frac{kg}{m^3}\right)</math>.</p> <p><math>\rho = 1025</math></p> <p>*valor utilizado para fim de simulação</p>
$g$	<p>Aceleração da gravidade, <math>\left(\frac{m}{s^2}\right)</math>.</p> <p><math>g = 9.81</math></p> <p>*valor utilizado para fim de simulação</p>
$L = L_{pp}$	<p>Comprimento entre perpendiculares, <math>(m)</math>.</p>
$B$	<p>Boca, <math>(m)</math>.</p>
$Disp$	<p>Deslocamento, <math>(ton)</math>.</p>
$T_{ap}$	<p>Calado na popa, <math>(m)</math>.</p>
$T_{fp}$	<p>Calado na proa, <math>(m)</math>.</p>
$trim$	<p>Caimento, positivo se tiver caimento para a popa, <math>(m)</math>.</p> <p><math>trim = T_{ap} - T_{fp}</math></p>
$LCG$	<p>Centro de gravidade longitudinal, <math>(m)</math>.</p>

$KG$	Centro de gravidade, contado a partir da quilha, ( $m$ ).
$VCB$	Centro de flutuação vertical, ( $m$ ).
$KMT$	Altura do metacentro transversal, ( $m$ ).
$GM$	Distância do centro de gravidade ao metacentro, ( $m$ ).
$T_{mean}$	Calado médio, $m$ . $T_{mean} = \frac{T_{ap} - T_{fp}}{2}$
$\tau$ ( $\tau$ )	Caimento relativo. $\tau = \frac{trim}{T_{mean}}$
$VCG$	Centro de gravidade vertical, ( $m$ ).

## A.2. Dados calculados com informações iniciais

$Cx$	Localização longitudinal do meio navio, ( $m$ ). $Cx = \frac{L}{2}$
$Cy$	Localização relativa à linha central longitudinal, ( $m$ ).

	Por norma é zero.
$C_z$	Localização vertical a partir da quilha, ( $m$ ). Por norma é igual ao calado médio.
$M$	Massa do navio, igual ao deslocamento, ( $ton$ ).
$x_g$	Abcissa do centro de massa, ( $m$ ).
$z_g$	Altura do centro de massa, ( $m$ ).
$C_B$	Coefficiente de finura total. $C_B = \frac{Disp}{L B T}$
$I_{ZZ}$	Momento de inércia na guinada, ( $Kg m^2$ ). $I_{ZZ} = 0.0625 M L_{pp}^2$

### A.3. Dados do leme e propulsão

$V_{max\_D\_Gt\_Kts}$	Velocidade máxima do navio em nós. Este parâmetro estudado com motores diesel e turbinas a gás.
-----------------------	--

$V_{max\_D\_Kts}$	<p>Velocidade máxima do navio em nós.</p> <p>Este parâmetro estudado com motores diesel.</p>
$V_{kts}$	<p>Velocidade nominal em nós. Será usada na simulação e como tal é introduzida pelo utilizador, para poderem ser feitas várias simulações a diferentes velocidades.</p>
$V$	<p>Velocidade nominal em <math>(\frac{m}{s})</math>.</p>
$Fn$	<p>Número de Froude, é utilizado em objetos que operem na interface ar/água. Relaciona a força da gravidade com a perturbação das ondas do mar e as forças de inércia.</p> $Fn = \frac{V}{\sqrt{g L}}$
$rpm$	<p>Rotação nominal do veio, (<math>rps</math>).</p>
$tp$	<p>Coefficiente de impulso. Por estudo <math>tp = 0.05</math>.</p>
$wp$	<p>Coefficiente de esteira. Por estudo <math>wp = 0.115</math>.</p>

#### A.4. Dados específicos da hélice

$Dp$	Diâmetro da hélice, (m).
$BSA$	Área da superfície das pás, ( $m^2$ ).
$NB$	Número de pás.
$AreaP$	Área total das pás, ( $m^2$ ). $AreaP = BSA NB$
$Ap$	Área do disco, ( $m^2$ ). $Ap = \pi \frac{Dp^2}{4}$
$BAR$	Rácio da área das pás. $BAR = \frac{AreaP}{Ap}$

#### A.5. Dados específicos do leme

$AR_{mm2}$	Área do leme, $mm^2$ .
$AR_{mm2\_2}$	Área do leme central, $mm^2$ .
$AR$	Área total equivalente dos três lemes, $m^2$ . $AR = 2 AR_{mm2} + AR_{mm2\_2}$ $AR = \frac{AR}{1000000}$

$KRudd$	<p>Fator de correção, retirado de provas reais do navio. Utilizado para aproximar as provas simuladas às reais.</p> $AR = AR KRudd$
$hR$	<p>Parâmetros das alturas dos lemes em <math>mm^2</math> e <math>m^2</math>.</p>
$kR$	<p>Rácio de aspeto.</p> $kR = \frac{hR^2}{AR}$ <p>E depois é corrigido para ser aproximado às provas reais. Normalmente por,</p> $kR = kR 0.954$

## Apêndice B. Fichas de controlo de provas de manobrabilidade

### B.1. Ficha de cabeçalho geral

Provas de mar

Ficha de controlo

Código de verificação da prova: \_\_\_\_\_

Data: \_\_\_\_\_ Período (Manhã/Tarde): \_\_\_\_\_

Parte inicial	Parte Final
<p>1) Verificação de Equipamento: HyperTerminal:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> COM 3 (GGA)</li> <li><input type="checkbox"/> COM 6 (DPT)</li> <li><input type="checkbox"/> COM 13 (MWV)</li> <li><input type="checkbox"/> COM 14 (ROT)</li> </ul> <p><input type="checkbox"/> ECDIS</p> <p>Sensores SGP:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Leme BB</li> <li><input type="checkbox"/> Leme central</li> <li><input type="checkbox"/> Leme EB</li> <li><input type="checkbox"/> Veio de BB</li> <li><input type="checkbox"/> Veio de EB</li> </ul> <p>2) Verificação de condições atmosféricas: Estado do mar (Escala de Beaufort): _____ Vento (Direção/velocidade): _____ Ondulação (Altura): _____ Profundidade: _____</p> <p>3) <input type="checkbox"/> Contactos (Verificar zona safa)</p> <p>4) Características do navio:  Calado AV: _____</p>	<p>1) Guardar ficheiros</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> COM 3</li> <li><input type="checkbox"/> COM 6</li> <li><input type="checkbox"/> COM 13</li> <li><input type="checkbox"/> COM 14</li> <li><input type="checkbox"/> SGP</li> <li><input type="checkbox"/> Printscreen ECDIS</li> </ul> <p>2) Nome da pasta dos ficheiros: _____</p> <p>3) Nome dos ficheiros: _____ _____ _____ _____ _____ _____ _____ _____</p>

Calado AR: _____ Deslocamento: _____  5) Posição GPS: _____  6) Hora de início da série: _____	
--	--

Nota: Verificação das  com um ✓

## B.2. Ficha de curvas de giração

### Provas de mar

#### Ficha de controlo – Curva de Giração

Código de verificação da prova: \_\_\_\_\_

Data: \_\_\_\_\_

- 1) Hora de início de série: \_\_\_\_\_
- 2) Navio estável em Rumo | Velocidade: \_\_\_\_\_ | \_\_\_\_\_  
Hora/Tempo cronometrado: \_\_\_\_\_
- 3) Hora/Tempo cronometrado de passagem:  
360°: \_\_\_\_\_  
720°: \_\_\_\_\_
- 4) Hora/Tempo cronometrado de leme a meio: \_\_\_\_\_
- 5) Hora quando a taxa de guinada = 0: \_\_\_\_\_
- 6) Hora de fim de série: \_\_\_\_\_

### B.3. Ficha de provas de ZigZag

#### Provas de mar

#### Ficha de controlo – ZigZag 10/10

Código de verificação da prova: \_\_\_\_\_

Data: \_\_\_\_\_

7) Hora de início de série: \_\_\_\_\_

8) Navio estável em Rumo | Velocidade: \_\_\_\_\_ | \_\_\_\_\_

Hora/Tempo cronometrado: \_\_\_\_\_

Parte 1	Hora/Tempo cronometrado:
<input type="checkbox"/> 10° EB (AUX: _____)	_____
<input type="checkbox"/> 10° BB (AUX: _____)	_____
Parte 2	
<input type="checkbox"/> 10° EB (AUX: _____)	_____
<input type="checkbox"/> 10° BB (AUX: _____)	_____
Parte 3	
<input type="checkbox"/> 10° EB (AUX: _____)	_____
<input type="checkbox"/> 10° BB (AUX: _____)	_____
Parte 4	
<input type="checkbox"/> 10° EB (AUX: _____)	_____
<input type="checkbox"/> 10° BB (AUX: _____)	_____

9) Hora/Tempo cronometrado da ordem leme a meio:

\_\_\_\_\_

10) Hora/Tempo cronometrado de paragem do navio:

\_\_\_\_\_

11) Hora de fim de série: \_\_\_\_\_

Nota: Dar a ordem após atingido o afastamento de 10°

#### B.4. Ficha de provas de Espiral

##### Provas de mar

##### Ficha de controlo – Espiral

Código de verificação da prova: \_\_\_\_\_

Data: \_\_\_\_\_

12) Hora de início de série: \_\_\_\_\_

13) Navio estável em Rumo | Velocidade: \_\_\_\_\_ | \_\_\_\_\_

Hora/Tempo cronometrado: \_\_\_\_\_

Ordens	Hora/Tempo cronometrado:
<input type="checkbox"/> 25° EB <input type="checkbox"/> Taxa de guinada constante	_____ _____
<input type="checkbox"/> 20° EB <input type="checkbox"/> Taxa de guinada constante	_____ _____
<input type="checkbox"/> 15° EB <input type="checkbox"/> Taxa de guinada constante	_____ _____
<input type="checkbox"/> 10° EB <input type="checkbox"/> Taxa de guinada constante	_____ _____
<input type="checkbox"/> 5° EB <input type="checkbox"/> Taxa de guinada constante	_____ _____
<input type="checkbox"/> Leme a meio <input type="checkbox"/> Taxa de guinada constante	_____ _____
<input type="checkbox"/> 5° BB <input type="checkbox"/> Taxa de guinada constante	_____ _____
<input type="checkbox"/> 10° BB <input type="checkbox"/> Taxa de guinada constante	_____ _____
<input type="checkbox"/> 15° BB <input type="checkbox"/> Taxa de guinada constante	_____ _____
<input type="checkbox"/> 20° BB <input type="checkbox"/> Taxa de guinada constante	_____ _____
<input type="checkbox"/> 25° BB	_____

<input type="checkbox"/> Taxa de guinada constante	_____
<input type="checkbox"/> 20° BB	_____
<input type="checkbox"/> Taxa de guinada constante	_____
<input type="checkbox"/> 15° BB	_____
<input type="checkbox"/> Taxa de guinada constante	_____
<input type="checkbox"/> 10° BB	_____
<input type="checkbox"/> Taxa de guinada constante	_____
<input type="checkbox"/> 5° BB	_____
<input type="checkbox"/> Taxa de guinada constante	_____
<input type="checkbox"/> Leme a meio	_____
<input type="checkbox"/> Taxa de guinada constante	_____
14) Hora/Tempo cronometrado de paragem do navio: _____	
15) Hora de fim de série: _____	

Nota: Dar a ordem após atingido o afastamento de 10°

## Apêndice C. algoritmo do simulador

### C.1. Programa base simulado

```
clear all;
close all;
clc;
%% Variáveis globais
% global variables
global ro
global xg Lpp B V T
global M Izz admass_11 admass_22 admass_26 admass_62 admass_66
global Xp
global Xuuprime Xvrprime Xddprime
global Yvprime Yrprime Ydprime
global Yvvvprime Yvvrprime Ydvvprime Yddvprime Ydddprime
global Nvprime Nrprime Ndprime
global Nvvvprime Nvvrprime Ndvvprime Nddvprime Ndddprime
global KRudd kR
global ts tapph
global deltat Tref Trefmax
global deltaR
global View2
global tProva
global dirP
% global tProva
% global ts_Aux
% global GrausLemeINI GrausLemeINI_Z2 GrausLemeINI_Z1
%DplanX DplanY RplanX RplanY DistLCGCrudder

%% Diretório base de trabalho
% Matlab root
respl=helpdlg('Na janela seguinte selecione o diretório do programa', 'INFO');
waitfor(respl);
%selpath = uigetdir(path,title)
selpath = uigetdir;
%pasta de trabalhado do matlab
cd(selpath);
%cd 'Z:\5° ano\3ª fase\4 estudo equações\Simulador AG 8'
status = mkdir('DocsProvas');
%dirP='Z:\5° ano\3ª fase\4 estudo equações\Simulador AG 8\DocsProvas';
dirP=[selpath, '\DocsProvas'];

%% Escolha do tipo de prova
% Type of proof selection
list = {'Curva de Giração (Turning Circle)', 'ZigZag', 'Espiral (Spiral)'};
[indx,tf] = listdlg('ListString',list,'SelectionMode','single',...
    'Name','Seleção da prova','ListSize',[250,150]);
%[width height]
%% Fazer circuito com tf cancel (valor logico 1 ou 0)
tProva=indx;

% 1) Criação do vetor de tempo e discriminação no tempo
% creation of vector of time and time discrimination
```

```

%y = linspace(x1,x2,n) generates n points.
%The spacing between the points is (x2-x1)/(n-1).
error=1;
while error==1
dados=inputdlg({'Introduza o tempo para a simulação em segundos: [s]
(Por definição: 200)'},...
'Introduza a discriminação para os resultados: (Por definição:
2) (Aumenta o tempo de processamento)'},...
'Tempo de simulação');
ts_Aux=str2num(cell2mat(dados(1)));
ts_Aux=round(ts_Aux);
desc=str2num(cell2mat(dados(2)));
desc=round(desc);
    if isempty(ts_Aux)==1
        ts_Aux=200;
        error=0;
    else if isnumeric(ts_Aux)==0
        resp1=warndlg('Repita a inserção das colunas','!! AVISO
!!');
        waitfor(resp1);
        error=1;
%90
plot(x90,y90,'g*')
text(x90,y90+5,'\downarrow Proa a 90°','Color','black','FontSize',10);
%% Gráfico Pullout
    else if tProva==4 %pullout
        tmn=tmn+1;

        end

    end

end
end
    vars = {'f','figure1','figureE1','figureE2','figureE3','fig-
ureE4',...
'figureE5','ax','axes1','frame_h','hWaitb','plot1','resp1',...
'figureZZ1','figureZZ2','figureZZ3',...
'figure2'};
clear(vars{:})
%% 10) Guardar todos os dados da simulação
% Save all simulation Data
close all;
filenameT=[dirP '\RunSim_2_workspace.mat'];
save(filenameT);
% % a1='resp1';
% % a2='plot1';
% % a3='frame_h';
% % a4='title_CH';
% % save(filenameT, '-regexp', '^?!(a1|a2|a3|a4)$');
%save('RunSim_2_workspace.mat');

% INP=[admass_22 admass_26 Yvprime Yrprime Ydprime admass_62 Izz ad-
mass_66 Nvprime Nrprime Ndprime Lpp B V tapph deltaStar Tref Trefmax];
% deltaStaraux=deltaStar*180/pi;
% fName1=['Z:\5° ano\3ª fase\4 estudo equações\Simulador AG 3\RS_CG'];
% fName2=['_deltaR_',num2str(deltaStaraux),'_time-
toap_',num2str(tapph),...
% '_date_',num2str(date)];

```

## C.2. Algoritmo dos coeficientes hidrodinâmico

```
% 1)Dados e Adimensionalização (Data and non dimensionalized parameters)
%Corre os dados do navio, DadosNavio.m (Run Ship data, an .m file)
DadosNavio
%Massa específica da água (water specific mass)
ro=1025; %[kg/m3]
%Massa do navio adimensionalizada (Non dimensionalized ship mass)
Mprime=M/(0.5*ro*Lpp^2*T);
%Izz adimensionalizado(Non dimensionalized Izz)
Izzprime=Izz/(0.5*ro*Lpp^5);
%comprimento adimensionalizado (Non dimensionalized LCG)
xgprime=xg/Lpp;
%Coeficientes de ajuste, assumido =1 para não interferir nos calculos
%Adjustment coefficients (all assumed equal to 1)
kxuu=1;kxvr=1;kxdd=1;ky0=1;kn0=1;kyv=1;kyr=1;knv=1;knr=1;kyd=1;knd=1;
kyvvv=1;knvvv=1;kyvvr=1;knvvr=1;kdvv=1;kndvv=1;kyddv=1;knddv=1;knddd=
1;
kyddd=1;
%Coeficiente relativamente ao duplo casco (Double-hull aspect ratio)
kH=2*T/Lpp;
%coeficiente empírico para massa adicionada
%(empirical coefficients for added mass correction)
k_11=0.25*kH;k_22=2*(T/B)*(1-0.5*(B/Lpp));k_66=2*(T/B)*(1-
1.6*(B/Lpp));
%Parametro de forma (Fullness Parameter)
CBL=CB*B/Lpp;
%Coeficientes de massa acrescentada devido à inercia do fluido
%Added mass coefficients for fluid inertia loading in dof i due dof j
...
%acceleration
admass_11=k_11*M; %[kg]
admass_22=k_22*M; %[kg]
admass_26=admass_22*xg; %[kg.m]
admass_62=admass_22*xg; %[kg.m]
admass_66=k_66*Izz; %[kg.m^2]

%% 2)HULL Non Dimensional SMD's
% Parâmetros base constantes obtidos do modelo genérico do Prof. Su-
tulo em
% "Mariner" ship.
%Obtido: PNA, V.3. P. 228-230 (Tables 1--3)
% (Constant base parameters from Prof. Sutulo's Generalized model
based
% on the "Mariner" ship
% Source: PNA, V.3. P. 228-230 (Tables 1--3))

%Correção do Yr0: eliminação da massa do navio
% Correction of Yr0: ship's mass itself eliminated
Y00prime = -0.0008;
Yv0prime = -0.244;
Yr0prime = 0.067;
N00prime = 0.00059;
Nv0prime = -0.0555;
```

```

Nvvr0prime=-1.158;
Nvvrprime=knvvr*Nvvr0prime;
%Nvrr0prime not considered

%Avaliação da estabilidade direcional
% Directional Stability Check
%disp 'Directional Stability Criterion Check'
%disp 'Yv'-Nr''
YN = Yvprime*Nrprime;
%disp 'm'-Yr''
MY = Mprime-Yrprime;
%disp 'Agregate C: If < 0, Unstable Ship, If ~0 Marginally Stable Ship'
C = YN+MY*Nvprime;
message={'Verificação da estabilidade direcional';...
        'Se <0, navio instável';'se ~0 navio marginalmente estável';'valor: ';num2str(C)};
title_CH='Avaliação da estabilidade direcional';
icon='help';
f = msgbox(message,title_CH,icon);
waitfor(f);

%Manoeuvres Using an Improved Model of Hull-Propeller-Rudder Interactions.
%Proceedings, "15th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics, Hamburg, September
%2-7, 1984", National Academy Press, Washington D.C., 1985, pp. 83-108
%TE=Xp=0.5*ro*CT*(gamaB)*VB^2
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Velocidade tangencial do hélice
%Propeller Tangential Speed
vCP=0.7*pi()*Dp*n; % [m/s]

%Velocidade axial do hélice relativamente à água
%Propeller's axial velocity with respect to water
uA=V*(1-wp); % [m/s]

%impulsão efectiva relativamente a 2 hélices
%Effective Thrust from 2 propellers
TE=2*ro*0.5*Ap*CT*VB^2; % [N]
%correção com valores reais conhecidos
%Correction for known values of the real ship
TEcorr=TE*0.96278; % [N]
PE=(TE*V)/1000; % [kW]
Xp=TEcorr; % [N]
%Xpprime=TEcorr/(0.5*ro*V^2*Lpp*T);

%% Guardar as variaveis num ficheiros matlab
%(save matlab variables)
filenameCH=[dirP '\CoefHydro_workspace.mat'];
save(filenameCH);
%save('CoefHydro_workspace.mat');

```

### C.3. Algoritmo dos dados do navio

```
% 1) Dados iniciais do navio - Ship initial data
% Os dados foram retirados dos documentos dinamarqueses
% "Y311-SLOV-Intaktstability_rev2 m FMT rettelse marts 2013"
% Livro de estabilidade corrigido em março de 2013
% Para a simulação irá ser usado o carregamento LD-01 (Carregamento a
100%)

% Massa específica da água (water specific mass)
ro=XXX; % [kg/m3]
% Aceleração da gravidade (acceleration of gravity)
g=XXX; % [m/s2]
% Comprimento entre perpendiculares (Length between perpendiculars)
Lpp=XXX; % [m]
L=Lpp;
% Boca (Breath)
B=XXX; % [m]
% Deslocamento (Displacement)
Disp=XXX; % [ton]
Disp=XXX; % [Kg]
% Calado Popa (draught AP - Aft. Perpendicular)
Tap=XXX; % [m]
% 2.55
% Calado Proa (draught FP - Forward Perpendicular)
Tfp=XXX; % [m]
% 2.45
% Caimento (Trim) (=Tap-Tfp) (+stern/popa, -bow/proa)
trim=Tap-Tfp; % [m]
% Centro de gravidade longitudinal (Longitudinal center of gravity)
LCG=XXX; % [m]
% Centro de gravidade a contar a partir da quilha (Gravity center)
KG=XXX; % [m]
KG_F=XXX; % [m] f-fluid
% Centro de flutuação vertical (vertical buoyancy center)
VCB=XXX; % [m]
% Altura do metacentro transversal (height of transverse metacenter)
KMT=XXX; % [m]
% Distância do centro de gravidade ao metacentro (distance between gra-
vity center and metacenter)
GM=XXX; % [m]
GM_F=XXX; % [m] f-fluid
% Calado médio (mean draught) ((Tap+Tfp)/2)
Tmean=(Tap+Tfp)/2; % [m]
T=Tmean;
% caimento relativo (Relative trim)
tau=trim/Tmean;
% centro de gravidade vertical (Vertical center of gravity)
VCG=XXX; % [m] (falta correção para LD-01) (pag7)

%% 2) Dados calculados
% Localização longitudinal do meio navio
% Longitudinal location aft of fwd perpendicular. (Lpp/2)
Cx=Lpp/2; % [m]
% Abreath location from the centreline longitudinal axis
% 0 por definição
```

```

%diâmetro da hélice (propeller diameter)
Dp_mm=XXX;           % [mm]
Dp=XXX;              % [m]
%Área da superfície das pás (Blade surface area)
BSA=XXX;             % [m^2]
%Número de pás (number of blades)
NB=XXX;
%Área total das pás
AreaP=BSA*NB;        % [m^2]
%Área do disco (disk area)
Ap=pi*((Dp^2)/4);   % [m^2]
%Rácio da área das pás (Blade area ratio)
BAR=AreaP/Ap;

%% 3.2) Leme (Rudder)
%1- lemes laterais
%2- leme central

%Área do leme (Rudder Area)
AR_mm2=XXX;          % [mm^2]
AR=AR_mm2/1000000;   % [m^2] (conversão mm2 para m2)
%leme central
AR_mm2_2=XXX;        % [mm^2]
AR_2=AR_mm2_2/1000000; % [m^2] (conversão mm2 para m2)
%Área equivalente dos três lemes
AR_total_mm2=2*AR_mm2+AR_mm2_2; % [mm^2]
AR_total=AR_total_mm2/1000000; % [m^2]
AR=AR_total;
%Fator de correção, através de valores retirados de provas de mar do
navio
%(Correction Factor for tuning vessel to match known turning
%values from Sea Trials)
KRudd = 1.4;
%Área do leme corrigida (Tuned Rudder Area)
AR = AR*KRudd;        % [m^2]
AR_2 = AR_2*KRudd;
%Área relativa do leme (Rudder relative area) (AR /L*T)
ARrelat=AR/(Lpp*T);
ARrelat_2=AR_2/(Lpp*T);
%Altura do leme (Rudder height)
hR_mm=XXX;           % [mm]
hR=hR_mm/1000;       % [m]
hR_mm_2=XXX;         % [mm]
hR_2=hR_mm_2/1000;  % [m]
%Rudder aspect ratio
kR=hR^2/AR;
kR_2=hR_2^2/AR_2;
%Corrected kR to match known turning values from Sea Trials
kR = kR * 0.954;
kR_2 = kR_2 * 0.954;
%% Guardar as variáveis num ficheiros matlab
%(save matlab variables)
filenameDN=[dirP '\DadosNavios_workspace.mat'];
save(filenameDN);
%save('DadosNavios_workspace.mat');

```

## C.4. algoritmo da máquina de leme

```
function deltaR = ModeloLeme(deltaStar,deltaR0,ts,tapph);
global dirP
%% 1) Parametros estimados da máquina do leme
   %(Rudder parameters)
   %Valores usado para uma máquina típica, baseado no modelo do
Prof.Sutulo
   %usual Values for a rudder machine, based on prof. Sutulo's model

%Ângulo máximo de leme
%Maximum deflection angle
deltamdeg=35; % [degree]
deltamrad=deltamdeg*pi()/180; % [rad]
%Taxa de alteração de leme
%Maximum deflection rate
epsilonmdeg=3.5; % [°/s]
epsilonmrad=epsilonmdeg*pi()/180; % [rad/s]
%Banda morta de sensibilidade do leme
%Non-sensivity dead band
delta0deg=0; % [°] Educated guess
delta0rad=delta0deg*pi()/180; % [rad/s]
%Tempo de espera da engrenagem da direção
%Steering gear's time lag
TR=3.5; % [s]
%intervalo de tempo
%Time step
deltat=ts(2)-ts(1);
deltaRdot=zeros(numel(ts),1);
deltaR=zeros(numel(ts),1);
deltaR(1,1)=deltaR0;
```



## Apêndice D. Algoritmo de aquisição de dados

### D.1. Programa base real

```
clear
clc
%% Seleção dos documentos do programa
% Program docs selection
resp1=helpdlg('Na janela seguinte selecione o diretório do programa', 'INFO');
waitfor(resp1);
%selpath = uigetdir(path,title)
selpath = uigetdir;
%pasta de trabalhado do matlab
cd(selpath);

%% Seleção dos ficheiros txt dos sensores
% Sensor txt data selection
resp1=helpdlg('Na janela seguinte selecione os ficheiros em formato txt', 'INFO');
waitfor(resp1);

error=1;
while error==1
[FileName,PathName] = uigetfile('*..*', 'txt','MultiSelect','on');
%[FileName,PathName] = uigetfile('*..*', '.txt-Dateien (*.txt)','MultiSelect','on');
error=1;
error1=0;
error2=0;
element1 = {'.txt'};
%while error==1
    for i=1:numel(FileName)
        ispresent1(i) = cellfun(@(s) ~isempty(strfind(FileName{i},s)),
element1);
    end
    for i=1:numel(FileName)
        if ispresent1(i)==1
            error1=1;
        else error2=1;
        end
        error=error1*error2;
    end
    if error==1
        resp1=warndlg('Selecione só ficheiros .txt','!! AVISO !!');
        waitfor(resp1);
    else poucox=1;
    end
end

%% Seleção dos ficheiros csv do SGP
% SGP csv data selection
resp1=helpdlg('Na janela seguinte selecione o ficheiro em formato csv', 'INFO');
```

```

        errorTP=1;
    end
    end
    TProva=answer2;
mkdir coms
filename4='coms\VarTProva.mat';
save(filename4,'TProva');
clear
clc
end

load('coms\DataTotal2.mat');
load('coms\VarTProva.mat');

if TProva==0
    errorTP=1;
    while errorTP==1
        prompt = {'Introduza o tipo de prova: (1-Curva de Giração, 2-
ZigZag, 3-Espiral)'};
        dlgtitle = 'Tipo de Prova';
        dims = [1 35];
        definput = {'1'};
        answer2 = inputdlg(prompt,dlgtitle,dims,definput);
        answer2=str2num(cell2mat(answer2));
        if isempty(answer2)==1 % || answer2~=2 || answer2~=3
            resp1=warndlg('Introduza 1, 2 ou 3 para seleção','!! AVISO
!!');
            waitfor(resp1);
            errorTP=1;
        elseif isnumeric(answer2)==0
            resp1=warndlg('Introduza 1, 2 ou 3 para seleção','!! AVISO
end

load('coms\DataTotal2.mat');
load('coms\VarTProva.mat');

if TProva==1
    CGgraph;
    winopen([oldFolder '\coms\imagens']);
    % winopen([oldFolder '\coms\imagens\CG1.jpeg']);
end
if TProva==2
    % OSD_Proa_2=-OSD_Proa_2;
    % OSD_Cog_2=-OSD_Cog_2;
    % Mleme_2=-Mleme_2;
    % Mleme4_2=-Mleme4_2;
    ZZgraph;
    winopen([oldFolder '\coms\imagens']);
    % winopen([oldFolder '\coms\imagens\CG1.jpeg']);
end
if TProva==3
    ESPgraph;
    winopen([oldFolder '\coms\imagens']);
end
end

```

## D.2. Algoritmo de aquisição de dados do GPS

```
%cd 'Z:\5º ano\6ª fase - tejo embarque\simulador real 4'

%filename='25a.txt';
filename=f1;
%
% %T = readtable(filename);
% % T = readtable(filename,...
% %     'Delimiter',' ','ReadVariableNames',false);
oldFolder = cd(PathName);
d=importdata(filename);
cd(oldFolder);
number=numel(d);
d1=d;

% number=numel(d.textdata(:,1));
% d1=d.textdata(:,1);

c1=1;c2=1;c3=1;c4=1;c5=1;c6=1;c7=1;
for i=1:number
    if contains(d1(i,:), 'GGA') == 1;
        GGA(c1,1)=d1(i);
        c1=c1+1;
    end
    if contains(d1(i,:), 'ZDA') == 1;
        ZDA(c2,1)=d1(i);
        c2=c2+1;
    end
    if contains(d1(i,:), 'VTG') == 1;
        VTG(c3,1)=d1(i);
        c3=c3+1;
    end
    if contains(d1(i,:), 'GSA') == 1;
        GSA(c4,1)=d1(i);
        c4=c4+1;
    end
    if contains(d1(i,:), 'DTM') == 1;
        DTM(c5,1)=d1(i);
        c5=c5+1;
    end
    if contains(d1(i,:), 'GLL') == 1;
        GLL(c6,1)=d1(i);
        c6=c6+1;
    end
    if contains(d1(i,:), 'GNS') == 1;
        GNS(c7,1)=d1(i);
        c7=c7+1;
    end
end
% FMin=[c1 c3 c6 c7];
% Mmin=min(FMin);
%GGA= cell2table(GGA);
for i=1:numel(GGA)
    T2{i,:} = strsplit(GGA{i}, ', ');
```

```

%% ZDA
% Retirar Valores da variável ZDA
% %UTC
% ZDA_T=ZDA(1:Mmin,2);
% ZDA_T=cell2mat(ZDA_T);
% ZDA_T=str2num(ZDA_T);
%Dia
ZDA_d=ZDA(1,3);
ZDA_d=cell2mat(ZDA_d);
ZDA_d=str2num(ZDA_d);
%Mês
ZDA_m=ZDA(1,4);
ZDA_m=cell2mat(ZDA_m);
ZDA_m=str2num(ZDA_m);
%ano
ZDA_a=ZDA(1,5);
ZDA_a=cell2mat(ZDA_a);
ZDA_a=str2num(ZDA_a);

%% VTG
% Retirar Valores da variável VTG
%UTC
VTG_T=GGA_T;
%Rumo Verdadeiro
VTG_CogT=VTG(MaxL:Mmin,2);
for i=1:numel(VTG_CogT)
%VTG_CogT=cell2mat(VTG_CogT);
VTG_CogT2(i,1)=str2num(VTG_CogT{i});
end
VTG_CogT=VTG_CogT2;
%VTG_CogT=str2num(VTG_CogT);

%Rumo Magnetico
VTG_CogM=VTG(MaxL:Mmin,4);
for i=1:numel(VTG_CogT)
%VTG_CogM=cell2mat(VTG_CogM);
VTG_CogM2(i,1)=str2num(VTG_CogM{i});
end
VTG_CogM=VTG_CogM2;
%VTG_CogM=str2num(VTG_CogM);

%Velocidade Nós
VTG_SpN2=VTG(MaxL:Mmin,6);
for i=1:numel(VTG_SpN2)
    VTG_SpN(i,1)=str2num(VTG_SpN2{i,1});
end
% =cell2mat(VTG_SpN);
% VTG_SpN=str2num(VTG_SpN);

clc
% load('coms\VarGPS_M.mat');

```

### D.3. Algoritmo de aquisição de dados do anemômetro

```
%cd 'Z:\5° ano\6ª fase - tejo embarque\simulador real 4'
%filename='24a.txt';
%
% %T = readtable(filename);
% % T = readtable(filename,...
% %     'Delimiter',' ','ReadVariableNames',false);
filename=f2;
oldFolder = cd(PathName);
d=importdata(filename);
cd(oldFolder);
number=numel(d);
d1=d;
% number=numel(d.textdata(:,1));
% d1=d.textdata(:,1)
d1=d;

c1=1;
for i=1:number
    if contains(d1(i,:), 'MWV') == 1;
        MWV(c1,1)=d1(i);
        c1=c1+1;
    end
    %poderá ter MWD em vez de MWD
end
%GGA= cell2table(GGA);
for i=1:numel(MWV);
    T2{i,:} = strsplit(MWV{i}, ', ');
end
for i=1:numel(T2)
    for j=1:numel(T2{1,1})
        MWV{i,j}=T2{i,1}{1,j};
    end
end
end
% '(GGA,...
%     'Delimiter',' ','VariableNames',{'UTC' 'Latitude' 'NS' 'longitu-
de' 'EW' 'IndicadorDeQualidadeGPS' ...
%     'Ndesatelitesutilizados' 'HDOP' 'altitudere' 'unidade' 'Repara-
caoGeoidal' 'unidade2'...
%     'ultimaAtualizacao' 'EstacaoReferenciaID'});
% ZDA= cell2table(ZDA);

% VTG= cell2table(VTG);
```

## D.4. Algoritmo de aquisição de dados do radar

```
% cd 'Z:\5° ano\6ª fase - tejo embarque\simulador real 4'
% filename='23a.txt';
%
% %T = readtable(filename);
% % T = readtable(filename,...
% %     'Delimiter',' ','ReadVariableNames',false);

filename=f3;
oldFolder = cd(PathName);
d=importdata(filename);
cd(oldFolder);
number=numel(d);
d1=d;

c1=1;
for i=1:number
    if contains(d(i,:), 'OSD') == 1;
        OSD(c1,1)=d(i);
        c1=c1+1;
    end
    %poderá ter MWD em vez de MWD
end
%GGA= cell2table(GGA);
for i=1:numel(OSD);
    T2{i,:} = strsplit(OSD{i}, ', ');
end
for i=1:numel(T2)
    for j=1:numel(T2{1,1})
        OSD{i,j}=T2{i,1}{1,j};
    end
end
% '(GGA,...
% 'Delimiter',' ','VariableNames',{'UTC' 'Latitude' 'NS' 'longitu-
de' 'EW' 'IndicadorDeQualidadeGPS' ...
% 'Ndesatelitesutilizados' 'HDOP' 'altitudere' 'unidade' 'Repara-
caoGeoidal' 'unidade2'...
% 'ultimaAtualizacao' 'EstacaoReferenciaID'});
% ZDA= cell2table(ZDA);

% VTG= cell2table(VTG);

%% OSD
% Retirar Valores da variável OSD
%UTC
%OSD_T=GGA_T;
%Proa
OSD_Proa2=OSD(:,2);
for i=1:numel(OSD_Proa2)
    OSD_Proa3(i,1)=str2num(OSD_Proa2{i,1});
end
%Rumo
OSD_Cog2=OSD(:,4);
for i=1:numel(OSD_Cog2)
    OSD_Cog3(i,1)=str2num(OSD_Cog2{i,1});
end
```

## D.5. Algoritmo de aquisição de dados do SGP

```
filename='SGP23.csv';
% d=importdata(filename);
% number=numel(d);
filename=f4;
oldFolder = cd(PathName2);
d=importdata(filename);
cd(oldFolder);
number=numel(d);
d1=d;

Data_Hora=d.textdata(:,2);
leme=d.data(:, :);
leme1=leme(:,1:3);

for i=1:numel(Data_Hora);
    T3{i,:} = strsplit(Data_Hora{i}, ' ');
end
for i=1:numel(T3)
    for j=1:numel(T3{1,1})
        Data_Hora{i,j}=T3{i,1}{1,j};
    end
end

HoraSGP3=Data_Hora(:,2);
for i=2:numel(HoraSGP3)
    T3{i,:} = strsplit(HoraSGP3{i}, ':');
end
c1=1;
for i=2:numel(HoraSGP3)
    T4{c1,1}=strjoin(T3{i},{' '});
    c1=c1+1;
end
for i=1:numel(T4)
    HoraSGP(i,1)=str2num(T4{i});
end

c1=1;
c2=1;
for i=1:numel(HoraSGP)
    if HoraSGP(i)==TempoI2
        GuardarLi(c1)=i;
        c1=c1+1;
    end
    if HoraSGP(i)==TempoF
        GuardarLf(c2)=i;
        c2=c2+1;
    end
end

Data_Hora2=Data_Hora(GuardarLi:GuardarLf,:);
DadosDivSGP=leme(GuardarLi:GuardarLf,:);
lemes=leme1(GuardarLi:GuardarLf,:);
HoraSGP2=HoraSGP(GuardarLi:GuardarLf,:);
Mleme=mean(lemes');
```

## D.6. Algoritmo de tratamento de dados

```
% Retirar tempo de aproximação
% remove approximation time

C_SGP=round((ProaVal_II*numel(HoraSGP2))/numel(OSD_Proa));

DadosDivSGP_2=DadosDivSGP(C_SGP:numel(DadosDivSGP(:,1)),:);
Data_Hora2_2=Data_Hora2(C_SGP:numel(DadosDivSGP(:,1)),:);
HoraSGP2_2=HoraSGP2(C_SGP:numel(DadosDivSGP(:,1)),:);
lemes_2=lemes(C_SGP:numel(DadosDivSGP(:,1)),:);
Mleme_2=Mleme(C_SGP:numel(DadosDivSGP(:,1)),:);
Mleme2_2=Mleme2(C_SGP:numel(DadosDivSGP(:,1)),:);
Mleme3_2=Mleme3(C_SGP:numel(DadosDivSGP(:,1)),:);
Mleme4_2=Mleme4(C_SGP:numel(DadosDivSGP(:,1)),:);
tempoini=HoraSGP2_2(1);
tempofin=HoraSGP2_2(numel(HoraSGP2_2));
MeanLeme=mean(Mleme4_2);

mkdir coms
filename5='coms\DataTotal2.mat';
%save(filename5);
save(filename5,'selpath','FileName','PathName','oldFolder',...
    'f1','f2','f3','f4',...
    'FileName2','PathName2',...
    'DadosDivSGP_2','Data_Hora2_2','HoraSGP2_2',...
    'lemes_2','Mleme_2','Mleme2_2','Mleme3_2',...
    'Mleme4_2','tempoini','tempofin','ModeLeme','MeanLeme',...
    'GGA_Lat_2','GGA_LatD','GGA_Lon_2','GGA_LonD',...
    'GPS_Time','ZDA_a','ZDA_d','ZDA_m',...
    'MWV_Rumo_2','MWV_SpM_2',...
    'OSD_Cog_2','OSD_Proa_2','OSD_SpN_2',...
    'GGA_Lat22_2','GGA_Lon22_2');
clear
clc
```

## D.7. Algoritmo de seleção do tipo de prova

```
% Seleção automática do tipo de prova
% Automatic selection of the type of trial
TProva=0;
[pks,locs,w,p] = findpeaks(Mleme4_2); %espiral
% plot(Mleme4_2)
% hold on
% plot(locs,pks,'o','MarkerSize',3)
if numel(pks)<=2 && MeanLeme>=-0.8 && MeanLeme<=0.8
    TProva=3; %3=espiral
end
mkdir coms
filename4='coms\VarTProva.mat';
save(filename4,'TProva');
clear
clc
```

## D.8. Algoritmo de criação de gráficos de cruvas de giração

```
% clear
% clc
% load('coms\DataTotal2.mat');
% load('coms\VarTProva.mat');

%% Converter minutos e segundos para graus
% Convert minutes to degrees
GGA_Lat22_2_G=str2num(GGA_Lat22_2(:,1:2));
GGA_Lat22_2_G_m=(GGA_Lat22_2_G*110.57)/0.001; %km

% GGA_Lat22_2_m=str2num(GGA_Lat22_2(:,3:4));
% GGA_Lat22_2_m_m=(GGA_Lat22_2_m*1.84)/0.001; %km

GGA_Lat22_2_m_2=str2num(GGA_Lat22_2(:,3:numel(GGA_Lat22_2(1,:))));
GGA_Lat22_2_m_2_m=(GGA_Lat22_2_m_2*1.84)/0.001; %km

% GGA_Lat22_2_s=str2num(GGA_Lat22_2(:,6:7));
% GGA_Lat22_2_s_m=(GGA_Lat22_2_s*30.72); %m
%
% GGA_Lat22_2_ms=str2num(GGA_Lat22_2(:,8:numel(GGA_Lat22_2(1,:))));
% GGA_Lat22_2_ms=GGA_Lat22_2_ms*0.001;
% GGA_Lat22_2_ms_m=(GGA_Lat22_2_s*30.72); %m
%
% GGA_me-
tros_y=GGA_Lat22_2_G_m+GGA_Lat22_2_m_m+GGA_Lat22_2_s_m+GGA_Lat22_2_ms_m;
GGA_metros_y_2=GGA_Lat22_2_G_m+GGA_Lat22_2_m_2_m;
%
% for i=1:numel(GGA_metros_y)
%     Y_metros(i,1)=GGA_metros_y(i)-GGA_metros_y(1);
% end
for i=1:numel(GGA_metros_y_2)
    Y_metros_2(i,1)=GGA_metros_y_2(i)-GGA_metros_y_2(1);
end
GGA_L=[GGA_Lat22_2_G GGA_Lat22_2_m_2];
GGA_Ld = dm2degrees(GGA_L);

GGA_Lon22_2_G=str2num(GGA_Lon22_2(:,1:3));
GGA_Lon22_2_G_m=(GGA_Lon22_2_G*111.32)/0.001; %km

% GGA_Lon22_2_m=str2num(GGA_Lon22_2(:,4:5));
% GGA_Lon22_2_m_m=(GGA_Lon22_2_m*1.86)/0.001; %km

GGA_Lon22_2_m_2=str2num(GGA_Lon22_2(:,4:numel(GGA_Lon22_2(1,:))));
GGA_Lon22_2_m_2_m=(GGA_Lon22_2_m_2*1.86)/0.001; %km

% GGA_Lon22_2_s=str2num(GGA_Lon22_2(:,7:8));
% GGA_Lon22_2_s_m=(GGA_Lon22_2_s*30.92); %m
%
% GGA_Lon22_2_ms=str2num(GGA_Lon22_2(:,9:numel(GGA_Lon22_2(1,:))));
% GGA_Lon22_2_ms=GGA_Lon22_2_ms*0.001;
% GGA_Lon22_2_ms_m=(GGA_Lon22_2_s*30.92); %m
%
```

```

%legenda (legend)
lgd = legend([PD PA],{['Afastamento lateral máx.:',num2str(round(D_m_2,1)), ' m'], ['Avanço máximo:',num2str(round(Av_m_2,1)), ' m'], ['Velocidade máxima',num2str(max_vel), ' nós'], ['Velocidade máxima',num2str(mean_vel), ' nós']}, 'Position', [.05 .11 .1 .2]);
%lgd = legend([PD PA],{['Afastamento lateral máx.:',num2str(round(D_m_2,1)), ' m'], ['Avanço máximo:',num2str(round(Av_m_2,1)), ' m']}, 'Position', [.05 .11 .1 .2]);
%lgd2 = legend(['Velocidade máxima',num2str(max_vel), ' nós'], ['Velocidade máxima',num2str(mean_vel), ' nós'], 'Position', [.05 .11 .1 .2]);

% lgd = legend([PD PA],{['Diâmetro tático: ',num2str(round(D_m_2,1)), ' m'], ['Avanço máximo: ',num2str(round(Av_m_2,1)), ' m']}, 'Location', 'northwest');
%lgd = legend({'Diâmetro tático: ',num2str(round(maxDistD,1)), ' m'}, ['Avanço máximo: ',num2str(round(maxDistAv,1)), ' m'], ['Velocidade: ',num2str(Vkts), ' Kn']}, 'Location', 'southeast');
title(lgd, 'Informações Corrigidas');
%Guardar imagem (save image)
% % filenameCG1='coms\imagens\CG1.jpeg';
% % saveas (figure1, filenameCG1);
% % waitfor (plot1);
end
%axes('Position',[.7 .7 .2 .2])
% box on
wind_direction=MWV_Rumo_2;
wind_speed=MWV_SpM_2;
%figure
pax = polaraxes;
pax.Position = [.02 .7 .2 .2];
box on
polarhistogram(deg2rad(wind_direction(wind_speed<25)),deg2rad(0:10:360), 'FaceColor', 'red', 'displayname', '20 - 25 m/s')
hold on
polarhistogram(deg2rad(wind_direction(wind_speed<20)),deg2rad(0:10:360), 'FaceColor', [0.8500 0.3250 0.0980], 'displayname', '15 - 20 m/s')
polarhistogram(deg2rad(wind_direction(wind_speed<15)),deg2rad(0:10:360), 'FaceColor', 'yellow', 'displayname', '10 - 15 m/s')
polarhistogram(deg2rad(wind_direction(wind_speed<10)),deg2rad(0:10:360), 'FaceColor', 'green', 'displayname', '5 - 10 m/s')
polarhistogram(deg2rad(wind_direction(wind_speed<5)),deg2rad(0:10:360), 'FaceColor', 'blue', 'displayname', '0 - 5 m/s')
pax.ThetaDir = 'clockwise';
pax.ThetaZeroLocation = 'top';
legend('Show')
title('Rosa dos ventos')
filenameCG1=['coms\imagens\CG_',datestr(now, 'ddmmyyyy HHMM'), '.jpeg'];
saveas (figure1, filenameCG1);
waitfor (plot1);

```

## D.9. Algoritmo de criação de gráficos de provas de espiral

```
nP=numel(OSD_Proa_2);
nL=numel(Mleme_2);
if nL>nP
    LemeESP=Mleme_2(1:nP);
    LemeESP2=Mleme4_2(1:nP);
    ProaESP=OSD_Proa_2;
    RumoESP=OSD_Cog_2;
elseif nL<nP
    LemeESP=Mleme_2;
    LemeESP2=Mleme4_2;
    ProaESP=OSD_Proa_2(1:nL);
    RumoESP=OSD_Cog_2(1:nL);
else
    ProaESP=OSD_Proa_2;
    LemeESP=Mleme_2;
    LemeESP2=Mleme4_2;
    RumoESP=OSD_Cog_2;
end
%ProaESP2=movmedian(ProaESP,15);
%LemeESP2_2=movmedian(LemeESP2,15);

polarhistogram(deg2rad(wind_direction(wind_speed<20)),deg2rad(0:10:360),'FaceColor',[0.8500 0.3250 0.0980],'displayname','15 - 20 m/s')
polarhistogram(deg2rad(wind_direction(wind_speed<15)),deg2rad(0:10:360),'FaceColor','yellow','displayname','10 - 15 m/s')
polarhistogram(deg2rad(wind_direction(wind_speed<10)),deg2rad(0:10:360),'FaceColor','green','displayname','5 - 10 m/s')
polarhistogram(deg2rad(wind_direction(wind_speed<5)),deg2rad(0:10:360),'FaceColor','blue','displayname','0 - 5 m/s')
pax.ThetaDir = 'clockwise';
pax.ThetaZeroLocation = 'top';
legend('Show')
%legend('Location','bestoutside')
title('Rosa dos ventos')

%filenameE=['coms\imagens\Espiral',datestr(now, 'dd-mmm-yyyy'),' .jpeg'];
%filenameZZ=['coms\imagens\'',datestr(now, 'ddm-myyyy'),' \ZZ_',datestr(now, 'ddmmyyyy HHMM'),' .jpeg'];
filenameE=['coms\imagens\Espiral_',datestr(now, 'ddmmyyyy HHMM'),' .jpeg'];
%filenameE=['coms\imagens\'',datestr(now, 'ddmmyyyy'),' \Espiral_',datestr(now, 'ddmmyyyy HHMM'),' .jpeg'];
saveas(figureE,filenameE);
waitfor(plot1);

%
% load('coms\DataTotal2.mat');
% load('coms\VarTProva.mat');
```

## D.10. Algoritmo de criação de gráficos de provas de ZigZag

```
nP=numel(OSD_Proa_2);
nL=numel(Mleme_2);
if nL>nP
    LemeZZ=Mleme_2(1:nP);
    LemeZZ2=Mleme4_2(1:nP);
    ProaZZ=OSD_Proa_2;
    RumoZZ=OSD_Cog_2;
elseif nL<nP
    LemeZZ=Mleme_2;
    LemeZZ2=Mleme4_2;
    ProaZZ=OSD_Proa_2(1:nL);
    RumoZZ=OSD_Cog_2(1:nL);
else
    ProaZZ=OSD_Proa_2;
    LemeZZ=Mleme_2;
    LemeZZ2=Mleme4_2;
    RumoZZ=OSD_Cog_2;
end

MProaZZ=mean(ProaZZ);
ProaZZ2=ProaZZ-MProaZZ;
MRumoZZ=mean(RumoZZ);
RumoZZ2=RumoZZ-MRumoZZ;
%plot([ProaZZ2 LemeZZ]);
% plot([ProaZZ2 RumoZZ2 LemeZZ]);
LemeZZ_Aux=abs(LemeZZ);
OSm=mean(OS1);
ptm=mode(tB);
g2rad(0:10:360),'FaceColor',[0.8500 0.3250 0.0980],'displayname','15 -
20 m/s')
polarhistogram(deg2rad(wind_direc-
tion(wind_speed<15)),deg2rad(0:10:360),'FaceColor','yellow','display-
name','10 - 15 m/s')
polarhistogram(deg2rad(wind_direc-
tion(wind_speed<10)),deg2rad(0:10:360),'FaceColor','green','display-
name','5 - 10 m/s')
polarhistogram(deg2rad(wind_direc-
tion(wind_speed<5)),deg2rad(0:10:360),'FaceColor','blue','display-
name','0 - 5 m/s')
pax.ThetaDir = 'clockwise';
pax.ThetaZeroLocation = 'top';
legend('Show')
%legend('Location','bestoutside')
title('Rosa dos ventos')

%filenameE=['coms\imagens\Espiral_',datestr(now,'mmdyyyy
HHMM'),'_.jpeg'];
filenameZZ=['coms\imagens\ZZ_',datestr(now,'ddmmyyyy HHMM'),'_.jpeg'];
%filenameZZ='coms\imagens\ZZ1.jpeg';
saveas(figureZZ3,filenameZZ);
waitfor(plot1);
%Identificadores dos plots
% plot1
% Plciclo
% Pig
```