

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA  
FONSECA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**HENRIQUE REBELLO HOHN**

**GUIAMENTO, NAVEGAÇÃO E CONTROLE DE UMA EMBARCAÇÃO  
AUTÔNOMA EM ESCALA REDUZIDA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**Rio de Janeiro  
2023**

**HENRIQUE REBELLO HOHN**

**GUIAMENTO, NAVEGAÇÃO E CONTROLE DE UMA EMBARCAÇÃO  
AUTÔNOMA EM ESCALA REDUZIDA.**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica (GMEC), do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Alves Santiago

**Rio de Janeiro  
2023**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

H719 Hohn, Henrique Rebello  
Guiamento, navegação e controle de uma embarcação  
autônoma em escala reduzida / Henrique Rebello Hohn – 2023.  
129f.: il. (algumas color.) + apêndices, enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação  
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2023.  
Bibliografia: f. 127-129.  
Orientador: Alexandre Alves Santiago.

1. Engenharia mecânica. 2. Veículos autônomos. 3. Engenharia  
naval – Controle automático. 4. Navios – Sistemas de propulsão.  
5. Construção naval – Sistemas de controle – Métodos de  
simulação. I. Santiago, Alexandre Alves (Orient.). II. Título.

CDD 620.1

Dedico este trabalho à ambos os meus avôs. Engenheiros, que sempre me incentivaram, mas que infelizmente já não estão mais presentes para ver este momento.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Luiza e Klaus, que desde a minha infância incentivaram o meu pensamento crítico e me apoiaram em todas as minhas decisões, dificuldades e inseguranças, sempre me tratando com amor, atenção, paciência, participação e sabedoria.

Gostaria de fazer menção a minha mãe que esteve sempre presente durante toda a minha jornada universitária, sempre me encorajando a continuar me movendo para frente sem desistir. E em especial por todo o apoio durante a realização deste projeto, em que esteve comigo durante os momentos de apertos e acertos.

Agradeço aos meus avós, por sempre serem presentes na minha vida e me ajudarem a crescer como pessoa, mesmo com as limitações impostas pela vida para com as nossas convivências. Agradeço muito a todos vocês, foram muito importantes na minha vida, com seu amor, carinho, presença e vontade, não consigo expressar em palavras meus agradecimentos. Em especial aos meus avós já falecidos, aos quais dedico este Trabalho de Conclusão de Curso, ambos foram vitais por suas conversas comigo, me ajudaram a moldar a forma como vejo o mundo e me guiaram até hoje, em especial ao meu avô materno, o senhor foi minha maior inspiração na vida, de onde quer que esteja, quero que saiba que tenho muito orgulho de você.

Agradeço a minha irmã Katharina, que mesmo sendo quase 10 anos mais nova do que eu, é uma jovem com um brilhante futuro pela frente, alguém que me ensinou diversas coisas sobre relações e como não ser puramente lógico, uma pessoa que me fez aprender o que é responsabilidade e quem foi a aluna que me trouxe mais orgulho até hoje.

Agradeço ao meu orientador, o Professor Alexandre Alves Santiago, que reforçou visões que eu tinha da engenharia e francamente me salvou no único período que cogitei ter feito uma escolha errada, ele me mostrou o caminho da engenharia, tal qual meu avô tinha feito, foi minha inspiração nos últimos anos, e desde que começamos a trabalhar juntos nunca desistiu de mim ou deixou de me encorajar, me compreendendo e me impulsionando a concluir este trabalho. Muito obrigado professor, sem o senhor esse projeto não teria condições de existir.

Quero agradecer também aos Professores e a instituição CEFET-RJ Maracanã, que me deram base e conhecimento para chegar até aqui e concluir esta

etapa, pois estavam sempre dispostos a auxiliar, não importava o momento. Em especial a professora Luciana Loureiro da Silva Monteiro que sempre me incentivou e me ensinou muito do que aprendi, a senhora também foi um exemplo sem igual para mim. E aos funcionários que permitiram a execução das atividades recorrentes da instituição, com menção especial para a prefeitura por me dar acesso aos dados da piscina com o intuito de permitir a execução fidedigna do projeto.

Agradeço ao meu amigo Pedro Henrique dos Santos Ribeiro, o "PH" que entrou comigo nessa jornada em 2019.1 e que sempre foi um ótimo amigo em todos os momentos que passamos nessa jornada pela graduação da Engenharia Mecânica, foi um imenso prazer ter te conhecido e virado seu amigo. Eu sei que essa é uma amizade que vai atravessar a vida e no que precisar pode contar comigo para te apoiar.

É claro que não posso esquecer de agradecer aos meus vários amigos que estiveram comigo nessa jornada: André, Camilla, Felipe, Kevin, Mateus, Matheus, Nicole e muitos outros que como em uma plateia, sempre estiveram na torcida por mim. Muito obrigado a todos.

„Der mensch muss besser und böser  
werden.“

Assim falou Zaratustra: Um Livro para  
Todos e Ninguém  
NIETZSCHE, Friederich, 1981.

## RESUMO

HOHN, Henrique Rebello. **GUIAMENTO, NAVEGAÇÃO E CONTROLE DE UMA EMBARCAÇÃO AUTÔNOMA EM ESCALA REDUZIDA**. 2023. 138 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.

O objetivo deste projeto é o desenvolvimento de um sistema de guiamento e controle para um navio, dotado de guiamento, navegação e controle de maneira autônoma com propulsão azimutal. Para elaboração do projeto, foram utilizados conceitos aprendidos durante a graduação de Engenharia Mecânica (estática, dinâmica, controle e automação naval e offshore) e conteúdos externos (MATLAB, Simulink, Engenharia Naval, Engenharia de Automação). Este projeto se pauta em ser um prosseguimento a partir de projetos realizados pelos engenheiros orientados previamente pelo professor Alexandre Alves Santiago. Com base no estudo de artigos, conferências, livros e teses de doutorado foi realizada a análise e os experimentos, por meio de simulação computacional, estes proporcionando a criação de sistemas que cumpriram as suas funções. Os procedimentos para realização do projeto foram baseados na construção da simulação computacional baseada nas lógicas de guiamento e controle detalhadas na referência bibliográfica. Esse sistema resultou na geração de sete gráficos responsáveis por indicar a trajetória, as velocidades, as forças e o torque presente na embarcação ao longo do tempo.

**Palavras-chave:** Embarcação. Hidrostática. Hidrodinâmica. Automação. GNC.



## ABSTRACT

HOHN, Henrique Rebello. **GUIAMENTO, NAVEGAÇÃO E CONTROLE DE UMA EMBARCAÇÃO AUTÔNOMA EM ESCALA REDUZIDA**. 2023. 138 pages. Trabalho de Conclusão de Curso – Federal Center of Technological Education – Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.

The objective of this project is the development of a guidance and control system for a ship scale model, equipped with autonomous guidance, navigation and control with azimuth propulsion. In order to achieve this goal, concepts learned during the Mechanical Engineering undergraduation (Statics, Dynamics, Naval and Offshore Engineering, Control and Automation) and external contents (MATLAB, Simulink, Naval Engineering, Automation Engineering) were used. This project is based on being a continuation of projects carried out by engineers previously guided by Professor Alexandre Alves Santiago. Based on the study of articles, books, conferences, and doctoral theses, analysis and experiments were carried out, through computer simulation, these provided the creation of systems that could fulfill its functions. The proceedings for the realization of the project were based upon the construction of the computational simulation for guidance and control detailed on the bibliographic reference. This system resulted on the Generation of seven graphics responsible for returning the trajectory, the velocities, the forces and the torque presents on the ship during the execution of the simulation.

**Key word:** Vessel. Hydrostatic. Hydrodynamic. Automation. GNC.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ideia simplificada de um giroscópio.....	31
Figura 2 – Evolução do giroscópio até o controle não linear do navio.....	33
Figura 3 – Carta náutica nº 1511.....	36
Figura 4 – Espiral de Evans.....	47
Figura 5 – Dimensões lineares da seção transversal.....	52
Figura 6 – Coeficientes de forma.....	52
Figura 7 – Planos imaginários de corte para construção de linhas.....	54
Figura 8 – Planos de linhas.....	56
Figura 9 – Condições de equilíbrio.....	57
Figura 10 – Raio metacêntrico.....	59
Figura 11 – Centro de gravidade, centro de carena e metacentro.....	60
Figura 12 – Equilíbrio estável (A), neutro (B), instável (C).....	61
Figura 13 – Curva cruzada de estabilidade (CCE).....	62
Figura 14 – Curvas de estabilidade.....	63
Figura 15 – CEE relacionada ao trabalho/energia.....	65
Figura 16 – Áreas de balizas.....	68
Figura 17 – Curvas de Bonjean.....	69
Figura 18 – Reforços do navio.....	70
Figura 19 – Planos de linhas do CyberShip II.....	72
Figura 20 – Eixos de referência fixados no corpo e na terra.....	74
Figura 21 – Velocidades nos pontos A e B para um fluido em movimento.....	87
Figura 22 – Gráfico da função de densidade espectral da potência de ondas.....	90
Figura 23 – Carta náutica demonstra profundidade da Baía de Guanabara.....	99
Figura 24 – <i>Way-points</i> sobrepostos na carta náutica.....	100
Figura 25 – Foto da piscina a partir do sul, vista do 2º andar do bloco D.....	101
Figura 26 – Foto da piscina vista por satélite com o planejamento traçado.....	102
Figura 27 – Planejamento de trajetória por meio de LOS.....	104
Figura 28 – Diagrama de blocos para o controle de <i>surge</i> .....	109
Figura 29 – Diagrama de blocos para o controle de <i>sway</i> .....	110
Figura 30 – Diagrama de blocos para o controle de <i>yaw</i> .....	111
Figura 31 – Lógica Aut_Ship.mdl.....	114

Figura 32 – Lógica do Guiamento.....	115
Figura 33 – Bloco de Controle.....	115
Figura 34 – Lógica do Controle.....	116
Figura 35 – Bloco de Testes Autônomo.....	116
Figura 36 – Lógica do Data_Display.....	117
Figura 37 – Modelo CyberShip II.....	117
Figura 38 – Gráfico da trajetória.....	118
Figura 39 – Gráfico da velocidade em $u$ .....	119
Figura 40 – Gráfico da velocidade em $v$ .....	120
Figura 41 – Gráfico da velocidade em $r$ .....	121
Figura 42 – Gráfico da força em $X$ .....	122
Figura 43 – Gráfico da força $Y$ .....	123
Figura 44 – Gráfico do Torque de Guinada $N$ .....	124

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Correção do trim.....	50
Tabela 2 – Linhas do navio.....	56
Tabela 3 – Características gerais do navio (original).....	71
Tabela 4 – Propriedades de volume.....	71
Tabela 5 – Propriedades da área da seção mestra e da área da linha d'água.....	71
Tabela 6 – Características gerais do navio (utilizado).....	72
Tabela 7 – Tabela dos 6 graus de liberdade (DOF) do navio.....	74
Tabela 8 – Parâmetros para o modelo linear do Cybership II.....	83
Tabela 9 – Tabela de posição dos <i>way-points</i> para missão real.....	100
Tabela 10 – Tabela de Posição dos <i>way-points</i> para escala 1:60.....	101

## LISTA DE ABREVIATURAS

AR	Aceleração genérica
AV	Representações de interseções avante
CEFET/RJ	Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca RJ
CAD	Computer Aided Design (Design auxiliado por computador)
DOF	Degrees of Freedom (Graus de Liberdade)
GNC	Guidance, Navigation, Control (Guiamento, Navegação e Controle)
ITTC	International Towing Tank Conference (Conferência Internacional de Tanques de Prova)
LA	Linha d'água
LB	Linha da base moldada ou linha de base
LBP	Length between Perpendiculars (Comprimento entre perpendiculares)
LC	Linha de centro
LOA	Length over all (Comprimento total)
LOS	Line-of-Sight (Linha de visão)
LWL	Waterline Length (Comprimento da linha d'água)
MATLAB	Matrix Laboratory (Laboratório Matricial)
MPC	Model Predictive Control (Modelo Preditivo de Controle)
NAO	Navio de Apoio Oceânico
PD	Proportional derivative control (Controle Proporcional Derivativo)
PI	Proportional Integrative Control (Controle Proporcional Integrativo)
PID	Proporcional Integral Derivativo (Controle Proporcional Integral Derivativo)

PUC-Rio	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
RAO	Operadores de Resposta em Amplitude
ROV	Remoted Operated Vehicle (Veículo remotamente operado)
SAE	Society of Automotive Engineers (Sociedade de Engenheiros Automotivos)
SNAME	Society of Naval Architecture and Marine Engineers (Sociedade de Arquitetos Navais e Engenheiros Marinheiros)
UEA	Universidade do Estado do Amazonas
UEZO	Centro Universitário Estadual da Zona Oeste
USP	Universidade de São Paulo

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Aceleração genérica
$a_T$	Frequência
$A$	Área delimitada genérica para aplicação de uma força
$A_c$	Área projetada das obras vivas (parte do navio abaixo da superfície da água) em relação à corrente
$A_f$	Área de flutuação (do calado)
$A_i$	Amplitude da onda
$A_M$	Área da seção mestra
$A_{\omega f}$	Área projetada frontal
$A_{\omega l}$	Área projetada lateral
$A_{(\omega, \beta_0)}$	Amplitude de uma onda incidente
$b_T$	Constante do Controle
$B$	Centro de carena
$B_M$	Comprimento de um modelo em escala
$B_R$	Comprimento genérico
$BM_L$	Distância longitudinal entre B e M
$BM_T$	Distância transversal entre B e M
$c$	Velocidade do som no fluido
$C$	Calado
$C_A$	Coefficiente de arrasto
$C_A(v)$	Matriz de inércia adicional
$C_b$	Coefficiente de bloco

$C_f$	Coeficiente de flutuação
$C_F$	Coeficiente de atrito
$C_{Fm}$	Coeficiente de atrito do mar
$C_{FS}$	Coeficiente de atrito do navio
$C_M$	Coeficiente da seção mestra
$C_{Nc}$	Coeficiente do esforço devido à corrente em relação ao eixo $z_b$
$C_{RB}(v)$	Matriz de forças centrípetas do corpo rígido
$C_{RS}$	Coeficiente residual
$C_{Tm}$	Coeficiente de resistência total do mar
$C_{TS}$	Coeficiente de resistência total
$C_v$	Número de Cavitação
$C_{Xc}$	Coeficiente do esforço devido à corrente em relação ao eixo $x_b$
$C_{Yc}$	Coeficiente do esforço devido à corrente em relação ao eixo $y_b$
$C_{\omega x}$	Coeficiente de esforço devido à corrente em relação ao eixo X
$C_{\omega y}$	Coeficiente de esforço devido à corrente em relação ao eixo Y
$C_{\omega z}$	Coeficiente de esforço devido à corrente em relação ao eixo Z
$CCE$	Curva cruzada de estabilidade
$CE$	Curva de estabilidade
$C(v)$	Matriz de Coriolis e forças centrípetas
$d$	Densidade
$d_f$	Densidade de um fluido
$d_l$	Profundidade local
$dt_Q$	Tempo necessário
$D$	Matriz de amortecimento do navio



$D_j$	Função apenas dos coeficientes de deriva
$D_M(v)$	Amortecimento devido ao desprendimento de vórtices ( <i>Morison Equation</i> )
$D_p(v)$	Potencial de amortecimento induzido devido a forças de oscilação no corpo
$D_s(v)$	Atrito fricção linear a superfície do casco, devido a camadas de limite laminar e atrito de fricção quadrática devido às camadas de limite turbulento ( <i>Skin Friction</i> )
$D_w(v)$	Amortecimento devido à geração de ondas ( <i>Wave Dumping</i> )
$D(r)$	Matriz amortecimento referente ao movimento de <i>yaw</i>
$D(u)$	Matriz de amortecimento referente ao movimento de <i>surge</i>
$D(v)$	Matriz amortecimento
$E$	Empuxo
$E_C$	Controle
$\dot{E}_C$	Derivada do Controle
$F$	Força resultante [N]
$F_r$	Número de Froude
$g$	Aceleração da gravidade [m/s <sup>2</sup> ]
$g(\eta)$	Vetor de forças e movimentos gravitacionais
$G$	Centro de gravidade
$GM$	Altura metacêntrica
$GZ$	Braço de endireitamento
$G(s)$	Função de Transferência
$G_C(s)$	Função de Transferência em malha fechada
$G_{MF}$	Malha fechada
$G_N(s)$	Controle PD <i>yaw</i>
$G_X(s)$	Controle PD <i>surge</i>

$G_Y(s)$	Controle PD <i>sway</i>
$h_a$	Altura no Ponto A
$h_b$	Altura no Ponto B
$H$	Boca
$H_\omega(\omega)$	Função de transferência do vento
$I_L$	Momento de inércia da área da linha d'água em relação ao eixo transversal, passando pelo centro de flutuação F
$I_{LC}$	Momento de inércia da área de linha d'água em relação à linha de centro longitudinal
$I_z$	Torque do motor de amortecimento hidrodinâmico no eixo z
$J_c$	Momento tensor de inércia
$J_x$	Momento de inércia em x
$J_y$	Momento de inércia em y
$J_z$	Momento de inércia em z
$J_1(\eta_1)$	Matriz de rotação das velocidades de translação
$J_2(\eta_2)$	Matriz de rotação das velocidades angulares do navio
$K_{dn}$	Controlador PD para <i>yaw</i>
$k_i$	Número da onda
$K_{ix}$	Feedback da aceleração para <i>surge</i>
$K_{iy}$	Feedback da aceleração para <i>sway</i>
$K_{pn}$	Controlador PD para <i>yaw</i>
$K_{px}$	Controlador PD para <i>surge</i>
$K_{py}$	Controlador PD para <i>sway</i>
$K_o$	Momento a partir do sistema de referencia móvel

$L$	Comprimento característico [m]
$L_a$	Comprimento da linha d'água
$L_C$	Modelo angular do corpo
$L_M$	Comprimento de um modelo em escala
$L_R$	Comprimento genérico
$LBP$	Comprimento entre as perpendiculares
$m$	Massa do navio
$m_g$	Massa genérica
$M$	Matriz de inércia/Matriz de inércia do navio
$M_A$	Matriz de inércia adicional
$M_{RB}$	Matriz de inércia do corpo rígido
$M_t$	Metacentro
$M_a$	Número de Mach
$M_o$	Momento a partir do sistema de referencia móvel
$M_{xC}$	Torque em x
$M_{yC}$	Torque em y
$M_{zC}$	Torque em z
$M(\dot{u})$	Matriz de inércia referente ao movimento de <i>surge</i>
$M(\dot{r})$	Matriz de inércia referente ao movimento de <i>yaw</i>
$M(\dot{v})$	Matriz de inércia referente ao movimento de <i>sway</i>
$M(\theta)$	Angulação do metacentro
$N_o$	Momento a partir do sistema de referencia móvel
$N_r$	Força de amortecimento hidrodinâmico no eixo z
$N_v$	Força de amortecimento hidrodinâmico no eixo y

$N_{\dot{r}}$	Massa adicional no eixo z
$N_{\dot{v}}$	Massa adicional no eixo y
$N_{\omega}$	Vetor de força da corrente em <i>yaw</i>
$p$	Pressão [Pa]
$p_a$	Pressão no ponto A
$p_b$	Pressão no ponto B
$p_o$	Velocidade angular de <i>roll</i> relacionada ao referencial móvel
$P_A$	Pressão absoluta em A
$P_B$	Pressão absoluta em B
$P_e$	Potência efetiva
$q_o$	Velocidade angular de <i>pitch</i> relacionada ao referencial móvel
$Q$	Vazão
$r$	Perturbação <i>yaw</i>
$\dot{r}$	Derivada de <i>yaw</i>
$r_o$	Velocidade angular de <i>heave</i> relacionada ao referencial móvel
$R$	Resistência ao avanço
$R_e$	Número de Reynolds
$R_F$	Resistência de atrito
$R_{RS}$	Resistência residual
$R_T$	Resistência total
$R_{Ts}$	Resistência total do navio
$s$	Variável
$S$	Área
$S_e(\omega)$	Espectro efetivo do vento

$S_F$	Área de passagem do fluido
$S_s$	Superfície molhada
$S_\omega$	Densidade espectral de potência
$S_\omega(\omega)$	Espectro do vento
$S_{\omega v}(\omega)$	Função de densidade espectral das ondas em consideração
$t_f$	Tempo de aproximação final
$\frac{T_j}{\zeta_a^2}$	Função quadrática de transferência do sistema
$\frac{T_x}{\zeta_a^2}$	Função de transferência quadrática dos esforços de deriva média em mar regular nas direções x
$\frac{T_y}{\zeta_a^2}$	Função de transferência quadrática dos esforços de deriva média em mar regular nas direções y
$\frac{T_n}{\zeta_a^2}$	Função de transferência quadrática dos esforços de deriva média em mar regular em torno de z
$u$	Perturbação <i>surge</i>
$\dot{u}$	Derivada de <i>surge</i>
$u_o$	Velocidade linear de surge relacionada ao referencial móvel
$U$	Velocidade do navio [m/s]
$v$	Perturbação <i>sway</i>
$\dot{v}$	Derivada de <i>sway</i>
$v_a$	Velocidade no ponto A
$v_b$	Velocidade no ponto B
$v_{cx}$	Projeção da velocidade da corrente segundo o eixo $x_b$
$v_{cy}$	Projeção da velocidade da corrente segundo o eixo $y_b$
$v_f$	Velocidade de entrada do propulsor

$v_F$	Velocidade do fluido
$v_o$	Velocidade linear de sway relacionada ao referencial móvel
$V$	Velocidade do fluido [m/s]
$V_c$	Velocidade da corrente
$V_{cr}$	Velocidade relativa da corrente em relação ao navio
$V_e$	Velocidade média do vento devido a rajada
$V_{fd}$	Volume de um fluido
$V_{fn}$	Volume de fluido
$V_l$	Volume de um objeto
$V_s$	Velocidade do tanque [m/s]
$V_X$	Velocidade do fluxo [m/s]
$V_\omega$	Velocidade total do vento
$\bar{V}_\omega$	Velocidade média do vento
$W$	Peso (N)
$W_e$	Número de Weber
$w_o$	Velocidade linear de yaw relacionada ao referencial móvel
$x$	Distância
$x_b$	Referencial do veículo para ação da corrente
$x_o$	Posição relacionada ao referencial inercial
$X_o$	Força a partir do sistema de referencia móvel
$X_u$	Força de amortecimento hidrodinâmico no eixo x
$X_{\dot{u}}$	Massa adicional no eixo x
$X_\omega$	Vetor de força da corrente em surge
$y$	Distância

$y_b$	Referencial do veículo para ação da corrente
$y_o$	Posição relacionada ao referencial inercial
$Y_o$	Força a partir do sistema de referencia móvel
$Y_r$	Força de amortecimento hidrodinâmico no eixo z
$Y_v$	Força de amortecimento hidrodinâmico no eixo y
$Y_{\dot{r}}$	Massa adicional no eixo z
$Y_{\dot{v}}$	Massa adicional no eixo y
$Y_{\omega}$	Vetor de força da corrente em sway
$z$	Variável z
$z_b$	Referencial do veículo para ação da corrente
$z_o$	Posição relacionada ao referencial inercial
$Z_o$	Força a partir do sistema de referencia móvel
$\alpha$	Escala do modelo
$\beta_{00}$	Ângulo de incidência das ondas
$\delta\theta$	Ângulo de inclinação
$\Delta$	Deslocamento de um navio
$\Delta P$	Diferença entre a pressão local e a pressão de vapor do fluido
$\Delta\omega$	Quantidade de energia por intervalo de frequência
$\epsilon_i$	Razão de aumento da angulação
$\zeta(x, t)$	Fator de elevação
$\zeta_a$	Amplitude da onda
$\zeta_i$	Amplitude do movimento induzido
$\eta'$	Matriz
$\eta_1$	Vetor denotador da posição em relação ao referencial inercial

$\eta_2$	Vetor denotador da orientação em relação ao referencial inercial
$\dot{\eta}_1$	Matriz de transformação de coordenadas
$\dot{\eta}_2$	Matriz de transformação de coordenadas
$\eta_{ref}$	Ponto de controle
$\dot{\eta}_{ref}$	Controle
$\eta_{sp}$	<i>Setpoint</i>
$\eta_{\omega 1}$	<i>Surge</i>
$\eta_{\omega 2}$	<i>Sway</i>
$\eta_{\omega 3}$	<i>Heave</i>
$\eta_{\omega 4}$	<i>Roll</i>
$\eta_{\omega 5}$	<i>Pitch</i>
$\eta_{\omega 6}$	<i>Yaw</i>
$\theta$	Ângulo de inclinação
$\theta_o$	Orientação relacionada ao referencial inercial
$\iota$	Ângulo entre a base da área e a incidência da força
$\lambda$	Escala inversa do modelo
$\lambda_i$	Comprimento de onda
$\mu$	Viscosidade dinâmica [N * s/m <sup>2</sup> ]
$\mu_\delta$	Diferença de frequência entre ondas
$\nu$	Viscosidade cinemática [m <sup>2</sup> /s]
$\nu'$	Matriz
$\nu_1$	Vetor denotador da velocidade linear em relação ao referencial móvel
$\nu_2$	Vetor denotador da velocidade angular em relação ao referencial móvel



$\pi_i$	<i>Varíavel adimensional do <math>\pi</math> de Buckingham</i>
$\pi_{im}$	<i>Varíavel adimensional do <math>\pi</math> de Buckingham aplicada a um modelo</i>
$\rho$	<i>Densidade mássica de um fluido/densidade do fluido [kg/m<sup>3</sup>]</i>
$\rho_0$	<i>Threshold</i>
$\rho_s$	<i>Densidade mássica de um fluido [kg/m<sup>3</sup>]</i>
$\sigma$	<i>Tensão superficial [N/m]</i>
$\tau$	<i>Vetor de forças e momentos dos atuadores</i>
$\tau'$	<i>Matriz</i>
$\tau_E$	<i>Vetor de forças ambientais</i>
$\tau_H$	<i>Vetor de forças hidrodinâmicas</i>
$\tau_n$	<i>Trabalho em sway</i>
$\tau_u$	<i>Força e momento relacionado aos propulsores no eixo x</i>
$\tau_{ux}$	<i>Controlador de surge</i>
$\tau_r$	<i>Forças e momento relacionado aos propulsores no eixo z</i>
$\tau_{rn}$	<i>Controlador de yaw</i>
$\tau_{Trab}$	<i>Trabalho</i>
$\tau_v$	<i>Força e momento relacionado aos propulsores no eixo z</i>
$\tau_{vy}$	<i>Controlador de sway</i>
$\tau_x$	<i>Trabalho em x</i>
$\tau_y$	<i>Trabalho em y</i>
$\tau_1$	<i>Vetor denotador de forças que atuam na embarcação a partir do sistema de referência móvel</i>
$\tau_2$	<i>Vetor denotador de momentos que atuam na embarcação a partir do sistema de referência móvel</i>
$\phi_i$	<i>Ângulo de fase aleatório uniformemente distribuído</i>

$\phi_o$	Orientação relacionada ao referencial inercial
$\phi_O$	Ângulo de fase
$\psi$	Ângulo de rumo
$\psi_c$	Direção da corrente
$\psi_d$	Ângulo de ajuste para aproximar ao way-point
$\psi_f$	Ângulo ajustado a ser utilizado pelo navio
$\psi_o$	Orientação relacionada ao referencial inercial
$\psi_r$	Ângulo da corrente
$\omega$	Frequência genérica
$\omega_i$	Frequência
$\omega_{xC}$	Velocidade angular em x
$\omega_{yC}$	Velocidade angular em y
$\omega_{zC}$	Velocidade angular em z
$\dot{\omega}_{xC}$	Aceleração angular em x
$\dot{\omega}_{yC}$	Aceleração angular em y
$\dot{\omega}_{zC}$	Aceleração angular em z
$\omega, \phi_{\omega vr}$	Direção da onda em relação à unidade flutuante
$\nabla$	<i>Volume deslocado</i>

## SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO</b> .....	30
<b>2 – METODOLOGIA</b> .....	35
2.1 – MOTIVAÇÃO.....	35
2.2 – DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	35
2.3 – OBJETIVOS.....	37
2.4 – METODOLOGIA DO TRABALHO.....	38
2.5 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	38
2.6 – ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	39
<b>3 – NAVIO</b> .....	40
3.1 – CONCEITO GERAL DO NAVIO.....	40
3.2 – PRINCÍPIO DA SEMELHANÇA.....	40
3.2.1 – Teorema $\pi$ de Buckingham.....	42
3.2.2 – Número de Froude ( $F_r$ ).....	43
3.2.3 – Número de Reynolds ( $R_e$ ).....	44
3.2.4 – Número de Cavitação ( $C_v$ ).....	44
3.2.5 – Número de Weber ( $W_e$ ).....	45
3.2.6 – Número de Mach ( $Ma$ ).....	45
3.3 – CICLO DO PROJETO.....	46
3.3.1 – Arranjo Geral.....	48
3.3.1.1 – Forma.....	48
3.3.1.2 – Compartimentação.....	48
3.3.1.3 – Superestrutura.....	48
3.3.2 – Máquinas.....	49
3.3.3 – Deslocamento, Trim e Banda.....	49
3.3.3.1 – Deslocamento $\Delta$ .....	49
3.3.3.2 – Trim.....	50
3.3.3.3 – Banda.....	50
3.3.4 – Medidas Lineares.....	51
3.3.5 – Coeficientes de Forma.....	52
3.3.5.1 – Coeficiente de bloco ( $C_b$ ).....	53
3.3.5.2 – Coeficiente prismático ( $C_p$ ).....	53
3.3.5.3 – Coeficiente da seção mestra ( $CM$ ).....	53

3.3.5.4 – Coeficiente de flutuação ( $C_f$ ).....	53
3.3.6 – Geometria do Navio.....	54
3.3.6.1 – Linhas do casco.....	54
3.3.7 – Comprimento Alagável.....	55
3.3.8 – Estabilidade Estática Intacta.....	56
3.3.8.1 – Centro de carena ( $B$ ).....	57
3.3.8.2 – Centro de gravidade ( $G$ ).....	58
3.3.8.3 – Metacentro ( $M_t$ ).....	58
3.3.8.4 – Altura metacêntrica ( $GM$ ).....	58
3.3.8.5 – Raio metacêntrico.....	58
3.3.8.6 – Momento de restauração e braço de endireitamento.....	60
3.3.8.7 – Curva cruzada de estabilidade ( $CCE$ ).....	61
3.3.8.8 – Curvas de estabilidade ( $CE$ ).....	62
3.3.9 – Estabilidade Estática Avariada.....	63
3.3.9.1 – Método da perda de fluviabilidade.....	63
3.3.9.2 – Método de adição de pesos.....	64
3.3.10 – Estabilidade Dinâmica.....	64
3.3.11 – Borda Livre.....	65
3.3.12 – Resistência ao Avanço e a Propulsão.....	66
3.3.12.1 – Resistência friccional.....	66
3.3.12.2 – Resistência de ondas (ou resistência residual).....	67
3.3.13 – Potência.....	68
3.3.14 – Linhas e Curvas de Bonjean.....	68
3.3.15 – Capacidade Cúbica e Pontal.....	69
3.3.16 – Projeto Estrutural.....	69
3.3.17 – Pesos.....	70
3.3.18 – Características do Protótipo.....	70
<b>4 – CINEMÁTICA E MODELAGEM DINÂMICA DA EMBARCAÇÃO.....</b>	<b>73</b>
4.1 – CINEMÁTICA.....	73
4.1.1 – Referencial Inercial e do Veículo.....	73
4.1.2 – Equações de Movimento.....	75
4.1.2.1 – Ângulos de Euler.....	75
4.1.2.2 – Matriz de transformação de coordenadas.....	76

4.1.3 – Equação Diferencial de Ângulos de Euler.....	76
4.2 – DINÂMICA DA EMBARCAÇÃO.....	78
4.2.1 – Modelo Linear Acoplado.....	81
4.2.2 – Modelo Linear Desacoplado.....	82
4.3 – HIDROSTÁTICA DO NAVIO.....	84
4.3.1 – Fluidos.....	84
4.3.2 – Viscosidade.....	84
4.3.3 – Pressão.....	84
4.3.4 – Densidade.....	85
4.3.5 – Empuxo.....	85
4.4 – HIDRODINÂMICA DO NAVIO.....	86
4.4.1 – Vazão.....	86
4.4.2 – Equação da Continuidade.....	87
4.4.3 – Equação de Bernoulli.....	87
<b>5 – MODELAGEM DAS PERTURBAÇÕES AMBIENTAIS.....</b>	<b>89</b>
5.1 – AÇÃO DAS ONDAS.....	89
5.1.1 – Esforço de Primeira Ordem de Ondas.....	91
5.1.2 – Esforços de Segunda Ordem de Ondas.....	91
5.1.3 – Operadores de Resposta em Amplitude.....	93
5.2 – AÇÃO DO VENTO.....	94
5.3 – AÇÃO DA CORRENTE.....	95
<b>6 – PROJETO DO SISTEMA DE GUIAMENTO NAVEGAÇÃO E CONTROLE.....</b>	<b>98</b>
6.1 – PLANEJAMENTO DA MISSÃO.....	98
6.1.1 – Escolha da Trajetória.....	99
6.2 – SISTEMA DE GUIAMENTO.....	102
6.2.1 – Algoritmo de Guiamento.....	103
6.2.2 – <i>Way-points</i> de Orientação Baseados na Linha Reta entre Dois Pontos.....	103
6.2.3 – <i>Way-points</i> de Orientação Baseados por <i>Line-of-Sight</i> .....	104
6.3 – SISTEMA DE NAVEGAÇÃO.....	105
6.3.1 – Observadores de Navegação Autônoma.....	105
6.4 – SISTEMA DE CONTROLE.....	106
6.4.1 – Lógica <i>Trajectory Tracking</i> .....	106
6.4.2 – Especificação de Desempenho.....	106
6.4.3 – Estratégia de Controle.....	108

6.4.3.1 – Controle de <i>Surge</i> .....	108
6.4.3.2 – Controle de <i>Sway</i> .....	110
6.4.3.3 – Controle de <i>Yaw</i> .....	111
<b>7 – SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL</b> .....	<b>113</b>
7.1 – MODELO.....	113
7.2 – MATLAB.....	113
7.3 – SIMULINK.....	114
7.3.1 – Sistema de Guiamento no Simulink.....	114
7.3.2 – Sistema de Controle no Simulink.....	115
7.3.3 – Blocos Complementares no Simulink.....	115
7.4 – RESULTADOS OBTIDOS.....	118
7.4.1 – Gráfico da Trajetória.....	118
7.4.2 – Gráfico da Velocidade <i>u</i> .....	119
7.4.3 – Gráfico da Velocidade <i>v</i> .....	120
7.4.4 – Gráfico da Velocidade <i>r</i> .....	121
7.4.5 – Gráfico da Força Longitudinal na direção <i>X</i> .....	122
7.4.6 – Gráfico da Força Transversal na direção <i>Y</i> .....	123
7.4.7 – Gráfico do Torque de Guinada <i>N</i> .....	124
<b>8 – CONCLUSÃO</b> .....	<b>125</b>
9.1 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	125
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>127</b>
<b>APÊNDICE A – PEQUENO DICIONÁRIO NAVAL</b> .....	<b>130</b>
<b>APÊNDICE B – CÓDIGOS MATLAB</b> .....	<b>132</b>
<b>ANEXO A – LÓGICA CONTROLADORES PI, PD E PID</b> .....	<b>135</b>
<b>ANEXO B – CARTA NÁUTICA 1511</b> .....	<b>138</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A Engenharia por ser a base do mundo contemporâneo é considerada como um dos principais pilares para qualquer grupo, nação ou indivíduo. Por sua parte, a Mecânica é um dos setores que mais cresce no ramo por completo, devido a ser o pilar de sustentação de todos os sistemas físicos existentes, seja por meio da análise de tensões em vigas ou da mecânica dos fluidos presentes em sistemas de refrigeração. Além das áreas citadas, uma possui um potencial ainda muito inexplorado, sendo essa a Engenharia Naval em conjunto com a Mecânica e a Eletrônica. A Mecânica é uma das mais antigas, com os sistemas de comercialização da antiguidade que se mantiveram até os tempos atuais, ela possui um grande histórico ligado ao ser humano. Contudo, um âmbito pouco explorado é a automação de sistemas navais, apresentando grande potencial devido às limitações físicas de transporte de suprimento, esse sistema se mostra como promissor para o mundo todo, especialmente para o Brasil.

O setor não tem a falta de investimentos, muito pelo contrário, é um mercado em alta, no Brasil, desde a descoberta das jazidas petróleo abaixo da camada de sal oceânica (o Pré-Sal) localizado ao norte do litoral fluminense na Bacia de Campos. Com o fim de atender as demandas sociais que se investem bilhões de dólares em novos procedimentos para a extração do óleo e outras matérias primas que podem ser encontradas. Tais investimentos produziram infraestruturas que atendam a área como plataformas, veículos submarinos operados remotamente (ROV, sigla em inglês para: *Remoted Operated [Underwater] Vehicle*), dentre outros equipamentos de auxílio. Por conta de sua proximidade com tais operações o estado do Rio de Janeiro se vê beneficiado com a sede de várias empresas do ramo. Visando atender essa demanda o desenvolvimento de projetos de guiamento, navegação e controle de Navios é visto como indispensável, em especial no que refere ao Guiamento Automático de embarcações.

Para poder trabalhar com sistemas de automação de embarcação, existe um ponto essencial que deve ser abordado para saber a localização geográfica precisa da mesma, o giroscópio. Segundo Fossen (2002), a invenção do mesmo foi um avanço fundamental para possibilitar o controle do navio, ao

permitir a medição e a realimentação do aproamento (*yaw*) no controle do navio, viabilizando o piloto automático.

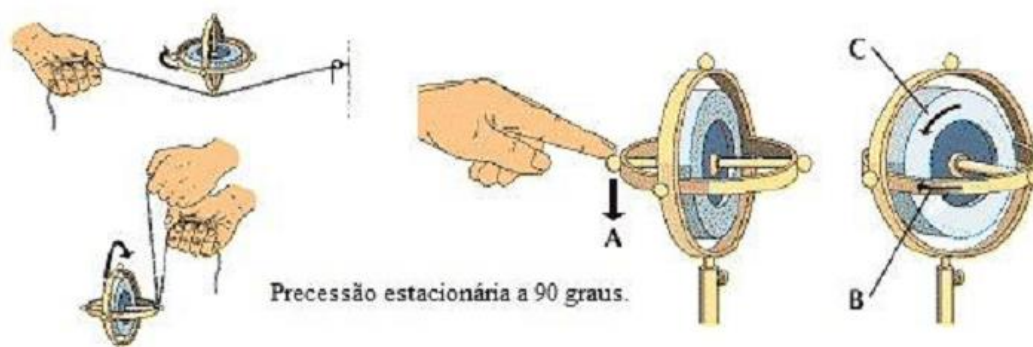


Figura 1: Ideia simplificada de um giroscópio

Fonte: Fossen (1999)

O giroscópio tem sua origem moderna nos experimentos de demonstração do físico francês Léon Foucault realizados em 1851, quando foi demonstrado que a rotação da Terra em torno de seu próprio eixo permanece mesmo com um pêndulo oscilando no seu mesmo plano. Em sequência a seus experimentos, em 1852 o físico concebeu o primeiro giroscópio, baseado no grego *gyros* que significa rotação para nomear o aparelho e do sufixo *skopein* (também do grego) por conta de ser um aparelho capaz de observar a rotação da Terra por um período de até 10 minutos (antes que a perda de energia por dissipação interrompesse o experimento).

Apesar de ter sido a primeira construção de um giroscópio moderno, *Die Maschine* (em português A Máquina) do astrônomo alemão Johann von Bohnenberger construída em 1817, o mesmo não serviu como base para os modelos posteriores. Para o entendimento da evolução desse sistema, deve-se citar o giroscópio acionado eletricamente, demonstrado pelo físico norte americano G. M. Hopkins em 1890, cuja principal motivação era habilitar uma navegação de maior confiabilidade para navios de aço e submarinos, visto que as bússolas magnéticas sofriam com distorções causadas pelos mesmos.

O modelo de giroscópio elétrico (girocompasso), era composto de três anéis móveis, montados em uma base rígida (como representado na Figura 1). A movimentação pode ter seu início a partir do eixo na posição desejada, de tal maneira que o mesmo irá manter sua orientação no espaço, independentemente do movimento que seja feito junto ao suporte, a partir do princípio da



conservação da quantidade de movimento angular. No início do século XX, dois físicos, o alemão Hermann Anschütz-Kaempfe e do norte-americano Elmer Ambrose Sperry, atingiram resultados semelhantes na aplicabilidade prática do giroscópio. Em 1908, Anschutz patenteou a primeira bússola giroscópica e em 1911, Sperry realizou a patente da bússola balística.

Devido a capacidade de orientação permitida pela bússola giroscópica, a mesma serviu como base para direcionar o controle do aproamento (*yaw*), seguindo os princípios desenvolvidos por Sperry. A partir desse desenvolvimento, Sperry construiu o primeiro projeto de piloto automático (chamado de Metal Mike) em 1911. Deste projeto foi desenvolvida a compensação para reduzir as variações do estado de mar. O engenheiro russo-norte-americano Nicholas Minorsky, um dos matemáticos centrais para a teoria do controle, foi responsável por apresentar em 1922 uma análise detalhada de um sistema de controle de posição por realimentação, neste foi gerada uma lei de controle com três termos, hoje conhecida como controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID), a partir do comportamento observado durante a atividade de um timoneiro ao controlar o navio.

A partir do entendimento obtido por meio da Figura 2, o controle de posição de navios recebeu um incremento no seu desenvolvimento e modernização entre os anos de 1950 e 1960, liderados pelos Estados Unidos da América. O primeiro projeto a abordar isso foi o projeto Mohole, do qual o navio Cuss I, dotado de quatro propulsores, esteve a uma distância de 948 metros do litoral na Califórnia e teve como objetivo escavar a crosta da Terra. A partir dos conceitos estabelecidos pelo giroscópio, segundo Fossen (2002), a Shell Oil Company lançou o navio de perfuração o Eureka em 1961. As capacidades do navio permitiram a execução de sondagens em linha d'água superiores a 1.300 metros, operando este navio em um mar com registro de ondas atingindo 6 metros de altura e com velocidade de vento de 21 metros por segundo. A partir desse princípio, em 1964 o navio Caldrill 1, pertencente a Caldrill Offshore Company, dotado da capacidade de perfurar até 2.000 metros de lâmina d'água. As aplicações do posicionamento dinâmico para operações *offshore* continuaram a se expandir nos Estados Unidos, especialmente na região do Golfo do México. Com a sua evolução atingindo um novo patamar em 1971, com a Sedco445, um navio com capacidade de deslocamento de 16.000 toneladas,

sendo este responsável por inaugurar a era industrial de perfuração petrolífera em águas profundas.

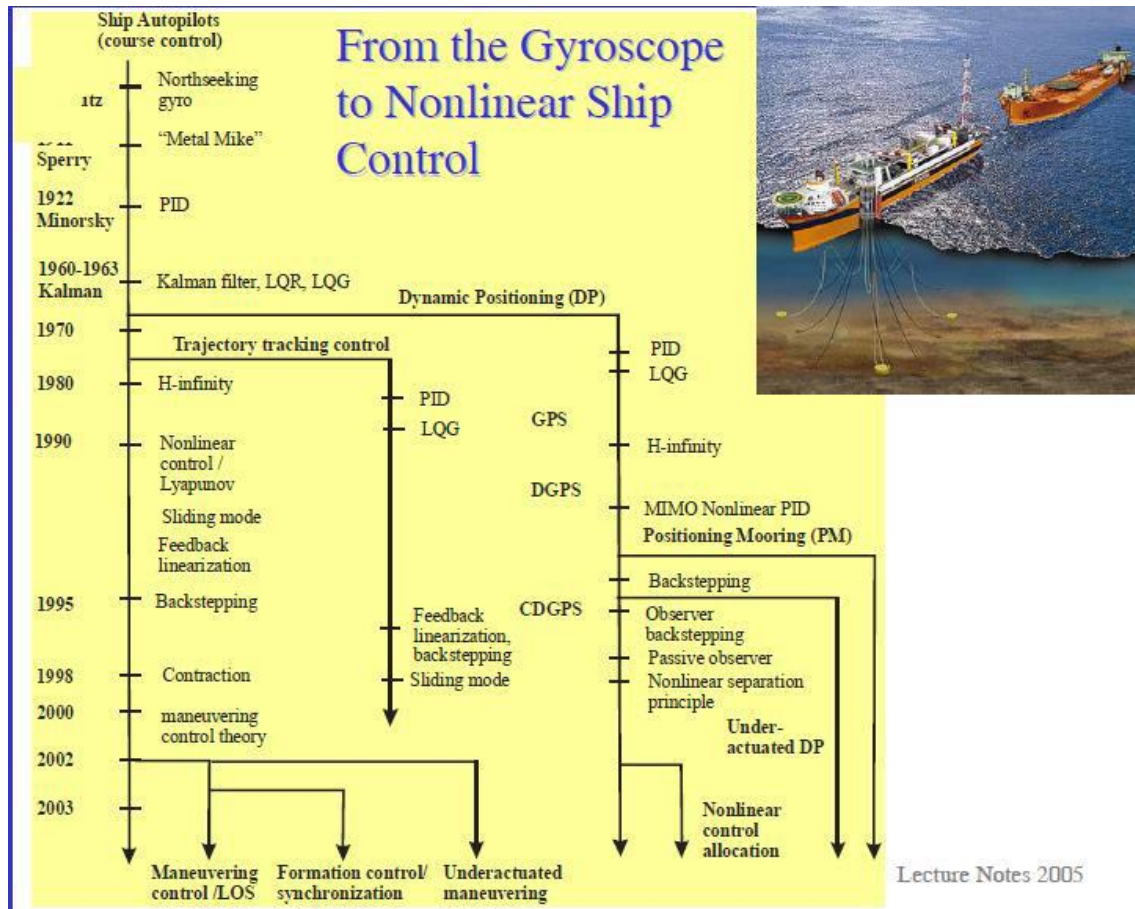


Figura 2: Evolução do giroscópio até o controle não linear do navio

Fonte: Fossen (2005)

Vale ressaltar que as inovações presentes neste ramo não foram de cunho exclusivo norte-americano, com a França sendo responsável pelo desenvolvimento quanto ao posicionamento de navios. Por meio de experimentos realizados pela empresa estatal francesa Gaz de France, esta foi responsável por um experimento no qual um antigo equipamento LCT (sigla em inglês para Veículo de transporte de tropas) foi alterado para incorporar equipamentos para o lançamento de dutos em 1963. Com o período marcado entre 1964 e 1975, experimentações *offshore* e operações realizadas com o Térébel foram responsáveis por demonstrar a possibilidade de executar as principais ações requeridas durante a exploração e a produção submarina de óleo e gás por navios que utilizem esse sistema.

É importante ressaltar o desenvolvimento ocorrido no Brasil, com os sistemas de sondas para posicionamento dinâmico, com as mesmas sendo

essenciais para operar em contratos de risco (especialmente no referente a produção de petróleo *offshore*). A Petrobras foi pioneira, com a contratação do Pelerin em 1984 (Linha d'água de 853 m). Com o desenvolvimento da exploração de petróleo no litoral norte fluminense (Bacia de Campos), foi necessário investir em outras unidades deste controle de posicionamento (todas terceirizadas), com os técnicos brasileiros da Petrobras sendo responsáveis por entender o sistema e se especializando nos mesmos. Por conta da expansão das operações, a frota de navios com esses equipamentos aumentou consideravelmente para suprir a demanda e conseguir cumprir as funções nas suas respectivas áreas de operação.

Segundo Fossen (2002), os sistemas de controle baseados em modelo aplicado a embarcações podem ser divididos em dois: "Modelos de Projeto Linear" e "Métodos de Projeto Não Linear". Uma linha do tempo se encontra presente na Figura 2, na qual é detalhada a modernização do controle não linear de um navio, a partir do Giroscópio.

Para a execução deste trabalho, é de vital importância que sejam explicados os termos Guiamento, Navegação e Controle de maneira simples podem ser definidos a seguir.

- Guiamento é o sistema responsável pelo cálculo contínuo da posição, velocidade e aceleração para uma determinada referência ou a um alvo de um veículo para ser utilizada como sinal de referência para um sistema de controle. Estes dados são normalmente oferecidos pelo operador ou por um sistema de navegação e resultam em uma ação sobre o sistema de navegação.
- Navegação é a ação de determinar em tempo real ou periodicamente o vetor de estados do navio, definindo a sua posição, atitude, velocidades lineares e angulares. É responsável por fornecer estas medições para o sistema de Guiamento e de Controle.
- Controle é o sistema que determina as forças e momentos que devem ser aplicados no veículo com o objetivo de cumprir o comando de referência fornecido pelo sistema de guiamento.

## 2 METODOLOGIA

Esse capítulo trata dos processos metodológicos empregados para poder dimensionar o projeto e dar a ele o embasamento teórico necessário para a sua realização.

### 2.1 MOTIVAÇÃO

Veículos autônomos com elevada autonomia e tempo de permanência na área de operação vem despertando o interesse da comunidade científica e tanto do público quanto do setor privado para suas aplicações. Com essas podendo ser o monitoramento de parâmetros ambientais, meteorológicos, oceanográficos e ecológicos, por meio de baixos custos de obtenção e operação.

Da mesma forma, a utilização desta categoria de veículos também tem sido objeto de interesse para as aplicações do setor da defesa e da segurança pública, por meio do monitoramento e da versatilidade.

Desta forma, o desenvolvimento de modelos matemáticos do sistema e simulações comportamentais da embarcação permite acessar o desempenho deste tipo de sistema em diferentes missões, bem como desenvolver e validar algoritmos de planejamento de missão, guiamento, navegação e controle em diferentes cenários de emprego. Justificando-se do ponto de vista acadêmico e econômico.

### 2.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A ideia do projeto, a princípio, foi concebida devido a situação física do CEFET-RJ Maracanã e sua proximidade com a região central e da Baía de Guanabara, junto da importância dessa atuação para o desenvolvimento da economia. Com uma simples observação ao passar pela Ponte Rio-Niterói que o tráfego marinho movimentava uma quantidade expressiva para o cenário municipal. Devido a sua centralidade entre áreas de exploração petrolífera, o município do Rio de Janeiro recebeu um aumento expressivo na movimentação de navios de grande porte em sua maioria cargueiros.

O cenário de embarcações na Baía de Guanabara foi tão extremo que em 14 de novembro 2022, o navio São Luiz abandonado, acabou colidindo com a Ponte Rio-Niterói e impactou o trânsito entre as duas cidades, efetivamente interrompendo a conexão entre elas. Tal impacto reforçou a necessidade de realizar uma limpeza da baía, com a autoridade portuária PortosRio comandando a retirada de 51 embarcações abandonadas até o dia 17 de maio de 2023. Na reportagem mais recente, do dia 19 de novembro de 2023, foi relatada a presença de 122 navios abandonados segundo o jornal O Globo.

Visando a evolução da economia brasileira, a Engenharia Naval e Offshore em parceria com a Engenharia Mecânica são áreas de extrema importância, com um constante investimento e com o desenvolvimento de novas tecnologias a serem usadas na movimentação de embarcações. Com a Petrobras sendo uma das principais protagonistas na área petrolífera, uma vez que ela é de questão extremamente estratégica para o seu desenvolvimento. O investimento em novas tecnologias nesta área está correlacionado com um aumento na demanda de embarcações adentrando a Baía de Guanabara.

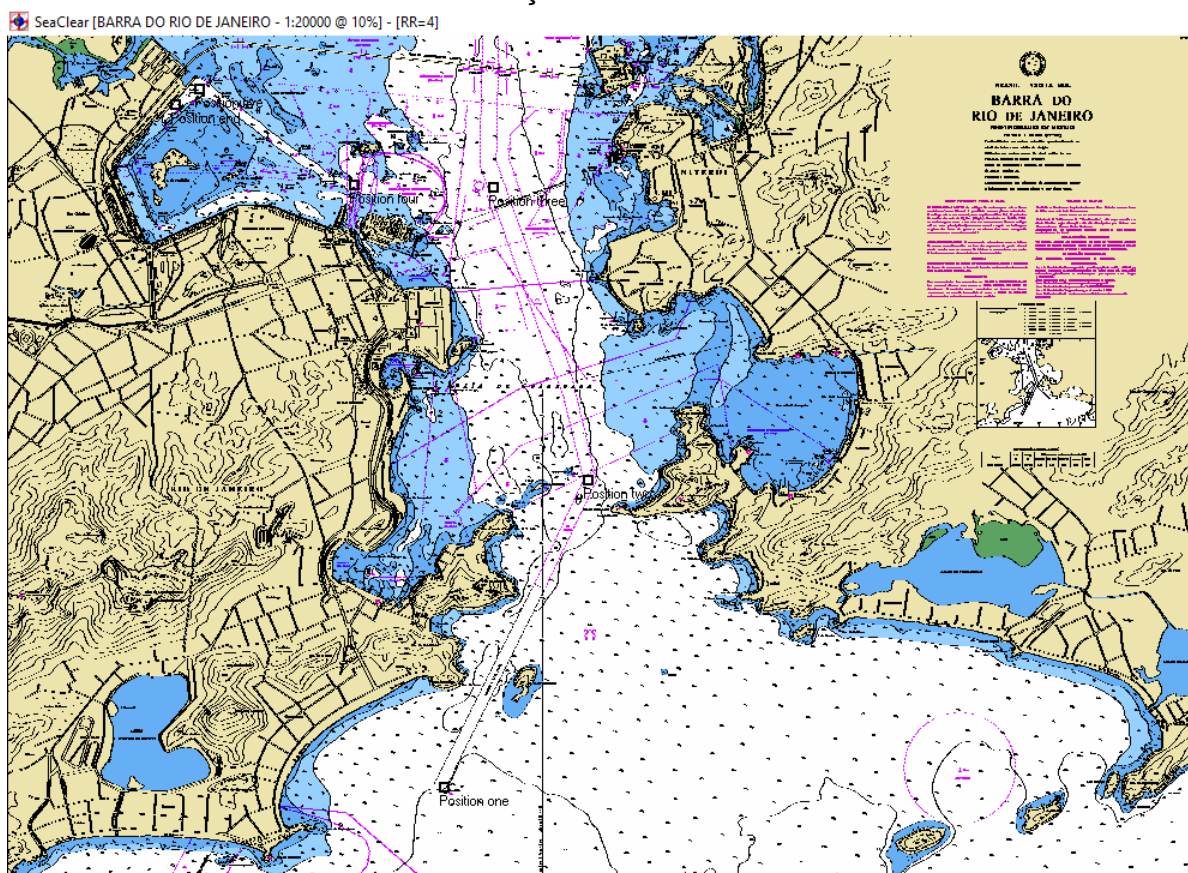


Figura 3: Carta náutica nº 1511

Fonte: Marinha do Brasil

Levando em conta as necessidades regionais do Rio de Janeiro, a partir da Figura 3, é possível verificar que as profundidades médias na Baía de Guanabara são: 3 metros na área do fundo (azul claro), 8,3 metros na altura da Ponte Rio-Niterói e de 17 metros no canal de entrada da barra (localizado no canto superior esquerdo). Esse problema de profundidade se dá por rios que desaguam na baía, dessa forma acumulando sedimentos e constituindo manguezais, estes envoltos pela vegetação da Mata Atlântica. Responsáveis por dificultar o tráfego marítimo na região do porto, dessa forma, resultando na necessidade de uma operação de aproximação precisa.

### 2.3 OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é contribuir para o desenvolvimento de sistemas de embarcações autônomas, a partir de simulações em espaço virtual nas plataformas da empresa Mathworks®: MATLAB e Simulink. Esse sistema visa a implementação de conceitos da engenharia mecânica como estática e dinâmica para simular a operação e viabilizar a construção de sistemas futuros. Visa-se também a implementação dos sistemas lógicos de guiamento, navegação e controle.

Para concretizar esses objetivos, foi planejada a execução de uma volta na piscina do CEFET-RJ Maracanã de maneira a não encostar nas fronteiras (bordas) da mesma, tal projeto deverá ser executado por uma embarcação em escala (1:60), seguindo os *way-points* definidos no estudo. Sendo considerado o sistema de navegação disponível na saída da medição dos estados dinâmicos do navio.

Após a execução do experimento, será obtida uma simulação completa do modelo matemático de execução do procedimento com acoplamento dinâmico de um navio. Tal simulação será analisada nas plataformas MATLAB e Simulink. Também espera-se obter um controlador por alocação de polos. Tais equações computacionais permitirão a execução de comandos automáticos do sistema de guiamento. Por fim, será realizada uma análise de desempenho do comportamento do sistema simulado na plataforma.

## 2.4 METODOLOGIA DO TRABALHO

A fim de garantir a execução adequada do projeto, utilizou-se de uma extensa revisão bibliográfica de embarcações semelhantes, sendo utilizada uma abordagem detalhada dos parâmetros referentes à dinâmica e ao controle do navio. O presente trabalho utilizou da modelagem e simulação da dinâmica da embarcação para possibilitar o desenvolvimento de algoritmos de guiamento, navegação e controle por meio dos *softwares* MATLAB e Simulink. Com o trabalho prevendo a simulação em malha fechada.

## 2.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para realização da revisão bibliográfica, foi utilizada uma extensa biblioteca de livros pertencentes a SNAME (Sociedade de Arquitetos Navais e Engenheiros Marinheiros) para elaboração dos dados normativos de navios. Sendo de suma importância para execução do presente trabalho, foram utilizados como os dois principais livros tanto para a parte naval, quanto mecânica e de automação os livros *Marine Control Systems* e *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, ambos do professor Norueguês Thor I. Fossen, sendo este o criador do projeto do navio *CyberShip II* original, modelo de embarcação de acesso gratuito obtido para a execução das simulações do presente trabalho.

Independentemente do projeto do *CyberShip II* reduzido ter sido usado para elaboração das simulações das lógicas de guiamento e controle, o conteúdo elaborado por Fossen, especialmente em seu livro *Marine Control Systems* foi essencial para o estudo da mecânica de embarcações e das lógicas de automação das mesmas. Também foram utilizados outros artigos para a elaboração do texto, para estudos de perturbações ambientais, para realização de *trajectory tracking*.

Deve-se mencionar as conferências realizadas pela Organização Marítima Internacional, responsável pela ITTC (Conferência Internacional de tanques de prova), responsável por várias normas abordadas no presente trabalho.

## 2.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Um ponto importante para qualquer trabalho de conclusão de curso é a elaboração dos seus capítulos de maneira a explicar a lógica e o conteúdo dos mesmos, sendo os capítulos organizados seguindo o modelo a seguir.

- Capítulo 1: Este capítulo aborda a introdução sobre o tópico do projeto.
- Capítulo 2: Este capítulo aborda a motivação, definição e o objetivo do trabalho, bem como metodologia e a revisão bibliográfica utilizada na elaboração do projeto.
- Capítulo 3: Este capítulo aborda o navio, detalhando as suas especificidades, normas e modelos.
- Capítulo 4: É apresentada a cinemática da embarcação, da tradução dos aspectos físicos para o campo matemático por meio do detalhamento acerca do referencial inercial do veículo, dos Ângulos de Euler, da matriz de transformação de coordenadas e da equação diferencial de Ângulos de Euler. Também é apresentado neste capítulo a Modelagem Dinâmica da Embarcação, por meio do estudo da hidrodinâmica, da hidrostática e da modelagem dos sistemas de apoio a embarcação.
- Capítulo 5: São apresentadas as modelagens das perturbações ambientais como ondas, vento e corrente.
- Capítulo 6: São apresentados os projetos dos sistemas de Guiamento, Navegação e Controle.
- Capítulo 7: É apresentada a simulação computacional da embarcação com os algoritmos dos sistemas de Guiamento e Controle e as análises dos resultados gerados a partir dos dados inseridos no capítulo 6.
- Capítulo 8: São apresentadas as conclusões, resultados alcançados e também as sugestões de trabalhos futuros.



### 3 NAVIO

Esse capítulo aborda as partes gerais de um projeto naval, com intuito de ilustrar o funcionamento de um sistema marítimo. Será foco de estudo os conceitos gerais, o princípio da semelhança e o ciclo do projeto.

#### 3.1 CONCEITO GERAL DO NAVIO

O projeto de um navio é um trabalho complexo que demanda dedicação e entendimento de vários assuntos de vital importância para as graduações de engenharia mecânica, e por meio do advento da computação e da automação de sistemas, da engenharia de controle e automação e da eletrônica. Tal sistema requer desde conceitos presentes na física clássica de Arquimedes, a física moderna newtoniana, até conceitos inovadores do século XXI, com o último sendo uma das motivações para o presente trabalho. A partir desses detalhes, é importante frisar os conceitos de suma importância para o entendimento do projeto, com a devida ênfase nos conceitos de engenharia naval, pouco presentes na graduação a qual este trabalho diz respeito.

#### 3.2 PRINCÍPIO DA SEMELHANÇA

Com a intenção de permitir uma modelagem matemática dos processos físicos permitindo sua compreensão, é essencial utilizar o princípio da semelhança. Seu início se dá por meio da análise dimensional, permitindo criar simulações de fenômenos físicos como elaborado por Arzanfudi (2016), sendo esta parte crucial para o atual contexto.

Para a que o projeto possa ser objeto de realização de testes e simulações, é imprescindível respeitar as leis de semelhança geométrica, cinemática e dinâmica. Tal sistema é muito útil para projetos industriais e comerciais, quando por meio do emprego de modelos em escala, se torna possível a observação e análise do comportamento dinâmico, o que seria impraticável em escala real. O exemplo mais famoso dessa utilização é o *towing tank* (Tanque de testes para embarcações em escala).

De acordo com Jentzsch (2002), o modelo e o original são considerados semelhantes quando todas as suas grandezas características homologadas apresentam uma relação constante entre si. A definição de constantes é dada por meio de grandezas básicas: comprimento e massa.

O sistema pode considerar a semelhança geométrica quando a escala matemática do modelo é respeitada. A mesma é entendida a partir de dois comprimentos genéricos  $L_R$  e  $B_R$  de um objeto em escala real e dos valores  $L_M$  e  $B_M$  de um modelo em escala distinta, resultam em uma constante de igual valor.

$$\frac{L_M}{L_R} = \frac{B_M}{B_R} \quad (3.1)$$

A partir da igualdade entre as relações, é possível encontrar a escala do modelo, definido por  $\alpha$  (letra grega alfa). Sendo importante ressaltar que o valor  $\lambda$  (letra grega lambda) representa o inverso de  $\alpha$ .

$$\alpha = \frac{L_M}{L_R} \quad (3.2)$$

A semelhança cinemática faz referência aos movimentos, sendo esta necessária para que se tenha a semelhança geométrica e de intervalos de tempo. A mesma existe quando os pontos homólogos (correspondentes) são iguais as relações de velocidade.

A semelhança dinâmica é constatada caso nos dois sistemas, os pontos equivalentes entre si mantenham uma mesma relação entre forças atuantes.

A partir dos pontos apresentados, pode ser constatada a importância de realizar as escolhas adequadas para que as semelhanças sejam cumpridas, dessa forma é possível encontrar respostas físicas para os problemas trabalhados. Para os navios, devem ser englobadas as forças de inércia, gravitacionais e de fricção. Com as variáveis trabalhadas sendo: Velocidade de avanço ( $V$ ), comprimento do navio ( $L$ ), densidade da massa do fluido ( $\rho$ ), a viscosidade dinâmica ( $\mu$ ), a aceleração da gravidade ( $g$ ) e a pressão por unidade de área ( $p$ ).

$$R \rightarrow f(\rho, V, L, \mu, g, p) \quad (3.3)$$

As variáveis relevantes para o navio sendo descritas a seguir.

- $\rho \rightarrow$  Massa específica de um fluido [ $kg/m^3$ ]
- $V \rightarrow$  Velocidade do fluido [ $m/s$ ]
- $L \rightarrow$  Comprimento característico [ $m$ ]
- $\mu \rightarrow$  Viscosidade dinâmica [ $N * s/m^2$ ]
- $\nu \rightarrow$  Viscosidade cinemática [ $m^2/s$ ]
- $g \rightarrow$  Aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ]
- $p \rightarrow$  Pressão [ $Pa$ ]

A resistência ao avanço ( $R$ ) é uma força, dessa forma, ela pode ser traduzida para a segunda lei de Newton.

$$F = m_g * A \quad (3.4)$$

Dessa forma, pode-se realizar a análise dimensional.

$$R \rightarrow \rho * V^2 * S = f\left(\frac{\rho * V * L}{\mu}, g * \frac{L}{V^2}, \frac{p}{\rho * V^2}\right) \quad (3.5)$$

Para encontrar a resistência, é necessário dividir  $\mu$  por  $\rho$ , dessa forma a viscosidade cinemática  $\nu$  será evidenciada.

$$\frac{R}{\frac{1}{2} * \rho * V^2 * S} = f\left(\frac{V}{L^2}, \frac{g * L}{V^2}, \frac{p}{\rho * V^2}\right) \quad (3.6)$$

### 3.2.1 Teorema $\pi$ de Buckingham

O teorema de  $\pi$  de Buckingham é responsável pela base para a adimensionalidade de expressões. O mesmo reduz o número de parâmetros que podem ser considerados independentes para caracterizar o processo.

Para uma equação que possui "n" grandezas ( $X_i$ ), estas podem ser combinadas para formar n-r grupos  $\pi_i$  adimensionais, sendo r responsável por representar o menor número de dimensões primárias necessárias para descrever as dimensões das grandezas presentes na equação. A determinação dos grupos  $\pi$  podem ser obtidas seguindo o procedimento abaixo.

Dadas  $n$  variáveis  $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  e uma função entre elas  $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0$ , listar todos os parâmetros  $n$  envolvidos. Expresse estes parâmetros em termos de suas dimensões primárias e define-se como  $r$  o número de dimensões presentes no problema.

Então temos  $nk = s$  termos  $\pi$  e reescrevemos a função  $f$  como:

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_n) = 0 \quad (3.7)$$

A partir dessa função pode-se estabelecer que, se o termo  $\pi_1$  contém a variável dependente que se quer, então:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \dots, \pi_s) \quad (3.8)$$

Quando aplicada a um modelo que seja em função das mesmas variáveis a equação 3.8 se torna:

$$\pi_{1m} = f(\pi_{2m}, \pi_{3m}, \pi_{4m}, \dots, \pi_{sm}) \quad (3.9)$$

Portanto encontramos que  $\pi_1 = \pi_{1m}$ .

$$f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \dots, \pi_s) = f(\pi_{2m}, \pi_{3m}, \pi_{4m}, \dots, \pi_{sm}) \quad (3.10)$$

Para muitas situações práticas, não é possível atender a todos os requisitos de similitude, resultando no modelo e no protótipo com semelhança (em geral dinâmica) incompleta. Independente disso, quando a semelhança dinâmica não é completa, os estudos com modelos fornecem informações úteis.

### 3.2.2 Número de Froude ( $F_r$ )

Definido por William Froude em 1868, este adimensional funciona como um elemento importante da teoria sobre as formas do casco, a velocidade de avanço e potência do navio. Segundo Triantafyllou e Hover (2003), esse adimensional aparece em problemas envolvendo condições de contorno de pressão como nas ondas do oceano. O mesmo relaciona forças inerciais e forças gravitacionais associadas à superfície da água (ação das ondas na superfície livre).

A lei de Froude é verificada em todos os ensaios de modelos de navios, ensaios de resistência, propulsão, comportamento no mar e manobrabilidade.

Seu cálculo é realizado pela razão entre a velocidade de serviço ( $m/s$ ) e a raiz quadrada da gravidade ( $m/s^2$ ) multiplicada pelo comprimento da linha d'água. Representado na equação a seguir.

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g * L_a}} \quad (3.11)$$

### 3.2.3 Número de Reynolds ( $R_e$ )

O Número de Reynolds é um parâmetro de velocidade não-dimensional importante nos fluxos viscosos. Ele é utilizado no modelo em escala e no protótipo para garantir a semelhança dinâmica (estando atuando em conjunto com as forças de inércia e atrito descritos pela Lei de Reynolds).

Quanto maior for o seu valor, mais turbulento será o escoamento.

$$R_e = \frac{V_x * L}{\nu} \quad (3.12)$$

Existe uma diferença no escoamento entre os modelos e os navios reais. Em escala reduzida o comportamento do escoamento é laminar ou subcrítico, enquanto para o tamanho real, o fluido apresenta um escoamento em regime turbulento.

### 3.2.4 Número de Cavitação ( $C_v$ )

O número de cavitação é utilizado como critério para o fenômeno de cavitação. O mesmo ocorre quando a pressão estática absoluta local cai abaixo da pressão de vapor do líquido e, portanto, causa a formação de bolhas de vapor no corpo líquido, isto é, o líquido entra em ebulição.

Um baixo número de cavitação significa a perda de pressão de Bernoulli através da superfície, o que resultará na vaporização do fluido, resultando em bolhas que prejudicam o desempenho e resultam na possível deterioração do material.

No estudo de fenômenos de cavitação, a diferença de pressão  $\Delta P$  é tomado como  $\Delta P = P - P_v$ ,  $\rho$  são condições da corrente líquida,  $P_v$  é a pressão do vapor líquido à temperatura do teste e  $v_f$  é a velocidade de entrada do propulsor. O parâmetro adimensional resultante é chamado de coeficiente de cavitação, sendo calculado pela seguinte equação.

$$C_v = \frac{\Delta P}{1/2 * \rho * v_f^2} \quad (3.13)$$

### 3.2.5 Número de Weber ( $W_e$ )

O número de Weber aparece naturalmente quando a tensão superficial desempenha um papel relevante, acontece na presença de uma interface entre diferentes fluidos ou aqueles em diferentes estados (líquido e gasoso). Seu cálculo sendo definido a seguir.

$$W_e = \frac{\rho * V^2 * L}{\sigma} \quad (3.14)$$

Este parâmetro é adimensional, sendo um indicador da importância da tensão superficial quando comparada com a força inercial.

### 3.2.6 Número de Mach ( $Ma$ )

O número de Mach aparece naturalmente quando deseja-se estabelecer a importância dos efeitos da compressibilidade no escoamento. Nos escoamentos de altas velocidades são observadas variações significativas da pressão, da massa específica e da temperatura. O número de Mach é definido da seguinte equação.

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (3.15)$$

Sendo  $c$  a velocidade do som no fluido, assume-se o seguinte.

- $Ma < 0.3$ : o escoamento é dito incompressível e a variação de massa específica, devido a mudanças da pressão é desprezível.

- $0.3 < Ma < 1.0$ : o escoamento é dito subsônico e embora a variação da massa específica (devido a mudança de pressão) não seja desprezível, não se observa formação de ondas de choque.
- $0.8 < Ma < 1.2$ : o escoamento é dito transônico. Ondas de choque começam a se formar e observa-se um aumento rápido da força de arrasto que atua sobre os corpos.
- $1.0 < Ma < 3.0$ : o escoamento é dito supersônico. Ondas de choque são observadas facilmente e pode-se identificar as direções características sobre as quais as informações sobre o escoamento se propagam.
- $Ma > 3.0$ : o escoamento é dito hipersônico. As altas temperaturas associadas às altas velocidades do fluido geram reações químicas e dissociação molecular.

### 3.3 CICLO DO PROJETO

O projeto de um navio é um problema complexo, sendo responsável por envolver áreas do conhecimento diferentes como mecânica, hidrodinâmica, naval, controle, elétrica, dentre outras, cada um para seus diferentes subsistemas, geralmente feito por uma equipe multidisciplinar. A espiral de Evans apresentada na Figura 4 sugere que conforme os aspectos do navio vão sendo definidos há a necessidade de retornar e atualizar elementos previamente considerados.

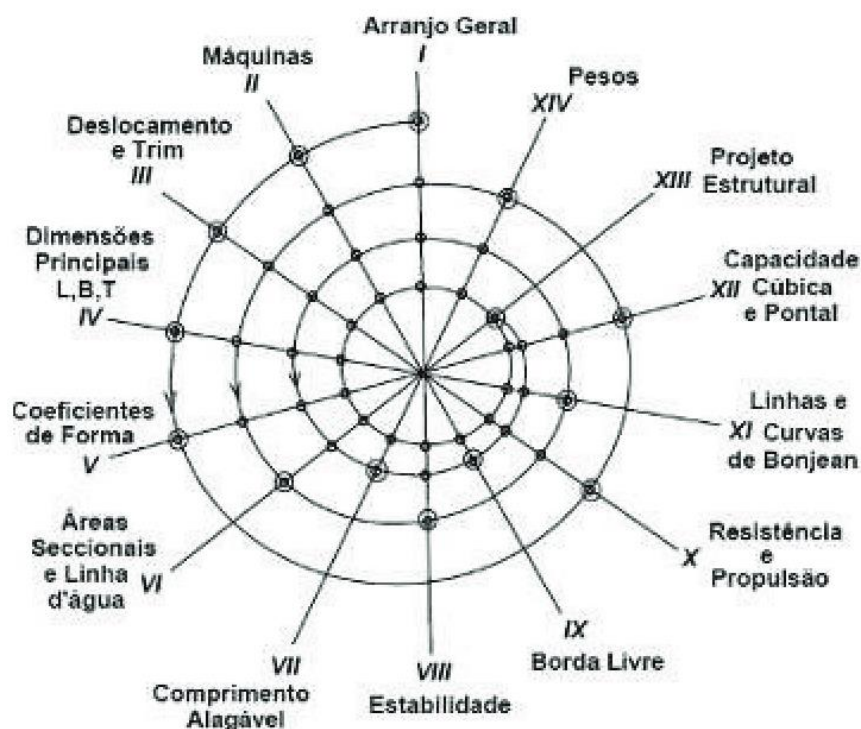


Figura 4: Espiral de Evans

Fonte: PUC-Rio

Inicialmente identifica-se as solicitações que a embarcação deve aceitar, para projetar o arranjo geral e os elementos funcionais (forma, propulsão, topologia estrutural) pode ser definida. Projetos de navios semelhantes servem de orientação para projetistas e engenheiros.

Por conta dos avanços computacionais, estão disponíveis alguns *softwares* que facilitam muitas etapas do projeto. Eles podem ser utilizados para a modelação do casco, através de superfícies, inserção de anteparas, conveses e depois podem ser exportados para formatos CAD (*Computer Aided Design* [Design auxiliado por computador]). É possível também gerar as tabelas hidrostáticas do navio.

A forma do casco da embarcação foi gerada utilizando o FreeShip®, no qual foi possível realizar a análise hidrostática da embarcação, de onde foram extraídos os valores do deslocamento, posição longitudinal do centro de carena e altura metacêntrica.

Esse modelo simplificado fornece as primeiras informações acerca do projeto conceitual de um pequeno navio autônomo, considerando diferentes



requisitos do projeto, tais como capacidade de carga, velocidade de operação, capacidade de manobra, dentre outros.

### 3.3.1 Arranjo Geral

O navio autônomo por possuir um tamanho reduzido se comparado ao Cybership II real, necessita adequar as posições para os motores azimutais, o túnel frontal, o computador de bordo, o rádio transmissor e as baterias.

Com o intuito de explicar o funcionamento de um navio, serão detalhadas as partes para um modelo em escala real.

#### 3.3.1.1 Forma

Este elemento possui a maior influência sobre os demais, deve ser dimensionada a fim de obter a menor resistência de avanço, sistema propulsivo eficiente, capacidade de carga, manobrabilidade satisfatória e estabilidade nas diversas condições de carregamento. Esta etapa é responsável por definir as dimensões principais aplicadas a geometria da carena.

#### 3.3.1.2 Compartimentação

Definido como a subdivisão do navio em compartimentos, dentre os quais têm-se: lastro, paióis, praça de máquinas, tanques. Responsabiliza-se, também em garantir a estabilidade e equilíbrio em diversas condições de carregamento.

#### 3.3.1.3 Superestrutura

Estrutura localizada sobre o convés principal, à vante, onde ficam localizados os alojamentos da tripulação e a ponte de comando. A realização do controle de equipamentos do sistema propulsivo, do posicionamento dinâmico, dentre outros é feito principalmente do passadiço, uma vez que este local conta com uma visão privilegiada do convés principal e dos equipamentos durante manobras. Também é responsável por possuir peso leve e auxiliar no equilíbrio.

### 3.3.2 Máquinas

As máquinas são os componentes que englobam os sistemas de propulsão e posicionamento dinâmico, sendo categorizados como o conjunto de equipamentos responsáveis por propelir a embarcação e garantir sua estabilidade.

São parte do conjunto os propulsores, as linhas de eixo, as engrenagens redutoras, motores; esses são pertinentes para movimentação frontal. Para correções e para garantir a estabilidade e o posicionamento dinâmico, são partes importantes os propulsores azimutais, os do tipo túnel e os do tipo "azipod".

A transmissão consiste dos seguintes equipamentos atuando em conjunto: engrenagens redutoras, linhas de eixo, acoplamentos fluidos, transmissão turbo ou diesel-elétrica com inversor de frequência.

### 3.3.3 Deslocamento, Trim e Banda

As três medidas são fundamentais para entender a dinâmica de um navio, com o deslocamento detalhando o volume de fluido deslocado, o trim a inclinação nas extremidades e a banda a inclinação nas laterais.

#### 3.3.3.1 Deslocamento $\Delta$

O deslocamento de um navio é dado pelo volume de fluido deslocado por sua parte submersa flutuando em águas tranquilas.

A flutuabilidade é assegurada por meio do Princípio de Arquimedes, este enuncia que o empuxo atuante na parte submersa de um corpo será igual ao peso do volume do fluido deslocado.

O peso do navio ( $W$ ) é definido como sendo igual ao peso da água deslocada, sendo este o volume imerso (em  $m^3$ ) multiplicado pelo peso específico da água (variável dependendo da temperatura e salinidade da água).

### 3.3.3.2 Trim

O trim é definido como a inclinação do navio para uma das extremidades, sendo as extremidades a popa (frente) e proa (traseira). Quando o navio tem trim pela proa, ele estará inclinado para vante (inclinado para frente), conseqüentemente, terá trim pela popa se estiver inclinado para ré. O trim também pode ser obtido através da diferença entre os calados AV (parte submersa da popa) e AR (parte submersa da proa).

O ato de compassar um navio é o de tirar o trim, isto é, trazê-lo à posição de flutuação direita quando estiver inclinado no sentido longitudinal.

Caso o navio possua trim, é preferível que o mesmo esteja apopado, tal fato se dar porque um navio abicado é mais propenso a embarcar água pela proa, isso se dá pela maior dificuldade de comandar o navio.

Utiliza-se a seguinte tabela para realizar as correções de trim.

Tabela 1 – Correção do trim

Trim	Localização	Correção
Proa	Ré	$-\delta\Delta$
Proa	Vante	$+\delta\Delta$
Popa	Ré	$+\delta\Delta$
Popa	Vante	$-\delta\Delta$

Fonte: O Autor (2023)

### 3.3.3.3 Banda

Banda ou adernamento é a inclinação para um dos bordos, sendo os bordos: bombordo (esquerda) e boreste (direita). O navio pode estar adernado, ou seja, ter banda para boreste ou para bombordo, com a mesma sendo medida em graus.

### 3.3.4 Medidas Lineares

As medidas lineares são as características físicas do navio correspondentes ao seu comprimento, largura e altura. A seguir serão definidos os três principais comprimentos.

- Comprimento total (*Lenght Over All* [LOA]) - É definido como as dimensões relacionadas ao dique onde o navio está construído.
- Comprimento na linha d'água (*Waterline Lenght* [LWL]) - É definido como o comprimento definido entre o ponto mais a ré e o ponto mais a vante do casco na linha d'água. Utilizado para cálculos hidrostáticos e hidrodinâmicos.
- Comprimento entre perpendiculares (*Lenght between Perpendiculars* [LBP]) - É definido como o comprimento entre as perpendiculares da popa e da proa. Em caso de valores de comprimento do navio não referenciado, entende-se como o comprimento entre as perpendiculares, pois a ele são referidos os principais cálculos da embarcação, como os que se referem à propulsão, ao peso, resistência e custo da estrutura.

Em relação ao plano transversal do navio, têm-se as seguintes medidas, tendo como referência as linhas de centro e linha de base.

- Boca (B - *beam*) - É definida como a maior largura do casco do navio, caso a mesma venha acompanhada do termo moldada significa que deve-se excluir a espessura do forro exterior.
- Pontal (D - *depth*) - É definida como a distância medida entre a linha de base até a interseção entre o costado e o convés.
- Calado (T - *draft*) - É definida como a altura da superfície da água até o ponto mais baixo do navio, vale ressaltar que em algumas situações, a linha de base não será o ponto mais baixo. É necessário ter atenção ao peso que a embarcação irá suportar, bem como o peso do volume deslocado de água para que seja garantida a flutuação do navio.

A representação destes pontos é observada na Figura 5, na qual pode-se observar a posição da boca, do pontal e do calado.



Figura 5: Dimensões lineares da seção transversal

Fonte: UEZO

### 3.3.5 Coeficientes de forma

São coeficientes adimensionais que auxiliam no projeto do navio. Relaciona áreas e volumes da carena com áreas e volumes de figuras planas ou sólidas circunscritas, sendo estes observados com auxílio da Figura 6.

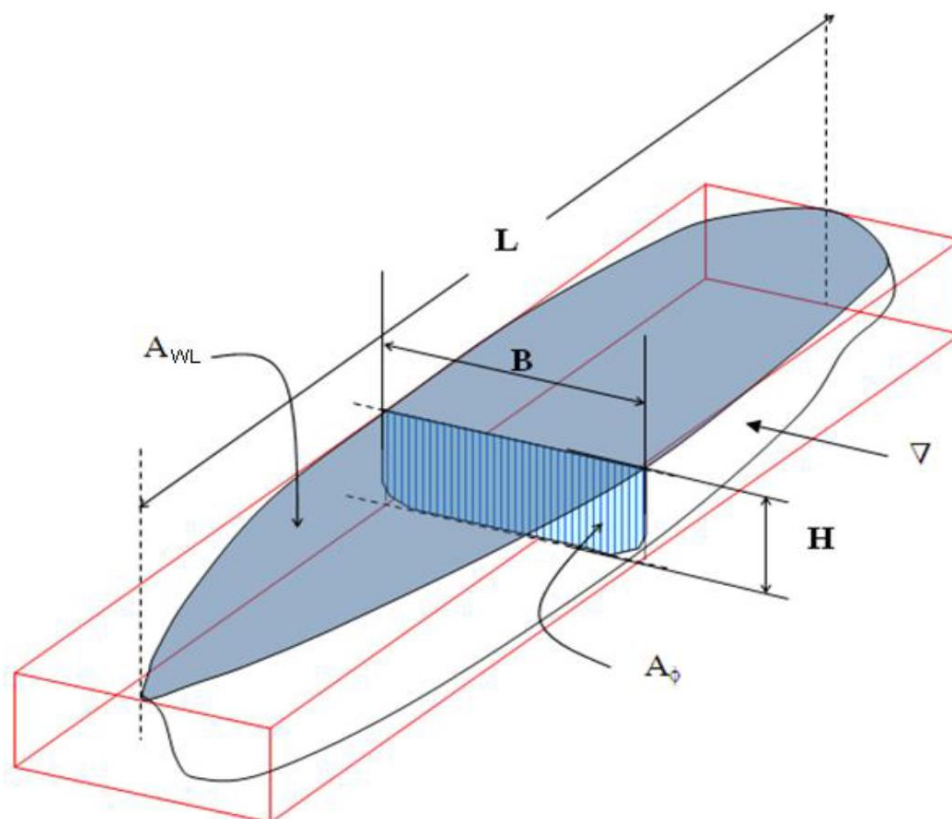


Figura 6: Coeficientes de forma

Fonte: USP (Professor Marcos M. O. Pinto)

### 3.3.5.1 Coeficiente de bloco ( $C_b$ )

Está relacionado com a razão entre o volume deslocado e o volume de um sólido de arestas  $LBP$ ,  $H$  e  $C$ . Quanto maior o  $C_b$  maior será a capacidade de carga.

$$C_b = \frac{\nabla}{LBP * H * C} \quad (3.16)$$

No qual  $\nabla$  representa o volume deslocado,  $LBP$  representa o comprimento entre as perpendiculares,  $H$  representa a boca e  $C$  representa o calado.

### 3.3.5.2 Coeficiente prismático ( $C_p$ )

Refere-se a relação entre o volume deslocado e o volume de um prisma, com o segundo sendo definido entre a área da seção mestra pelo comprimento entre perpendicularidades. Utilizado para os cálculos de potência e velocidade.

$$C_p = \frac{\nabla}{LBP * A_M} \quad (3.17)$$

### 3.3.5.3 Coeficiente da seção mestra ( $C_M$ )

Refere-se a razão entre a área da parte imersa da seção mestra e a área do retângulo com largura igual a boca e altura equivalente ao calado.

$$C_M = \frac{A_M}{H * C} \quad (3.18)$$

### 3.3.5.4 Coeficiente de flutuação ( $C_f$ )

Está relacionado com a razão entre a área de flutuação (no calado) e a área do retângulo circunscrito dado pelo produto entre o comprimento e a boca.

$$C_f = \frac{A_f}{LBP * H} \quad (3.19)$$

### 3.3.6 Geometria do Navio

A geometria do navio é definida como o conjunto das partes externas do navio, englobando os planos e linhas responsáveis pela composição física do mesmo.

#### 3.3.6.1 Linhas do casco

O plano de linhas é a representação da forma e dimensões do casco por meio de projeções de certas linhas em três planos ortogonais de referência. Esse método é usado com o intuito de simplificar a geometria tridimensional complexa do casco em uma forma mais simples, capaz de manter a precisão.

As linhas de interceptação serão linhas a duas dimensões, podem ser traçadas em verdadeira grandeza, caso projetadas em um dos planos de referência, com estas linhas sendo demonstradas na Figura 7.

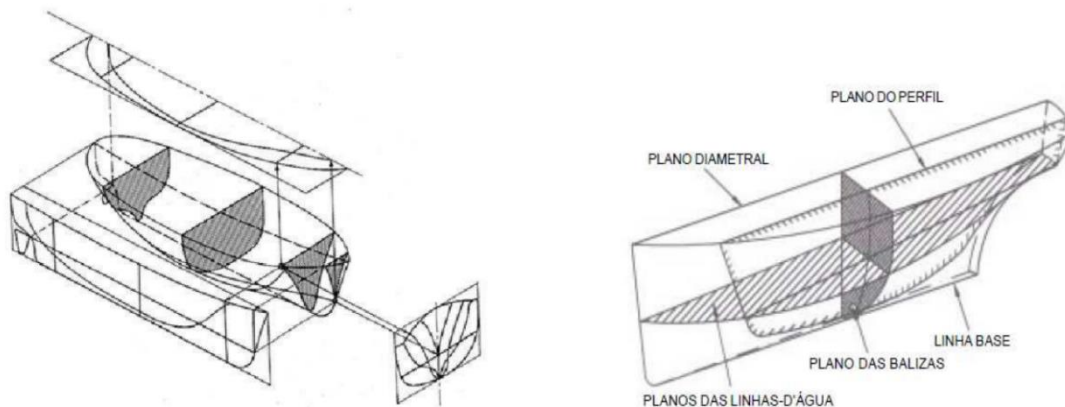


Figura 7: Planos imaginários de corte para construção das linhas

Fonte: Santiago, notas de aula (2023)

Os planos de referência são os seguintes.

- Plano de base moldada: É o plano horizontal tangente à parte inferior da superfície moldada. É a origem para todas as distâncias verticais, denominadas alturas.
- Plano diametral: É o plano vertical longitudinal de simetria do casco. É a origem para todas as distâncias transversais horizontais denominadas afastamentos, ou meias larguras, ou ainda meias ordenadas.

- Plano de meia-nau: É o plano vertical transversal a meio comprimento do navio.

Durante a construção são utilizadas as linhas de referências, sendo estas as seguintes.

- Linha de centro (LC): É uma linha de simetria numa seção horizontal ou numa seção transversal do casco.
- Linha da base moldada, ou linha base (LB): É a interseção do plano da base moldada por qualquer dos outros dois planos de referência.

A obtenção das linhas d'água ocorre por meio da interseção do casco com os planos horizontais. São usualmente denominadas de acordo com a altura acima do plano de base. A linha da base moldada é a linha d'água (LA) zero. O espaçamento destas linhas depende do calado do navio.

As linhas nas quais o navio flutua são denominadas linhas de flutuação e com frequência não são paralelas às linhas d'água do desenho de linhas, devido à distribuição de pesos durante a construção. A linha de flutuação corresponde ao calado para o qual o navio é projetado é denominada linha d'água projetada, na qual os navios são construídos para terem a quilha paralela à linha d'água projetada.

Por meio das interseções do casco por planos verticais longitudinais, define-se as linhas do alto. Essas são denominadas de acordo com seu afastamento do plano diametral. Geralmente, existem quatro dessas linhas espaçadas igualmente, a partir do plano diametral, que determina a linha zero.

Ao realizar cortes transversais no casco através de planos verticais imaginários, é possível obter-se o plano de balizas. Essa representação necessita apresentar apenas um dos seus bordos devido a simetria dos navios. Na Figura 7, ao lado direito estão as representações bidimensionais avante (AV) da seção mestra e, por conseguinte, representações de interseções a ré (AR) da seção mestra do lado esquerdo.

### 3.3.7 Comprimento alagável

Caso o casco de um navio venha a sofrer algum dano em um de seus compartimentos, ocorrerá um aumento do calado e conseqüentemente a posição do centro de carena será modificado, alterando as condições de estabilidade do



mesmo. Pode-se observar a posição das linhas d'água que podem ser alagadas na Figura 8.

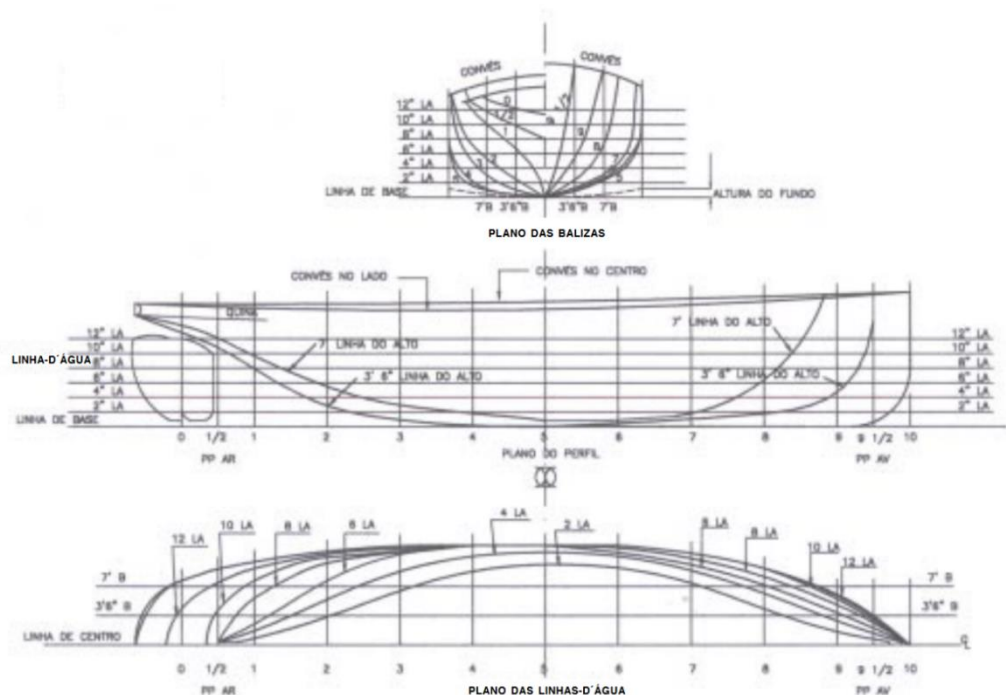


Figura 8: Planos de linhas

Fonte: Santiago, notas de aula (2023)

Tabela 2 – Linhas do navio

Vista do desenho de linhas (Planos)	Plano de referência em que são projetadas	Modo de apresentar as linhas do navio		
		Linhas d'água	Linhas do alto	Balizas
Linhas d'água	Plano da base	Verdadeira grandeza	Retas	Retas
Linhas do alto	Plano diametral	Retas	Verdadeira grandeza	Retas
Balizas	Plano de meia nau	Retas	Retas	Verdadeira grandeza

Fonte: Santiago (2023)

Para controlar esses riscos há nos navios um comprimento máximo de um compartimento, este é projetado para caso haja uma situação de alagamento, o navio permaneça flutuando com o convés no nível d'água. Por essa regra é admitida uma reserva de segurança que é determinada pelo fator admissível, com este variando de acordo com o comprimento do navio.

### 3.3.8 Estabilidade estática intacta

Estabilidade estática pode ser definida como a capacidade que o navio tem de voltar para a sua posição de equilíbrio quando o mesmo é imposto a uma perturbação no casco.

O tipo de equilíbrio de um corpo flutuante, ou seja, a estabilidade será definida pela forma como variam as forças que atuam sobre esse corpo quando é deslocado da sua posição inicial, existem três condições de equilíbrio, sendo estas representadas na Figura 9 e explicadas a seguir.

- Estável: Quando um corpo tem tendência a voltar à posição inicial quando afastado de sua posição.
- Instável: Quando um corpo não tem tendência a voltar à sua posição de equilíbrio quando afastado dela.
- Indiferente: Quando qualquer posição é uma posição de equilíbrio.

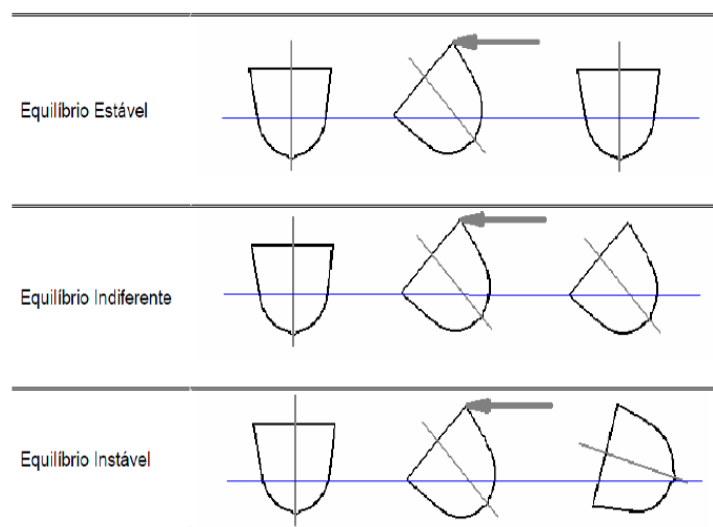


Figura 9: Condições de equilíbrio

Fonte: CEFET-RJ

Existem alguns parâmetros e conceitos necessários para quantificar as características de estabilidade do navio, sendo estes o centro da carena, o centro de gravidade, o metacentro, a altura do metacentro, o raio metacêntrico, o momento de restauração, a curva cruzada de estabilidade e as curvas de estabilidade.

#### 3.3.8.1 Centro de carena ( $B$ )

É o centro de gravidade do líquido deslocado pela carena, o qual pode ser considerado que neste ponto é aplicada a força de empuxo hidrostática.

### 3.3.8.2 Centro de gravidade ( $G$ )

A posição do centro de gravidade de um corpo depende da forma e da distribuição de pesos do mesmo. No caso de embarcações (que são parcialmente "ocas") a localização do centro de gravidade depende da posição do centro da gravidade do navio leve e de sua condição de carregamento.

### 3.3.8.3 Metacentro ( $M_t$ )

As diversas posições do centro de carena que correspondem às diferentes inclinações que o navio sofre determinam uma curva. O centro de curvatura para uma inclinação do tipo banda infinitamente pequena do navio é chamado de metacentro, ou, metacentro transversal, e coincide com o ponto M. O metacentro deve estar acima do centro de gravidade para existir o equilíbrio estável.

### 3.3.8.4 Altura metacêntrica ( $GM$ )

Definida pela distância entre o centro de gravidade e o metacentro. Quanto maior o valor de GM, maior será a aceleração da embarcação em ondas.

### 3.3.8.5 Raio metacêntrico

Definido como a distância entre B e M. Pode ser do tipo longitudinal ( $BM_L$ ) ou transversal ( $BM_T$ ). Com os valores sendo definidos pelas expressões.

$$BM_T = \frac{I_{LC}}{\nabla} \quad (3.20)$$

$$BM_L = \frac{I_L}{\nabla} \quad (3.21)$$

Nas equações,  $I_{LC}$  representa o momento de inércia da área de linha d'água em relação à linha de centro longitudinal,  $I_L$  representa o momento de

inércia da área de linha d'água em relação ao eixo transversal passando pelo centro de flutuação (F) e  $\nabla$  é o volume de deslocamento.

Supondo que o navio é inclinado de um pequeno ângulo  $\delta\theta$  a carena muda de forma tal que a cunha Fac passa para Fa'c', mudando o centro de empuxo B para uma nova posição B'. Um binário de empuxo E é adicionado devido ao acréscimo de empuxo no bordo do adernamento e um decréscimo no outro bordo. O momento resultante entre B e B' é igual ao momento resultante do binário acrescentado. Essas relações são observáveis na Figura 10.

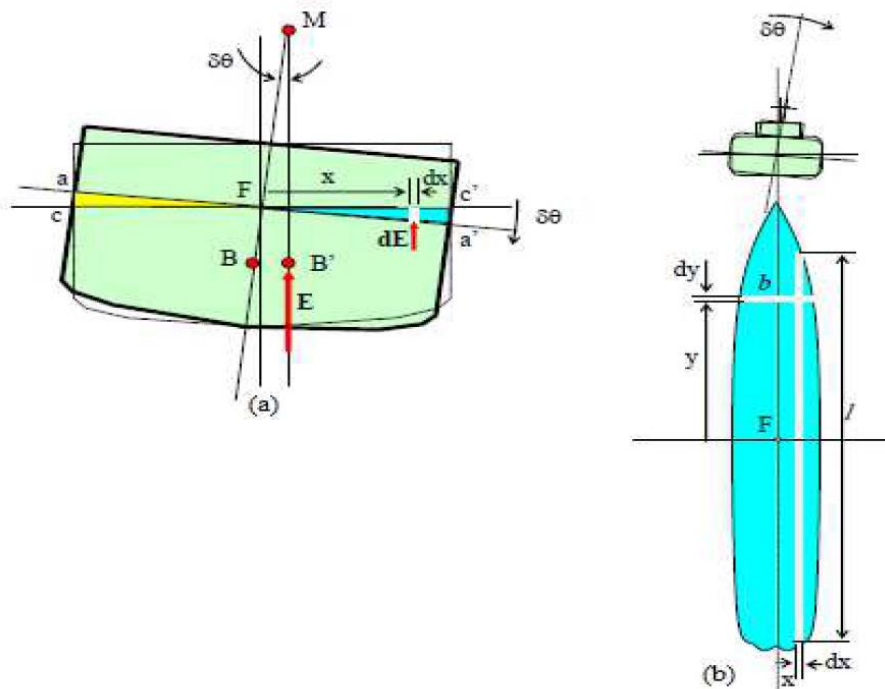


Figura 10: Raio metacêntrico

Fonte: Santiago

$$E * BM_T * \sin \delta\theta = \int \rho g (l dx) x * \tan \delta\theta * x \quad (3.22)$$

O empuxo  $E = \rho g \nabla$  e o ângulo  $\delta\theta$  é pequeno, podendo tomar que  $\sin \delta\theta = \tan \delta\theta = \delta\theta$ , dessa forma, temos a seguinte equação.

$$\nabla * BM_T = \int x^2 (l dx) = \int x^2 (dA) = I_{LC} \quad (3.23)$$

Com a mesma dedução podendo ser feita para o raio metacêntrico longitudinal, encontrando dessa forma.

$$\nabla * BM_L = \int y^2(bdy) = \int y^2(dA) = I_L \quad (3.24)$$

### 3.3.8.6 Momento de restauração e braço de endireitamento

Momento de restauração é o momento gerado pelo binário formado pelas forças peso e empuxo. Responsável por atuar no retorno à condição inicial da embarcação (G e B na mesma linha vertical).

O braço de endireitamento (GZ) é a distância horizontal entre o centro de gravidade e o centro de carena para um determinado ângulo de inclinação.

$$GZ = GM * \sin \theta \quad (3.25)$$

Quando o navio aderna promove uma mudança na geometria submersa e dessa forma ocorre mudança no centro volumétrico, transportando o centro de carena de B para B<sub>1</sub>, esse resulta no surgimento de um momento restaurador (ou emborcador), dependente da posição relativa do centro de massa do corpo em relação ao metacentro. Pode-se observar a condição inicial e a condição adernada na Figura 11.

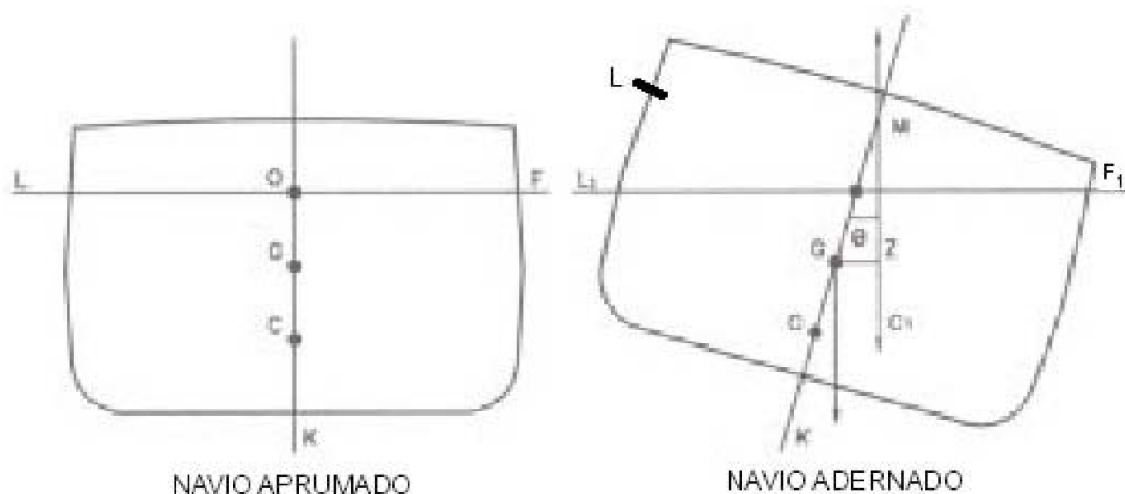


Figura 11: Centro de gravidade, centro de carena e metacentro

Fonte: UEA

A força peso do navio (W) estará aplicada no centro de gravidade ou centro de massa (G). A força empuxo será aplicada no centro de carena (B). Para que haja o centro equilíbrio G e B devem estar na mesma vertical.

Se  $G$  estiver acima de  $M_t$ , a embarcação pode estar flutuando normalmente, mas, qualquer distúrbio que provoque uma alteração na posição de equilíbrio fará com que a mesma tome uma banda permanente. O navio adernará e a posição do metacentro passa a ser acima da posição do centro de gravidade, dessa forma flutuando em equilíbrio instável (se  $GM < 0$  o navio é instável). Os modelos de equilíbrio podem ser observados na Figura 12.

Quando  $M_t$  está acima de  $G$  a altura metacêntrica é considerada positiva tendo um navio flutuando em equilíbrio estável. Considera-se  $GM=0$  como equilíbrio neutro.

Na situação de equilíbrio estável o momento restaurador é importante e define o ângulo de banda devido a uma solicitação externa qualquer e pode ser calculado por meio da seguinte equação.

$$M(\theta) = \rho * g * \nabla * \sin \theta \quad (3.26)$$

Para a equação, toma-se  $\nabla$  como o volume deslocado pelo fluido e  $\theta$  como o ângulo de banda.

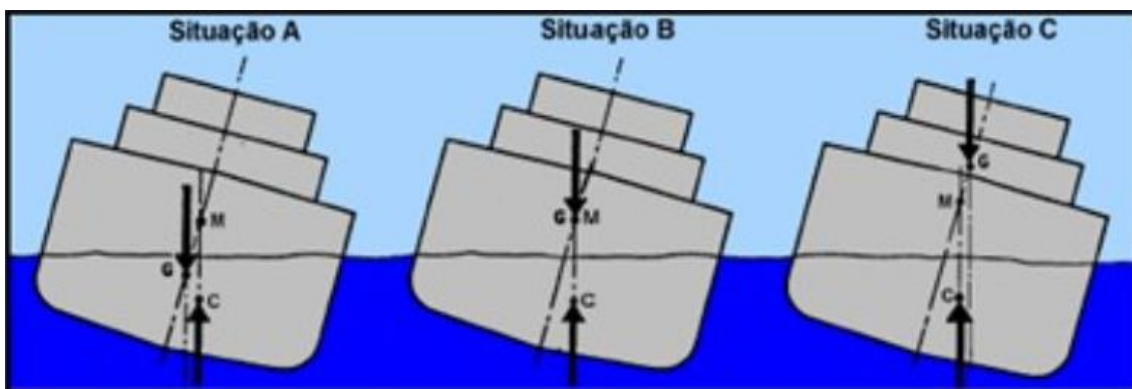


Figura 12: Equilíbrio estável (A), neutro (B), instável (C)

Fonte: USP

### 3.3.8.7 Curva cruzada de estabilidade (CCE)

A curva cruzada de estabilidade (CCE) fornece para diferentes tipos de deslocamento e ângulo de banda, o braço de endireitamento para uma posição de referência do centro de gravidade.

Os cálculos da curva resultam em um valor de braço de endireitamento  $GZ$  para um valor de  $\Delta$  em cada inclinação  $\theta$  em função de certa posição

adotada arbitrariamente para  $G$ . É imprescindível que nas curvas cruzadas fique registrado claramente qual a posição adotada para  $G$ , no cálculo das mesmas. De outro modo o uso das curvas cruzadas será inviável.

Trata-se de uma informação muito valiosa para um navio. Com auxílio destas curvas será possível traçar curvas de estabilidade para qualquer condição de carga e posição do centro de gravidade do navio. A CCE pode ser observada na Figura 13.

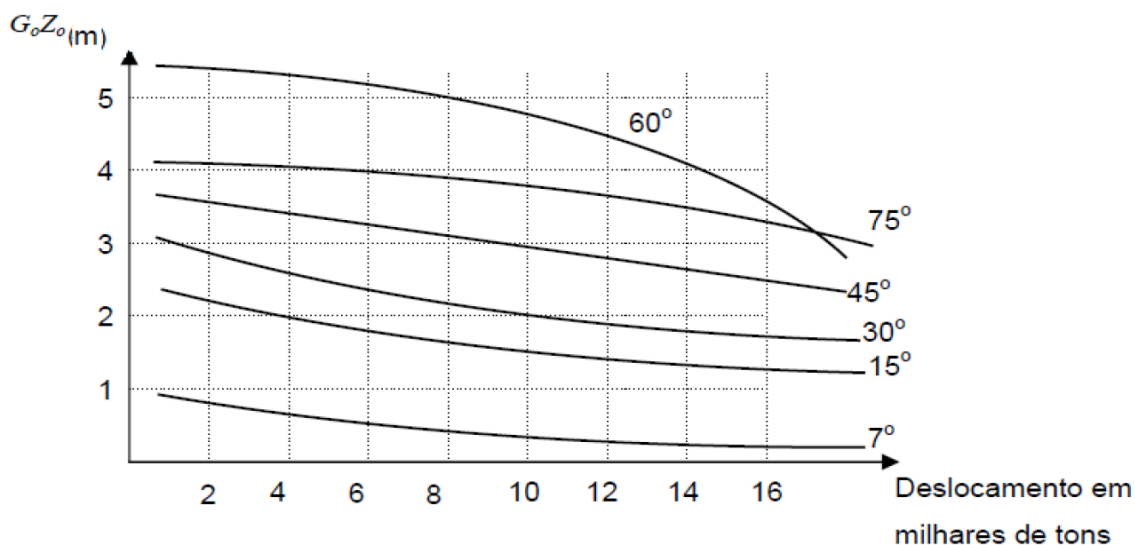


Figura 13: Curva cruzada de estabilidade

Fonte: Santiago

### 3.3.8.8 Curvas de estabilidade (CE)

A CCE contém todas as informações sobre a estabilidade da embarcação em um determinado calado. Representa, também o braço de endireitamento em função do ângulo de inclinação ( $GZ * \theta$ ). As curvas de estabilidade (CE) podem ser observadas na Figura 14.

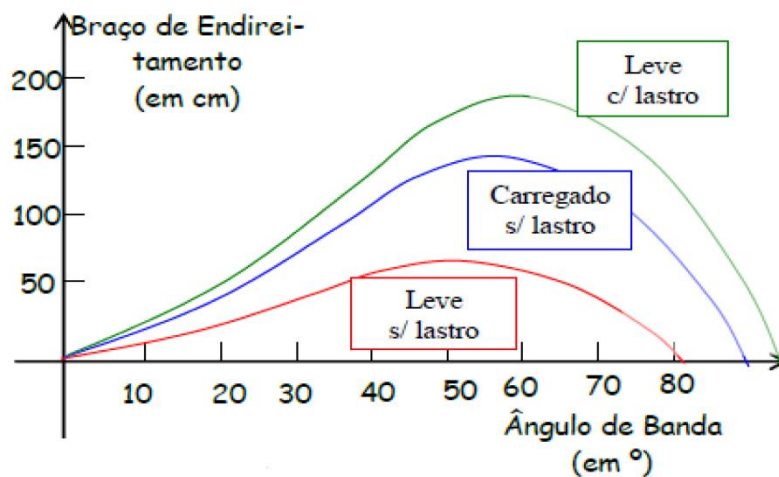


Figura 14: Curvas de estabilidade

Fonte: Santiago

A partir dela obtemos elementos para se comparar o navio em estudo com outros navios cujo comportamento no mar é reconhecidamente satisfatório. Assim é possível estabelecer critérios que dirão se o navio em estudo é ou não adequado para o fim destinado. Está relacionada ao deslocamento e à posição de G.

### 3.3.9 Estabilidade estática avariada

Estabilidade em avaria de um navio é a capacidade de resistir a situações de danos causados pelas inundações. Segundo Chakrabarti (2005), a embarcação deve ser compartimentada o suficiente para resistir ao alagamento do mar de qualquer compartimento principal. A acumulação de água no casco normalmente reduz o centro de gravidade e aumenta a altura metacêntrica. Inundações de um compartimento resulta em afundamento ou trim.

Existem dois métodos de avaliação de estabilidade nesta condição para determinar as novas propriedades hidrostática dos navios que, após um alagamento continuam com flutuabilidade.

#### 3.3.9.1 Método da perda de flutuabilidade

Neste método o volume inundado é tratado como o volume submerso perdido. O volume de flutuabilidade perdido é igual ao volume de água deslocada



pelo compartimento alagado, antes da avaria, menos a reserva de flutuabilidade eventualmente existente neste compartimento (abaixo da linha d'água inicial).

O novo calado e trim deverão ser estimados e iterações deverão ser realizadas para conseguir a posição final do navio.

### 3.3.9.2 Método de adição de pesos

Neste método a água inundada é tratada como o peso adicional. Com a adição do peso, o volume deslocado e o calado da embarcação sofrem alterações e há mudança na localização do centro de gravidade.

Uma nova condição de equilíbrio deverá ser calculada, isto é, os cálculos a vante e a ré e a banda tomada. Correções para área de plano de linha d'água perdida e deslocamento deverão ser ajustados até calado da atual condição. É necessário a repetição dos cálculos para obter resultados convergentes.

A dificuldade desse método reside no fato de não se conhecer a priori a quantidade de água embarcada em virtude da avaria, visto que não se conhece a linha d'água final.

### 3.3.10 Estabilidade Dinâmica

Enquanto navega a embarcação está sujeita a perturbações ambientais, como as ondas do mar e o vento, que impõem dinâmica ao movimento e afastam o navio da posição de equilíbrio, com sua inclinação sendo representada pela angulação de  $\theta$ .

A estabilidade dinâmica de um navio para um determinado ângulo de inclinação é definida como o trabalho ( $\tau_{Trab}$ ) realizado sobre o corpo para esse ângulo (ignorando todo o trabalho feito contra o ar ou a resistência à água). Podendo ser medido com a equação a seguir.

$$\tau_{Trab} = M * \Delta\theta \quad (3.27)$$

Nos movimentos do navio o momento de restauração não é constante, mas sim uma função de  $\theta$ . Assim o trabalho envolvido para adernar o navio de  $\theta_1$  para  $\theta_2$  a partir da seguinte integral.

$$U = \int_0^{\theta} M d\theta \quad (3.28)$$

A partir de  $M = b * \Delta$ , por meio de  $\Delta$  ser constante a equação pode ser reescrita da seguinte forma.

$$U = \Delta * \int_0^{\theta} b d\theta \quad (3.29)$$

A curva de estabilidade estática (CEE) fornece para uma dada posição do centro de massa, a determinação dos braços de endireitamento em função do ângulo, para qualquer deslocamento do navio. Auxilia a determinar o trabalho necessário para levar a embarcação a uma inclinação de um determinado ângulo ( $\theta_1$  para  $\theta_2$ ). Esse trabalho é igual a área sob a CEE entre estes dois ângulos, sendo demonstrado na Figura 15.

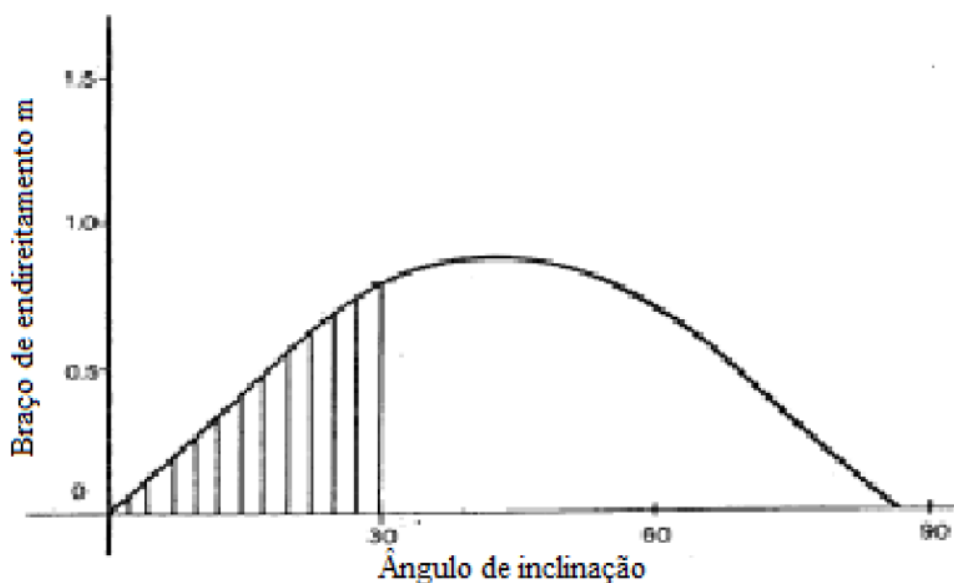


Figura 15: CEE relacionada ao trabalho/energia

Fonte: Santiago

### 3.3.11 Borda Livre

A borda livre é a distância vertical entre a superfície da água e o convés principal. Essa medida é necessária para garantir uma reserva de flutuabilidade, a qual afeta diretamente o equilíbrio e a estabilidade da embarcação. Além disso, é responsável por determinar o calado máximo da mesma, a fim de garantir que

não aja perda de estabilidade. É importante para os navios em caso de avaria, pois possui uma relação proporcional direta, caso possua uma borda livre menor, o mesmo será menos capaz de suportar acidentes no mar.

Para efeitos de cálculos da mesma, existe um padrão pré-estabelecido pela IMO (sigla em inglês para Organização Marítima Internacional) por meio do trabalho publicado em 1966 "*International Convention on Load Lines*" (em tradução direta Convenção internacional em linhas de carga).

### 3.3.12 Resistência ao Avanço e a Propulsão

A resistência do navio a uma velocidade constante é a força necessária para rebocar o mesmo a uma velocidade em águas tranquilas.

O cálculo da resistência ao avanço é fundamental na escolha do propulsor e do motor, uma vez que são os meios pelos quais o navio superar a resistência. A mesma é basicamente influenciada pela forma do casco, pela velocidade e pelo deslocamento do navio.

Prever a força necessária para mover o casco a uma determinada velocidade é uma tarefa difícil, uma vez que devem ser levados em conta os efeitos da viscosidade no fluido e da interação entre estas partes com os efeitos ondulatórios na superfície livre. Devendo-se compreender as duas forças de resistência que atuam no navio.

#### 3.3.12.1 Resistência friccional

Corresponde à força de atrito exercida pelo fluido sobre a carena do navio, com essa ocorrendo por conta da propriedade viscosa da água. A mesma é diretamente proporcional à área de superfície molhada do casco.

A variação de velocidade ocorre com maior intensidade nas proximidades da superfície do corpo e diminui com o aumento da distância ao mesmo. Deve-se ressaltar que a região entre a superfície do navio e o fluxo exterior forma uma camada limite. As mudanças de velocidades rápidas na direção normal na camada limite induz altas tensões de cisalhamento. Com a integral destas tensões sobre a superfície molhada sendo responsável por produzir a resistência por fricção.

Essa está associada diretamente ao parâmetro físico representado pelo número de Reynolds, cuja relação entre magnitude das forças viscosas e as inerciais de um escoamento são trabalhadas.

### 3.3.12.2 Resistência de ondas (ou resistência residual)

Essa força surge sobre o casco devido à geração de ondas que rodeiam o navio conforme o mesmo avança no mar, com essa formação sendo praticamente imperceptível para baixas velocidades. Contudo, a partir de uma velocidade mais elevada torna-se claramente perceptível, com seu crescimento acompanhando diretamente o da velocidade. A resistência de ondas depende intrinsecamente da geometria do corpo e é uma função do número de Froude.

A partir do método ITTC (*International Towing Tank Conference*) realizada em 1957, a resistência total pode ser calculada a partir da seguinte equação que utiliza da resistência do atrito ( $R_F$ ) e da resistência residual ( $R_{RS}$ ).

$$R_T = R_F + R_{RS} \quad (3.30)$$

Com os coeficientes de atrito e residual sendo definidos pelas seguintes equações.

$$C_{RS} = \frac{R_T}{1/2 * \rho * S * V^2} \quad (3.31)$$

$$C_F = \frac{0,075}{(\log Re - 2)^2} \quad (3.32)$$

A partir dos coeficientes de atrito e residual, o coeficiente de resistência total  $C_{TS}$  para o navio pode ser estimado, utilizando de  $C_A$  (coeficiente de arrasto). A seguir segue as fórmulas para realizar os cálculos de ambos os coeficientes.

$$C_A = 0,35 * 10^{-3} - 2 * LBP * 10^{-6} \quad (3.33)$$

$$C_{TS} = C_{FS} + C_{RS} + C_A = C_{FS} + (C_{Tm} - C_{Fm}) + C_A \quad (3.34)$$

A resistência total do navio pode ser prevista para uma velocidade real ( $V_s$ ), com essa podendo ser dada pela seguinte equação.

$$R_{TS} = C_{TS} * 0,5 * \rho * V_s^2 * S_s \quad (3.35)$$

### 3.3.13 Potência

A potência efetiva (ou de reboque) é o valor de potência necessária para vencer a resistência do navio para uma dada velocidade, essa sendo necessária para manter o movimento do mesmo. Seu valor é dado a partir da velocidade do navio ( $U$ ) e da resistência total ( $R_T$ ).

$$P_e = U * R_T \quad (3.36)$$

Devido as perdas ocorridas no sistema propulsivo, à transmissão e ao próprio motor, a potência instalada sempre deverá ser maior do que a efetiva.

### 3.3.14 Linhas e Curvas de Bonjean

As linhas e curvas de Bonjean são vitais para obter o volume da geometria submersa ( $\nabla$ ) do navio, utilizando a área das balizas (observadas na Figura 16).

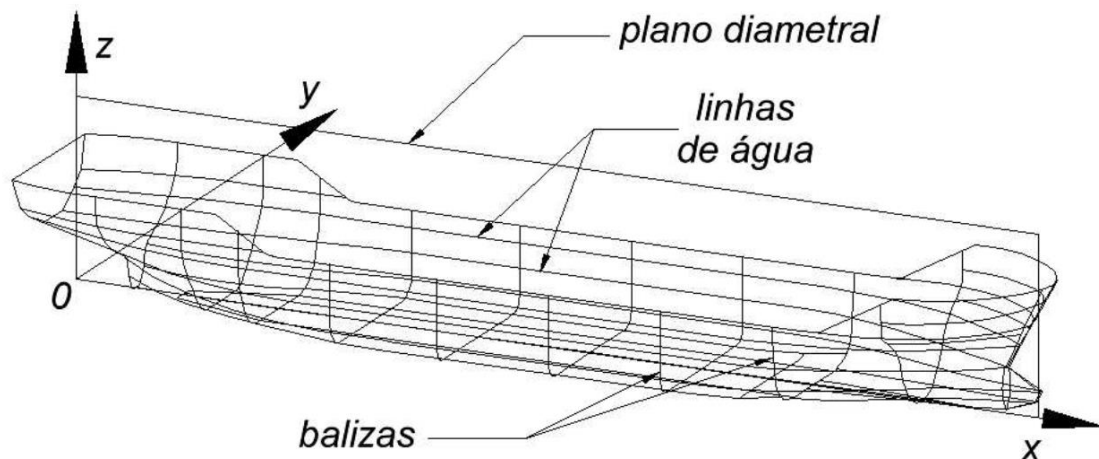


Figura 16: Áreas de baliza

Fonte: Instituto Técnico Superior de Lisboa (2014)

Estas áreas para cada calado do navio são apresentadas nas curvas de Bonjean (representadas na Figura 17), a partir dos quais pode-se obter o deslocamento do navio em condição de trim.

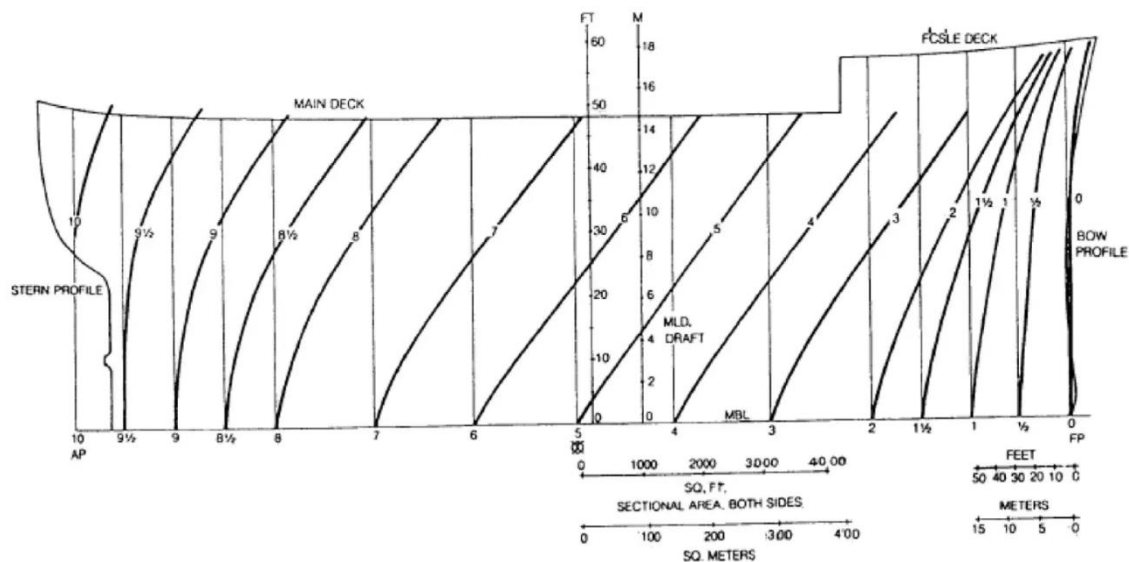


Figura 17: Curvas de Bonjean

Fonte: Lewis (1988)

### 3.3.15 Capacidade cúbica e pontal

A capacidade cúbica (também chamada de cubagem) representa o volume dos espaços utilizáveis para carga em um navio. Em geral estes são denotados em metros cúbicos ou pés cúbicos e são de vital importância para o comércio marítimo.

### 3.3.16 Projeto Estrutural

Este é composto dos elementos responsáveis pela manutenção da integridade da embarcação sob ação dos esforços aos quais a mesma está submetida. Representado na Figura 18, suas definições e detalhamentos encontrados no apêndice.

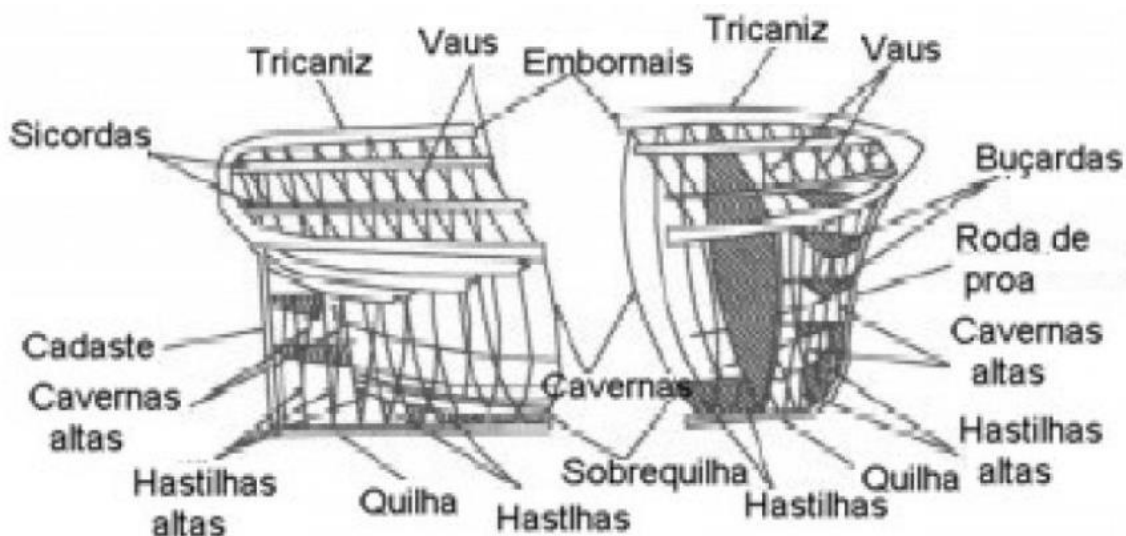


Figura 18: Reforços do navio

Fonte: USP

### 3.3.17 Pesos

O peso leve é composto pelo peso de aço do casco e da superestrutura (ou outro material de construção do navio), equipamentos e *outfitting* (tubulações, isolamentos acústicos, térmicos e móveis de acomodações). Pela definição, este deve ser o menor possível para garantir que a capacidade de carga transportada seja máxima.

A partir do conhecimento das características dos principais equipamentos selecionados, o peso de combustível, água e o seu peso estrutural, é possível calcular o peso total da embarcação.

### 3.3.18 Características do Protótipo

Para a execução do projeto, foi utilizado o navio em escala modelado pelo professor Alexandre Santiago, sendo este um Navio de Apoio Oceânico (NAO), de modelo Cybership II. De acordo com Siqueira, o modelo original deste navio foi concebido para o ensaio de controle e navegação para apoio oceânico, tendo sido desenvolvido pelo professor doutor Thor I. Fossen no Laboratório de Cibernética Marinha da Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia (NTNU) no ano de 2004. Foi pressuposto que o navio navegue em águas calmas, com correntes, ondas e ventos desprezíveis, de maneira a excluir as forças causadas por distúrbios ambientais. O modelo na sua versão original tem seus

dados disponibilizados no volume 37 da biblioteca de Modeling, identification, and adaptive maneuvering of CyberShip II: A complete design with experiments, IFAC Proceedings Volumes, Volume 37, Issue 10, 2004. A versão utilizada para o projeto retratada em escala 1:60, sendo os dados apresentados nas tabelas a seguir em escala 1:1 do projeto.

Tabela 3 – Características gerais do navio (original)

Característica	Valor	Unidade
Comprimento de projeto	83,000	m
Comprimento total	99,708	m
Boca de projeto	23,250	m
Boca total	23,250	m
Cala de projeto	7,100	m
Posição de meia nau	41,500	m
Densidade da água (ensaio em tanque de água doce)	1,000	t/m <sup>3</sup>
Coefficiente de apêndices	1,000	-

Fonte: O Autor, baseado em Fossen (2004)

Tabela 4 – Propriedades de volume

Característica	Valor	Unidade
Volume deslocado	8538,400	m <sup>3</sup>
Deslocamento	8538,400	Ton.
Comprimento	89,563	m <sup>3</sup>
Boca na linha d'água	23,250	m <sup>3</sup>
Coefficiente de bloco	0,578	-
Coefficiente prismático	0,623	-
Coefficiente prismático vertical	0,654	-
Área da superfície molhada	2580,600	m <sup>2</sup>
Posição longitudinal do centro de carena (LCB)	39,111	m
Posição vertical do centro de carena (VCB)	4,261	m

Fonte: O Autor, baseado em Fossen (2004)

Tabela 5 – Propriedades da área da seção mestra e da área da linha d'água

Característica	Valor	Unidade
Área da seção mestra	153,000	m <sup>2</sup>
Coefficiente da seção mestra	0,927	-
Comprimento na linha d'água	89,563	m
Boca na linha d'água	23,250	m
Área da linha d'água	1837,700	m <sup>2</sup>
Posição longitudinal do centro de flutuação da linha d'água	36,004	m
Ângulo de entrada	25,928	°
Momento de inércia transversal	74032,000	m <sup>4</sup>
Momento de inércia longitudinal	1025817,000	m <sup>4</sup>

Fonte: O Autor, baseado em Fossen (2004)



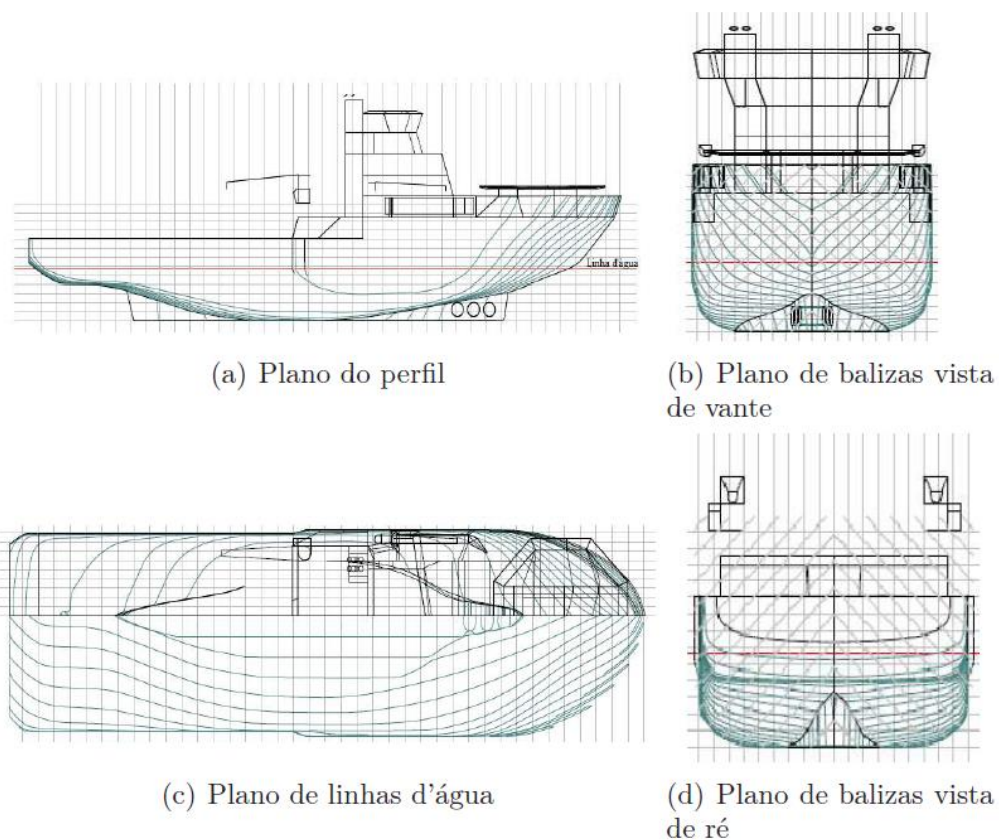


Figura 19: Planos de linhas do CyberShip II

Fonte: Santiago, baseado em Fossen (2004)

A versão utilizada para o projeto retratada em escala 1:60, sendo esses dados apresentados nas tabelas a seguir para a escala do projeto. O modelo utilizado para as simulações está descrito na Tabela 6.

Tabela 6 – Características gerais do navio estipulado

Característica	Valor	Unidade
Comprimento de projeto	1,380	m
Comprimento total	1,662	m
Boca de projeto	0,388	m
Boca total	0,388	m
Cala de projeto	0,118	m
Posição de meia nau	0,692	m
Densidade da água (ensaio em tanque de água doce)	1,000	t/m <sup>3</sup>

Fonte: O Autor, baseado em Fossen (2004)

## 4 CINEMÁTICA E MODELAGEM DINÂMICA DA EMBARCAÇÃO

O presente capítulo aborda as partes gerais de um projeto naval, com o intuito de ilustrar o funcionamento de um sistema marítimo. Será abordado neste capítulo os conceitos gerais, o princípio da semelhança, o ciclo do projeto. Aborda-se, também, a modelagem da embarcação, com foco na dinâmica da embarcação, por meio do estudo da hidrodinâmica, da hidrostática e da modelagem dos sistemas de apoio a embarcação.

### 4.1 CINEMÁTICA

A determinação da posição e orientação de um corpo rígido no espaço prevê a utilização de seis coordenadas independentes, ou seja, seis graus de liberdade (DOF [sigla em inglês para *Degrees of Freedom*]). Sendo três translacionais e três rotacionais, convencionados como: avanço, deriva, arfagem, jogo, caturro e guinada.

#### 4.1.1 Referencial Inercial e do Veículo

Segundo Fossen (2002), ao analisar o movimento de veículos marinhos com 6 graus de liberdade, é conveniente definir estes sistemas de coordenadas a partir de um referencial no corpo (móvel) e um na terra (fixo).

O primeiro está fixado no corpo, sendo esse o referencial  $X_0, Y_0, Z_0$ , fixado na origem do mesmo e coincidindo com o CD e os principais eixos de inércia. Eixo do movimento de avanço orientado no sentido positivo para a proa, eixo do movimento de deriva orientado no sentido positivo para boreste, e, eixo do movimento de afundamento orientado no sentido positivo para baixo.

Como o referencial móvel situado, deve-se posicionar o referencial  $X, Y, Z$  inercial, com este fixado na terra.

A partir desse entendimento do posicionamento com base em ambos os referenciais, a sociedade de arquitetos navais e engenheiros marítimos (SNAME) descreve a movimentação do navio por meio dos vetores descritos na Figura 20.

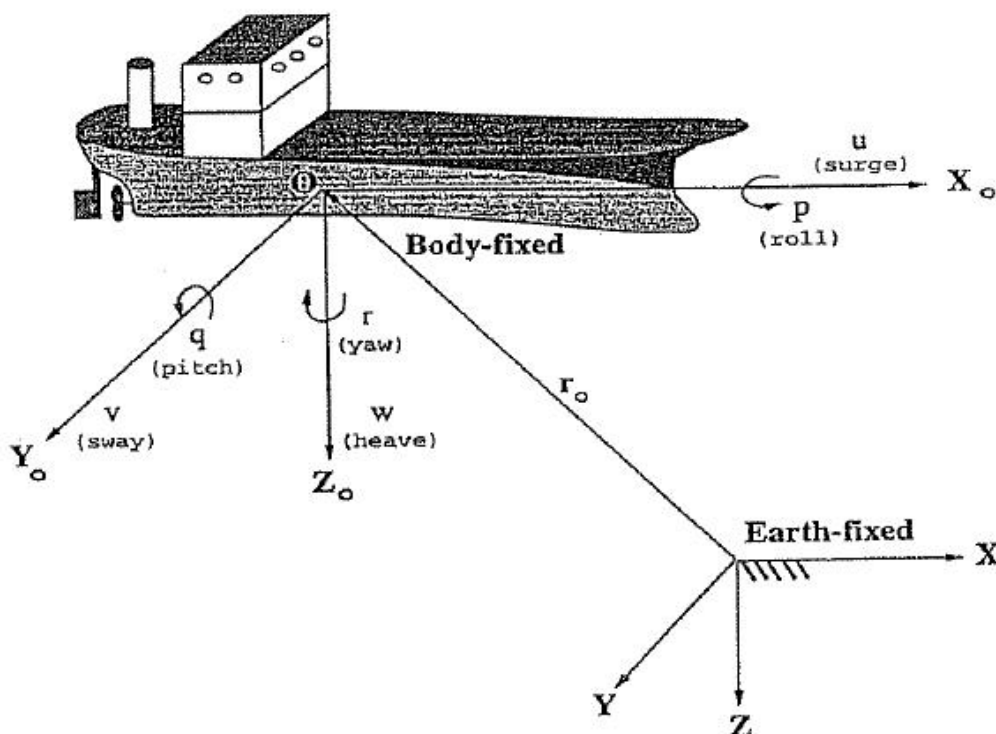


Figura 20: Eixos de referência fixados no corpo e na terra

Fonte: SNAME

$$\begin{aligned}
 \eta' &= [\eta_1^T, \eta_2^T]^T \rightarrow \eta_1 = [x_o, y_o, z_o]^T \quad \eta_2 = [\phi_o, \theta_o, \psi_o]^T \\
 v' &= [v_1^T, v_2^T]^T \rightarrow v_1 = [u_o, v_o, w_o]^T \quad v_2 = [p_o, q_o, r_o]^T \\
 \tau' &= [\tau_1^T, \tau_2^T]^T \rightarrow \tau_1 = [X_o, Y_o, Z_o]^T \quad \tau_2 = [K_o, M_o, N_o]^T
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Neste sistema  $\eta'$  denota a posição ( $\eta_1$ ) e a orientação ( $\eta_2$ ) em relação ao sistema de referência inercial. O vetor  $v'$  denota os vetores de velocidade linear ( $v_1$ ) e angular ( $v_2$ ) em relação ao sistema de referência móvel. Enquanto o vetor  $\tau'$  é utilizado para descrever as forças ( $\tau_1$ ) e os momentos ( $\tau_2$ ) que atuam no veículo a partir do sistema de referência móvel.

A notação das forças e momentos, posicionamento e velocidades nos seis graus de liberdade nos dois sistemas de referência (fixo e móvel) podem ser compreendidos a partir da Tabela 7.

Tabela 7 – Tabela dos 6 graus de liberdade (DOF) do navio

DOF	Movimento	Forças e momentos	Velocidade angular e linear	Posição e ângulos
1	Movimento na direção x - surge (avanço)	X	u	x
2	Movimento na direção y - sway (deriva)	Y	v	y
3	Movimento na direção z - heave (afargem)	Z	w	z
4	Rotação na direção x - roll, heel (jogo e banda)	K	p	$\phi$
5	Rotação na direção y - pitch, trim (caturro e trim)	M	q	$\theta$
6	Rotação na direção z - yaw (guinada)	N	r	$\psi$

Fonte: O Autor, baseado em Fossen (2004)

#### 4.1.2 Equações de Movimento

As equações de movimento serão escritas e resolvidas no sistema de coordenadas do corpo (móvel) uma vez que a massa adicional e os coeficientes utilizados para os cálculos das forças hidrodinâmicas e aerodinâmicas são tradicionalmente levantados em relação a esse sistema.

Tal procedimento tem a vantagem de simplificar as equações para os cálculos destas forças, e por conseguinte, da simetria do navio.

##### 4.1.2.1 Ângulos de Euler

O modelo cinemático é obtido através de três transformações lineares sucessivas. Tal progressão é usada para construir a matriz de rotação, que permite a conversão de vetores entre os sistemas de referência. Com isso, gera-se uma matriz de transformação cujos elementos são funções trigonométricas dos ângulos de orientação do corpo rígido. Ao multiplicar a matriz de transformação pelo vetor expresso para um referencial serão obtidas as representações desse vetor para o outro.

Com base no Teorema de Euler para rotação em torno de um eixo qualquer (Fossen, 1999), obtém-se uma matriz de rotação  $C$ , com essa sendo válida para um eixo qualquer representada a seguir.

$$C = \cos \beta I + (1 - \cos \beta) \lambda \lambda^T - \sin \beta S(\lambda) \quad (4.2)$$

Desta forma, podemos efetuar a rotação em torno dos unitários  $i$ ,  $j$  e  $k$  do referencial do veículo na forma, a saber, a partir de uma posição canônica, na qual os ângulos de Euler sejam todos inicialmente zero.

$$\begin{aligned} \lambda &= [0,0,1]^T & \beta &= \psi \\ \lambda &= [0,1,0]^T & \beta &= \theta \\ \lambda &= [1,0,0]^T & \beta &= \phi \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned}
 R_{x,\phi} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} & R_{y,\theta} &= \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \\
 R_{z,\psi} &= \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

#### 4.1.2.2 Matriz de transformação de coordenadas

Para permitir que o sistema de coordenadas móvel possa ser aplicado para o referencial fixo, deve-se utilizar das matrizes de transformação de coordenadas. Essas cujo entendimento é essencial para permitir a navegação e o controle do mesmo. Dessa forma, utilizam-se as equações abaixo.

$$\begin{aligned}
 \dot{\eta}_1 &= J_1(\eta_1)v_1 \\
 \dot{\eta}_2 &= J_2(\eta_2)v_2
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Com as variáveis  $J_1(\eta_1)$  e  $J_2(\eta_2)$  representando os seguintes valores.

$$J_1(\eta_1) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \cos \phi + \cos \psi \sin \theta \sin \phi & \sin \psi \sin \phi + \cos \psi \cos \phi \sin \theta \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \phi + \sin \phi \sin \theta \sin \psi & -\cos \psi \sin \phi + \sin \theta \sin \psi \cos \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \tag{4.6}$$

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & -\sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix} \tag{4.7}$$

Onde  $J_1(\eta_1)$  é a matriz de rotação das velocidades de translação e  $J_2(\eta_2)$  é a matriz encarregada de rotacionar as velocidades angulares do navio do sistema de coordenada móvel ao sistema inercial.

A ordem em que as rotações acontecem, determina a localização final do corpo no espaço tridimensional. Os ângulos de Euler proporcionam uma descrição física da atitude do veículo para pequenos ângulos.

#### 4.1.3 Equação Diferencial de Ângulos de Euler

Na mecânica clássica, as equações de Euler descrevem a rotação de um corpo rígido num sistema de referência com seus eixos fixos ao corpo e paralelo

aos eixos principais do corpo de inércia. Com as componentes cartesianas sendo representadas pelas equações a seguir.

$$\begin{aligned} M_{xC} &= J_x \dot{\omega}_{xC} + (J_z - J_y) * \omega_{yC} * \omega_{zC} \\ M_{yC} &= J_y \dot{\omega}_{yC} + (J_x - J_z) * \omega_{xC} * \omega_{zC} \\ M_{zC} &= J_z \dot{\omega}_{zC} + (J_y - J_x) * \omega_{yC} * \omega_{zC} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Para os valores supracitados,  $J_x, J_y, J_z$  representam os momentos de inércia;  $\dot{\omega}_{xC}, \dot{\omega}_{yC}, \dot{\omega}_{zC}$  representam as acelerações angulares;  $\omega_{xC}, \omega_{yC}, \omega_{zC}$  representam as velocidades angulares e  $M_{xC}, M_{yC}, M_{zC}$  representam os torques.

Sua dedução se dá pela facilidade em obter os valores de: aceleração tangencial, aceleração angular, velocidade angular, momento angular e energia cinética pelo fato deles estarem referenciados nas coordenadas do corpo rígido de estudo. Tal fato se dá por conta do momento de inércia  $J_C$  no sistema de coordenadas do corpo não sofrer alterações com o tempo.

Caso o tensor dos momentos de inércia do corpo rígido (de nove componentes, dos quais seis são independentes) for diagonalizado, será obtido um sistema de coordenadas (chamado de eixos principais), no qual o momento de inércia do tensor tem apenas três componentes de acordo com Friedland (2005). O momento angular no sistema do corpo é dado pela seguinte equação.

$$L_C = J_C \omega = \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_x \omega_x \\ J_y \omega_y \\ J_z \omega_z \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

A partir do conhecimento que o princípio fundamental da dinâmica é definido pelo sistema inercial  $\frac{dL_I}{dt} = M_I$ , para o qual  $M$  é o vetor torque. O mesmo pode ser resolvido por meio do sistema de coordenadas do corpo, com o vetor momento de inércia necessitando ser transformado pela matriz de rotação  $T_{IC}$  definida pelos ângulos de Euler.

$$\frac{dL_I}{dt} = \frac{d}{dt}(T_{IC} L_C) = \dot{T}_{IC} L_C + T_{IC} \dot{L}_C = M_I \quad (4.10)$$

A partir da multiplicação de ambos os lados por  $T_{CI} = T_{IC}^{-1}$  encontra-se.

$$T_{CI}\dot{T}_{IC}L_C + \dot{L}_C = M_C \quad (4.11)$$

Com os valores de  $L_C, \dot{L}_C, M_C, T_{CI}\dot{T}_{IC}$  expressados a seguir, encontra-se as equações de Euler da equação 4.8.

$$L_C = \begin{bmatrix} J_x \omega_{xC} \\ J_y \omega_{yC} \\ J_z \omega_{zC} \end{bmatrix} \quad \dot{L}_C = \begin{bmatrix} J_x \dot{\omega}_{xC} \\ J_y \dot{\omega}_{yC} \\ J_z \dot{\omega}_{zC} \end{bmatrix} \quad M_C = \begin{bmatrix} M_{xC} \\ M_{yC} \\ M_{zC} \end{bmatrix} \quad T_{CI}\dot{T}_{IC} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{zC} & \omega_{yC} \\ \omega_{zC} & 0 & -\omega_{xC} \\ -\omega_{yC} & \omega_{xC} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

## 4.2 DINÂMICA DA EMBARCAÇÃO

A embarcação marítima é definida a partir de equações de movimento que englobam o estudo da estática e da dinâmica. A estática diz respeito ao equilíbrio dos corpos em repouso ou em movimento para uma velocidade constante, a dinâmica diz respeito a corpos que apresentem movimento acelerado.

A dinâmica da embarcação utiliza dos conceitos vistos no início desse capítulo, a partir dos 6 graus de liberdade e dos conceitos vistos na cinemática e na transformação de coordenadas.

Para modelagem matemática, é necessário que algumas considerações sejam feitas em relação ao navio a ser estudado. Para estas temos que: o corpo é rígido; os pesos e suas distribuições são constantes; o modelo é simétrico (apenas é simétrico entre bombordo e boreste); a origem dos eixos cartesianos do referencial móvel é coincidente com o centro de gravidade do veículo e os eixos principais de inércia.

A partir desses pontos, segundo Fossen (2002), as equações de movimentos de translação e rotação podem ser escritas a partir da seguinte equação.

$$M\dot{v} + C(v) + D(v)v + g(\eta) = \tau + \tau_E + \tau_H \quad (4.13)$$

Sendo as variáveis nesta equação as seguintes.

- $M$ : Matriz de inércia;
- $C(v)$ : Matriz de Coriolis e forças centrípetas;
- $D(v)$ : Matriz de Amortecimento;
- $g(\eta)$ : Vetor de forças e momentos gravitacionais;
- $\tau$ : Vetor de forças e momentos dos atuadores;

- $\tau_E$ : Vetor de forças ambientais;
- $\tau_H$ : Vetor de forças hidrodinâmicas.

A matriz de inércia  $M$  é a soma da matriz de inércia do corpo rígido ( $M_{RB}$ ) com a matriz de inércia adicional ( $M_A$ ), a última sendo responsável por corrigir a massa deslocada na trajetória da embarcação.

$$M = M_{RB} + M_A \quad (4.14)$$

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad M_A = - \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & X_{\dot{w}} & 0 & X_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 & Y_{\dot{p}} & 0 & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & 0 & Z_{\dot{w}} & 0 & Z_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & K_{\dot{v}} & 0 & K_{\dot{p}} & 0 & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & 0 & M_{\dot{w}} & 0 & M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & N_{\dot{v}} & 0 & N_{\dot{p}} & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Dessa forma, encontramos que  $M$  é dada pela seguinte matriz.

$$M = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & -X_{\dot{w}} & 0 & -X_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & 0 & -Y_{\dot{p}} & 0 & -Y_{\dot{r}} \\ -Z_{\dot{u}} & 0 & m - Z_{\dot{w}} & 0 & -Z_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & -K_{\dot{v}} & 0 & I_x - K_{\dot{p}} & 0 & -K_{\dot{r}} \\ -M_{\dot{u}} & 0 & -M_{\dot{w}} & 0 & I_y - M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & -N_{\dot{v}} & 0 & -N_{\dot{p}} & 0 & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

A matriz de Coriolis e forças centrípetas resultantes do corpo rígido  $C_{RB}$  e da inércia adicional  $C_A$  é a matriz  $C$  a seguir.

$$C(v) = C_{RB}(v) + C_A(v) \quad (4.17)$$

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & mw & -mv \\ 0 & 0 & 0 & -mw & 0 & mu \\ 0 & 0 & 0 & mv & -mu & 0 \\ 0 & mw & -mv & 0 & I_z r & -I_y q \\ -mw & 0 & mu & -I_z r & 0 & I_x p \\ mv & -mu & 0 & I_y q & -I_x p & 0 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$



$$C_{A(v)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Sendo que para esta equação, os valores de  $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2$  e  $b_3$  apresentados a seguir.

$$\begin{aligned} a_1 &= X_{\dot{u}}u + X_{\dot{v}}v + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{p}}p + X_{\dot{q}} + X_{\dot{r}}r \\ a_2 &= X_{\dot{v}}u + Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{w}}w + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{q}} + Y_{\dot{r}}r \\ a_3 &= X_{\dot{w}}u + Y_{\dot{w}}v + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{p}}p + Z_{\dot{q}} + Z_{\dot{r}}r \\ b_1 &= X_{\dot{p}}u + Y_{\dot{p}}v + Z_{\dot{p}}w + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{q}} + K_{\dot{r}}r \\ b_2 &= X_{\dot{q}}u + Y_{\dot{q}}v + Z_{\dot{q}}w + K_{\dot{p}}p + M_{\dot{q}} + M_{\dot{r}}r \\ b_3 &= X_{\dot{r}}u + Y_{\dot{r}}v + Z_{\dot{r}}w + K_{\dot{r}}p + M_{\dot{r}} + N_{\dot{r}}r \end{aligned} \quad (4.20)$$

Para Fossen (2002), a matriz  $D$  na equação é a matriz de amortecimento hidrodinâmico. Esta matriz tem um caráter dissipativo, visto que ela é responsável por remover energia do navio. É o resultado de vários fenômenos que amortecem o deslocamento do navio. Na equação 4.21 são apresentadas as principais fontes de amortecimento do deslocamento de veículos marinhos.

Consequentemente, a matriz de amortecimento hidrodinâmico pode ser escrita como o resumo da soma destas componentes, representada a seguir.

$$D(v) \triangleq D_p(v) + D_s(v) + D_w(v) + D_M(v) \quad (4.21)$$

Na qual os valores representados são.

- $D_p(v)$ : Potencial de amortecimento induzido devido a forças de oscilação no corpo;
- $D_s(v)$ : Atrito de fricção linear na pele devido a camadas de limite laminar e atrito de fricção quadrática devido às camadas de limite turbulento (*Skin friction*);
- $D_w(v)$ : Amortecimento devido à geração de ondas (*Wave damping*);
- $D_M(v)$ : Amortecimento devido ao desprendimento de vórtices (*Morison equation*).

#### 4.2.1 Modelo Linear Acoplado

Segundo Fossen (1999) e Fossen (2004), as considerações simplificadas para a matriz amortecimento para um sistema linear invariante no tempo implicam em uma simplificação adicional para a equação 4.13, de maneira a assumir a forma apresentada na equação 4.22, na qual as propriedades simétricas da matriz de amortecimento  $D$  serão iguais as da matriz de inércia  $M$ .

$$M\dot{v} + Dv = \tau \quad (4.22)$$

A partir da matriz 4.16, se tomarmos apenas os movimentos de *surge*, *sway* e *yaw*, teremos como resultado a matriz 4.23.

$$M(v) = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{r}} \\ 0 & N_{\dot{v}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

A execução na prática da implementação para todos os tipos de amortecimentos  $D(v)$  tem a sua dificuldade aumentada conforme aumenta-se o número de ordens. Tal dado também se aplica para a utilização de termos fora da diagonal principal, conforme a expressão na sua forma geral verificada na equação 4.21. Devido a esta situação, é comum utilizar a aproximação a seguir.

$$D(v) = - \begin{bmatrix} X_u & 0 & 0 \\ 0 & Y_v & Y_r \\ 0 & N_v & N_r \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Um caso particular que deve ser um destaque desse trabalho, é o caso das embarcações de baixa velocidade, no qual pode-se desacoplar o modo *surge* a partir dos modos de direção *sway* e *yaw*. Desta forma, a linearização das forças e momentos de amortecimento podem ser escritas na forma da equação 4.22, demonstradas a seguir.

$$(m - X_{\dot{u}})\dot{u} - X_u u = \tau_x \quad (4.25)$$

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - Y_{\dot{r}}\dot{r} - Y_v v - Y_r r = \tau_y \quad (4.26)$$

$$-N_{\dot{v}}\dot{v} + (I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} - N_v v + N_r r = \tau_n \quad (4.27)$$

#### 4.2.2 Modelo Linear Desacoplado

Conforme explicado anteriormente, o modelo deste trabalho é o modelo desacoplado, no qual foi considerado o fator de escala para o modelo de  $\alpha = 1:60$ , no qual obteve-se os parâmetros para o modelo das matrizes 4.28 que representa a matriz de inércia e 4.29 representa a matriz de amortecimento.

$$M = \begin{bmatrix} 25,8 & 0 & 0 \\ 0 & 33,8 & 0 \\ 0 & 0 & 2,76 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0,72253 & 0 & 0 \\ 0 & 0,88965 & 0 \\ 0 & 0 & 1,9 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Baseada na equação dinâmica do movimento não linear para 6 DOF apresentado na equação equivalente a 4.13 e 4.22. Pode-se considerar DOF igual a 3, para os movimentos de *surge*, *sway* e *yaw*. Dessa forma, pode-se reescrever os valores da equação 4.22 da seguinte maneira.

$$M(\dot{u}) + D(u) = \tau_u \quad (4.30)$$

$$M(\dot{v}) + D(v) = \tau_v \quad (4.31)$$

$$M(\dot{r}) + D(r) = \tau_r \quad (4.32)$$

A partir da substituição das equações 4.23 e 4.24 nas 3 equações apresentadas acima, de maneira a desconsiderar os acoplamentos  $-Y_{\dot{r}}\dot{r}$  e  $-Y_{\dot{r}}r$  na equação 4.26 e  $-N_{\dot{v}}\dot{v}$  e  $-N_{\dot{v}}v$  na equação 4.27, para que esses valores sejam zerados, desta forma encontram-se as equações a seguir.

$$(m - X_{\dot{u}})\dot{u} - X_u = \tau_x \quad (4.33)$$

$$(m - Y_{\dot{v}})\dot{v} - Y_v v = \tau_y \quad (4.34)$$

$$(I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} + N_r r = \tau_n \quad (4.35)$$

De maneira que sejam considerados os valores,  $\dot{x} = u$ ,  $\dot{y} = v$  e  $\psi = r$ . Com os valores apresentados na tabela 8 indicando os valores de forças e momentos para a determinação dos parâmetros do modelo linear do navio.

Tabela 8 – Parâmetros para o modelo linear do Cybership II

Variável	Valor	Unidade
$m$	23,8	kg
$X_u$	-0,72253	N
$X_{\dot{u}}$	-2	kg
$Y_v$	-0,88965	N
$Y_{\dot{v}}$	-10	kg
$N_r$	-1,9	N
$N_{\dot{r}}$	-1,0	kg
$I_z$	1,76	kg * m <sup>2</sup>

Fonte: O Autor (2023), baseado em Siqueira (2014)

Sendo as variáveis nesta equação as seguintes.

- $m$ : Massa total do navio modelo;
- $X_u$ : Força de amortecimento hidrodinâmico no eixo x;
- $X_{\dot{u}}$ : Massa adicional no eixo x;
- $Y_v$ : Força de amortecimento hidrodinâmico no eixo y;
- $Y_{\dot{v}}$ : Massa adicional no eixo y;
- $N_r$ : Força de amortecimento hidrodinâmico no eixo z;
- $N_{\dot{r}}$ : Massa adicional no eixo z;
- $I_z$ : Torque do motor de amortecimento hidrodinâmico no eixo z;
- $\tau_u$ : Força e momento relacionado aos propulsores no eixo x;
- $\tau_v$ : Força e momento relacionado aos propulsores no eixo y;
- $\tau_r$ : Força e momento relacionado aos propulsores no eixo x.

### 4.3 HIDROSTÁTICA DO NAVIO

A hidrostática é o estudo da física no qual os fluidos encontram-se em equilíbrio estático e dinâmico. Nesta seção serão abordados os principais conceitos: fluidos, viscosidade, pressão, densidade.

#### 4.3.1 Fluidos

Por conta da importância dos fluidos, estes podem ser definidos como uma substância capaz de escoar (fisicamente compressível). Esta definição é válida para líquidos e gases, com a diferenciação baseada na resistência a compressão.

Este é um objeto de vital importância para embarcações devido a ser o meio ao qual a mesma está sujeita, abaixo da linha d'água ao fluido água e acima desta ao fluido ar. Com suas propriedades devendo ser utilizadas para embasar a resistência de projeto do mesmo e as condições que devem ser suportadas.

#### 4.3.2 Viscosidade

A viscosidade é definida como uma propriedade característica dos fluidos, definido diferentes níveis de viscosidade para cada tipo. Tal característica é reservada para os fluidos líquidos, e envolvem a sua resistência a movimentos e a forças de contato. Para o presente trabalho, será considerada a viscosidade da água, a 20°C, como 0,001 Pa. s.

#### 4.3.3 Pressão

A pressão é um fenômeno físico definido a partir da aplicação de uma força  $F$  sobre uma área delimitada  $A$ . Seu valor pode ser calculado a partir da seguinte equação, com o ângulo  $\alpha$  sendo o ângulo entre a base da área e a incidência da força.

$$P = \frac{F * \sin \iota}{A} \quad (4.36)$$

A pressão nos fluidos é caracterizada por apresentar uma distância entre suas moléculas que permite ao corpo adequar-se ao ambiente em que se encontra. As características da pressão nos líquidos são semelhantes a que encontramos nos gases: o líquido exerce pressão para todos os lados de um recipiente e em qualquer corpo que for imerso nele.

#### 4.3.4 Densidade

A densidade pode ser definida como a relação entre a massa e o volume de um objeto, muito importante para o estudo da hidrostática por conta de sua relação direta com o empuxo.

$$d = \frac{m_g}{V_l} \quad (4.37)$$

De maneira geral, pode-se dizer que a densidade é a razão entre a massa de um material e o seu volume ocupado, em uma dada temperatura e pressão.

#### 4.3.5 Empuxo

O empuxo está dentre as mais importantes para o estudo da hidrostática, pois essa força de reação do fluido é responsável por garantir a flutuabilidade de embarcações. Definida por Arquimedes, a mesma utiliza dos conceitos da densidade do fluido, do volume do fluido deslocado e da aceleração da gravidade, podendo ser expressa pela seguinte equação.

$$E = d_f * V_{fd} * g \quad (4.38)$$

Com todos esses conceitos estabelecidos, pode-se prosseguir com o próximo objeto de estudo para a embarcação, a hidrodinâmica.

#### 4.4 HIDRODINÂMICA DO NAVIO

A hidrodinâmica em contraponto com a Hidrostática na qual os fluidos encontram-se em equilíbrio (estático ou dinâmico). Pode-se resumir como a força resultante aplicada ao fluido, quando a mesma não é nula. Dessa forma, a Hidrodinâmica é a área da física dedicada ao estudo de fluidos em movimento sob a ação de forças, de vital importância para qualquer embarcação. Com seu estudo sendo baseado nos seguintes conceitos: Vazão, Equação da continuidade, equação de Bernoulli.

##### 4.4.1 Vazão

A vazão é definida como uma relação entre o volume de fluido transportado por uma seção (livre ou fechada) por um determinado período de tempo. Sendo a mesma denotada pela fórmula abaixo, na qual  $V_{fn}$  representa o volume de fluido,  $dt_Q$  o tempo necessário e  $Q$  é a vazão.

$$Q = \frac{V_{fn}}{dt_Q} \quad (4.39)$$

De maneira alternativa, a vazão pode ser calculada por meio de uma relação entre a área de passagem do fluido  $S_F$  e a sua velocidade, tal qual evidenciado a seguir.

$$Q = S_F * v_F \quad (4.40)$$

A mesma corresponde à taxa de escoamento, ou seja, quantidade de material transportado através de conduto livre (rio ou mar) ou forçado (tubulações), por unidade de tempo. Ainda outra definição é a de um fluxo volumétrico.

#### 4.4.2 Equação da Continuidade

A equação da continuidade dita que, um fluido sempre irá manter uma relação proporcional entre sua área e sua velocidade. Tal é dado pela equação 4.41.

$$Q_1 = Q_2$$

$$S_{F1} * v_{F1} = S_{F2} * v_{F2}$$
(4.41)

Essa relação é muito importante por afetar diretamente a vazão e o fluxo de fluido ao redor da embarcação. Necessita ser entendida para que seja possível realizar a movimentação acelerada da embarcação.

#### 4.4.3 Equação de Bernoulli

Considera-se dois pontos quaisquer A e B imersos em um fluido em movimento sob a ação da aceleração da gravidade (tal como representado na Figura 21). Uma vez que a velocidade é uma grandeza vetorial, que sempre é tangente a trajetória, as velocidades vetoriais de A e B serão diferentes. O princípio de Bernoulli afirma que, deve-se considerar um setor potencial, um setor cinético e um setor potencial gravitacional.

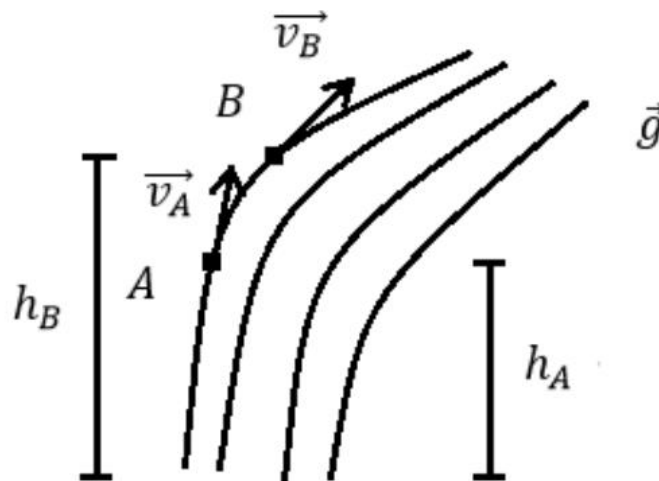


Figura 21: Velocidades nos pontos A e B para um fluido em movimento

Fonte: Hewitt



A partir da figura, pode-se encontrar a equação de Bernoulli, por meio da relação entre os pontos A e B. Com a mesma sendo expressa de maneira a seguir.

$$P_A = P_B$$
$$p_a + dgh_a + \frac{dv_a^2}{2} = p_b + dgh_b + \frac{dv_b^2}{2}$$

(4.42)

Para a qual, tem-se que  $p_a, p_b$  representam as pressões nos pontos A e B;  $h_a, h_b$  representam as alturas dos pontos A e B;  $v_a, v_b$  representam as velocidades nos pontos A e B.

Esse princípio é muito importante para as aplicações em mecânica dos fluidos e para garantir a hidrodinâmica da embarcação.

## 5 MODELAGEM DAS PERTURBAÇÕES AMBIENTAIS

O presente capítulo aborda as perturbações ambientais as quais embarcações estão submetidas e são de vital importância para a operação segura de qualquer navio. Para tal as perturbações foram divididas em: Ondas, Vento e Corrente. Deve-se ressaltar que a modelagem de perturbações ambientais não foi abordada na simulação do presente trabalho, visto que a própria embarcação desconsidera os mesmos.

### 5.1 AÇÃO DAS ONDAS

As ondas são definidas como perturbações que apresentam movimento de oscilação em uma grandeza física no espaço, podendo ou não ter periodicidade temporal (mas sempre possui 1 período). A oscilação espacial se caracteriza por seu comprimento de onda, enquanto que o tempo decorrido em uma oscilação completa é denominado período da onda.

O trabalho foca nas ondas marítimas, uma vez que estão em contato direto com o casco da embarcação estudada. Desta forma será abordado o processo de geração das ondas, os esforços desta e demais pontos.

O processo de geração da onda tem seu início por meio da interação do vento com a superfície do mar, tal interação gera as forças de arrasto responsáveis pelo movimento oscilatório, com o qual a união das forças possibilita o crescimento da onda, até o momento em que esta quebre e sua energia mecânica seja dissipada.

Uma vez que o mar não apresenta comportamento uniforme de maneira contínua, é necessário definir espectros de ondas para avaliar o estado de mar onde a embarcação irá operar.

O estado de mar é descrito pelo conceito da densidade espectral de potência  $S_{\omega}$ , que representa a quantidade de energia por intervalo de frequência  $\Delta\omega$ . Definindo-se a função contínua de densidade espectral de potência a partir da equação 5.1.

$$S(\omega_i) = \lim_{\Delta\omega \rightarrow \infty} \frac{A_i^2(\omega_i)}{2\Delta\omega} \quad (5.1)$$

Para esta equação o valor médio quadrático  $A_i^2 * \omega_1$  da amplitude das ondas representa a quantidade de energia no intervalo  $2\Delta\omega = \omega_{i-1} - \omega_{i+1}$ , com centro localizado em  $\omega_i$ , conforme representado pela Figura 22.

Uma onda irregular de crista, longa propagando-se ao longo do eixo x positivo, pode ter sua elevação  $\zeta(x, t)$  representada por uma soma de componentes conforme a equação a seguir.

$$\zeta(x, t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t - k_i + \phi_i) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} k_i A_i^2 \cos 2(\omega_i t - k_i + \phi_i) + O(A_i^3) \quad (5.2)$$

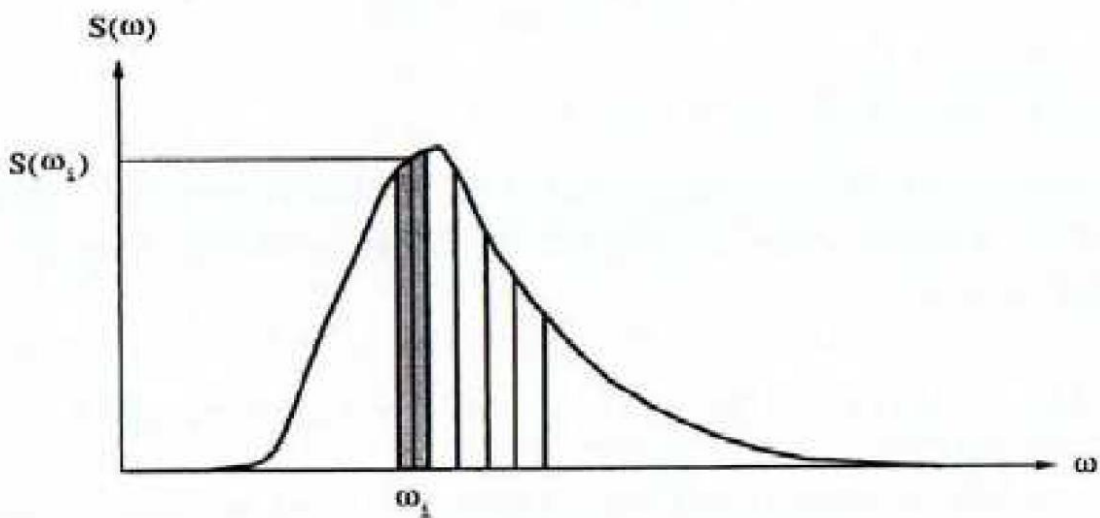


Figura 22: Gráfico da função de densidade espectral da potência de ondas

Fonte: Pinkster

Para a equação 5.2,  $A_i$  representa a amplitude de onda para uma determinada frequência  $\omega_i$ , cujo resultado é expresso pela seguinte equação obtida com base no espectro  $S(\omega_i)$ .

$$A_i = \sqrt{2S(\omega_i)\Delta\omega} \quad (5.3)$$

Sendo o valor representado pela variável  $\phi_i$  o ângulo de fase aleatório uniformemente distribuído e constante no tempo dentro de um intervalo  $[0, \pi[$ .

Depende-se do valor denominado por  $k_i$ , este representa o número de onda, sendo este relacionado com o comprimento de onda  $\lambda_i$ , dado pela expressão a seguir.

$$k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i} \quad (5.4)$$

A velocidade da propagação é definida por  $c = \lambda/T = \omega/k$ , no qual T é o período da onda. A relação entre o número de onda  $k_i$  e a frequência angular  $\omega_i = 2\pi/T_i$ , sendo está definida pela seguinte equação.

$$\omega_i^2 = k_i * g * \tanh(k_i d_i) \quad (5.5)$$

Sendo nesta equação  $d_i$  a profundidade local e  $g$  a aceleração da gravidade. Com esta equação supracitada sendo denominada relação de dispersão.

### 5.1.1 Esforços de Primeira Ordem de Ondas

Os esforços de primeira ordem são formados por componentes de alta frequência que excitam os movimentos nos seis graus de liberdade do navio. São proporcionais às alturas de ondas e atuam com frequência igual à frequência das ondas.

Em sistemas de posicionamento dinâmico, devem ser filtrados das medições para evitar as gerações de esforços de controle muito oscilatórios.

### 5.1.2 Esforços de Segunda Ordem de Ondas

As solicitações de segunda ordem possuem uma parcela contínua, ou de frequência baixa (ordem de  $10^{-1} \text{ rad/s}$ ), denominada Força de Deriva Média, e outras componentes lentamente variáveis no tempo, denominadas Força de Deriva Lenta.

As força de deriva média são consideradas apenas para movimentos no plano horizontal do navio e decorrem da parcela de energia correspondente às ondas refletidas pelas obras vivas (parte submersa) da embarcação. A parcela refletida corresponde às ondas cujo comprimento é pequeno em relação à embarcação, pois seu casco opõe-se a propagação.

As forças e momentos de deriva média são obtidas segundo as equações.

$$\begin{aligned}
\bar{X}_{\omega v}(t, \phi_{\omega vr}) &= 2 \int_0^{+\infty} S_{\omega v}(\omega) \frac{T_x(\omega, \phi_{\omega vr})}{\zeta_a^2} d\omega \\
\bar{Y}_{\omega v}(t, \phi_{\omega vr}) &= 2 \int_0^{+\infty} S_{\omega v}(\omega) \frac{T_y(\omega, \phi_{\omega vr})}{\zeta_a^2} d\omega \\
\bar{N}_{\omega v}(t, \phi_{\omega vr}) &= 2 \int_0^{+\infty} S_{\omega v}(\omega) \frac{T_n(\omega, \phi_{\omega vr})}{\zeta_a^2} d\omega
\end{aligned}
\tag{5.6}$$

No qual  $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{N}$  respectivamente forças de deriva média nos sentidos x e y e no momento em torno do eixo z.

$S_{\omega v}(\omega)$  é a função de densidade espectral das ondas em consideração.

$\frac{T_x}{\zeta_a^2}, \frac{T_y}{\zeta_a^2}, \frac{T_n}{\zeta_a^2}$  são funções de transferência quadrática dos esforços de deriva média em mar regular nas direções x e y e no entorno do eixo z.

$\omega, \phi_{\omega vr}$  é a direção da onda em relação à unidade flutuante.

$\zeta_a$  é a amplitude da onda.

Os coeficientes de deriva podem ser calculados computacionalmente por softwares tais como o programa WAMIT.

A força de deriva lenta tem intensidade menor se comparada com as outras componentes de onda. Decorre da combinação de duas ondas de frequências ligeiramente diferentes cujas ações podem ser substituídas pela ação de outras duas ondas, de frequência igual a respectivamente, a soma e a diferença da onda original.

A parcela da diferença entre as frequências é baixa o suficiente para excitar o sistema, induzindo movimentos elevados em *surge*, *sway* e *yaw*.

Os espectros das forças de deriva lenta ( $S_{jDL}$ ) segundo Pinkster (1980) são aproximados para sistemas oceânicos de grande porte, com frequências naturais bem abaixo da frequência típica das ondas. A representação dos espectros das forças de deriva lenta é dita por.

$$S_{jDL}(\mu_\delta) = 8 \int_0^{+\infty} S(\omega)S(\omega + \mu_\delta) \left[ \frac{T_j(\omega; \omega + \mu_\delta, \phi_{\omega v})}{\zeta_a^2} \right]^2 d\omega, \quad j = X, Y, N
\tag{5.7}$$

Sendo  $\mu_\delta$  a diferença de frequência e  $\frac{T_j}{\zeta_a^2}$  a função quadrática de transferência do sistema.

Para valores de  $\mu_\delta$  muito baixos, ou seja,  $\mu_\delta/\omega_0 \ll 1$ , podem ser calculados a partir da equação a seguir.

$$S_{jDL}(\mu) = 8 \int_0^{+\infty} S^2(\omega) D_j(\omega, \phi_{\omega\nu})^2 d\omega + O[(\mu/\omega_0)^2], \quad j = X, Y, N \quad (5.8)$$

Desta forma, o espectro da força de deriva lenta pode ser considerado constante para baixas frequências e com um erro proporcional a  $(\mu_\delta/\omega_0)^2$ , sendo função apenas dos coeficientes de deriva  $D_j$ , que corresponde ao termo  $\frac{T_j(\omega; \omega + \mu, \phi_{\omega\nu})}{\zeta_a^2}$ , presente na equação 5.7.

### 5.1.3 Operadores de Resposta em Amplitude

A relação entre os movimentos de uma embarcação e a amplitude das ondas incidentes é definida por funções de transferência denominadas Operadores de Resposta em Amplitude (RAO).

O cálculo direto dos movimentos de primeira ordem é realizado a partir da obtenção do RAO, que são funções de transferência entre a altura da onda incidente e o movimento resultante da embarcação. Esta aproximação linear costuma apresentar uma precisão razoável, exceto para o movimento de *roll*, que se caracteriza pelas não-linearidades no amortecimento e no momento de restauração para grandes amplitudes.

Sendo definidos como funções de transferência, os RAO são funções complexas que definem a relação entre a amplitude do movimento induzido  $\zeta_i$  e a amplitude  $A_{(\omega, \beta_0)}$  de uma onda incidente.

A amplitude desta onda regular é definida pela equação a seguir.

$$A(t) = A_{(\omega, \beta_0)} \sin \omega t + \phi_0 \quad (5.9)$$

Para esta equação,  $\omega$  é definido como a frequência,  $\phi_0$  é o ângulo de fase e  $\beta_{00}$  é o ângulo de incidência das ondas.

Esta função de transferência de força pode ser obtida a partir de programas computacionais (responsáveis pelos cálculos com base na geometria do casco e das condições de carregamento) ou por meio de ensaios em tanques de prova (*towing tanks*). Assim pode-se levantar experimentalmente o índice  $j$

com base na equação a seguir, com este j indicando seis graus de liberdade da embarcação ( $\eta_{\omega 1}$  – surge,  $\eta_{\omega 2}$  – sway,  $\eta_{\omega 3}$  – heave,  $\eta_{\omega 4}$  – roll,  $\eta_{\omega 5}$  – pitch,  $\eta_{\omega 6}$  – yaw).

$$RAO_{j(\omega, \beta_0)} = \frac{\eta_{\omega n}}{A_{(\omega, \beta_0)}} \quad (n = 1, \dots, 6) \quad (5.10)$$

## 5.2 AÇÃO DO VENTO

O esforço solicitante devido à ação do vento pode ser estimado a partir das expressões a seguir.

$$X_{\omega} = 1/2 * \rho_a * V_{\omega}^2 * A_{\omega f} * C_{\omega x}(\phi_{\omega r}) \quad (5.11)$$

$$Y_{\omega} = 1/2 * \rho_a * V_{\omega}^2 * A_{\omega l} * C_{\omega y}(\phi_{\omega r}) \quad (5.12)$$

$$N_{\omega} = 1/2 * \rho_a * V_{\omega}^2 * A_{\omega l} * L * C_{\omega n}(\phi_{\omega r}) \quad (5.13)$$

Sendo  $X_{\omega}, Y_{\omega}, N_{\omega}$  os vetores de forças da corrente em surge, sway e yaw, respectivamente. Com  $\rho_a$  representando a densidade do ar, os valores de  $A_{\omega f}$  e  $A_{\omega l}$  representam as áreas projetadas frontal e lateral, L é a dimensão linear do navio (seu comprimento),  $C_{\omega x}, C_{\omega y}, C_{\omega n}$  são os coeficientes dos esforços devidos à corrente em relação aos eixos X, Y e Z respectivamente. Com o valor de  $\phi_{\omega r}$  sendo o ângulo de incidência do vento em relação ao referencial do navio.

Segundo orientações do professor orientador Santiago (2023), a velocidade do vento pode ser considerada como sendo constituída pela soma de duas parcelas, sendo uma devida à velocidade média e a outra caracterizada por uma componente aleatória de rajada, sendo a equação a seguir.

$$V_{\omega} = \bar{V}_{\omega} + V_e(t) \quad (5.14)$$

Na equação  $V_{\omega}$  representa a velocidade total do vento,  $\bar{V}_{\omega}$  referencia a velocidade média do vento,  $V_e$  representa a velocidade média do vento devido a rajada.

A velocidade de rajada pode ser obtida a partir do espectro de velocidade efetiva do vento é encontrada por meio da equação a seguir.

$$S_e(\omega) = |H_\omega(\omega)|^2 S_\omega(\omega) \quad (5.15)$$

Nesta equação,  $S_e(\omega)$  descreve o espectro efetivo do vento,  $H_\omega(\omega)$  representa a função de transferência, com  $S_\omega(\omega)$  sendo o espectro do vento.

A função de transferência  $H_\omega(\omega)$  leva em consideração a geometria das obras mortas (parte acima da linha d'água do navio) e define a velocidade efetiva do vento que introduz os esforços. Pode ser admitido que  $H_\omega(\omega) = 1$  em para uma primeira aproximação, obtendo-se a velocidade de rajada a partir do próprio espectro de vento. A série temporal do espectro pode ser obtida através da seguinte equação.

$$V_e(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(2\pi\omega_i t + \epsilon_i) \quad (5.16)$$

Sendo  $A_i = \sqrt{2S_e(\omega_i\Delta\omega)}$ , onde  $\omega$  representa uma fase aleatória com distribuição uniforme no intervalo  $[0, 2\pi]$ .

### 5.3 AÇÃO DA CORRENTE

As correntes marítimas são definidas como movimentos de grandes massas de água (exemplo: mar), essa tem a característica de influenciar o clima das regiões que atuam, possuindo direção e constância em seu movimento.

Para o objeto de estudo (navios), as componentes da corrente devem ter seu referencial fixado na terra (devido a rotação da mesma), com estas podendo ser descritas por 2 parâmetros: a velocidade e a direção da corrente.

A solicitação ambiental devida à corrente decorre da velocidade relativa do veículo em relação à água, definida a partir da equação a seguir.

$$u_r = u - v_{cx} \quad (5.17)$$

$$v_r = v - v_{cy} \quad (5.18)$$



Com os valores de  $v_{cx}$  e  $v_{cy}$  sendo representados pelas seguintes equações.

$$v_{cx} = V_c \cos(\psi_c - \psi) \quad (5.19)$$

$$v_{cy} = V_c \sin(\psi_c - \psi) \quad (5.20)$$

Com o valor de  $V_c$  representando a velocidade da corrente,  $\psi_c$  representando a direção da corrente,  $v_{cx}$  e  $v_{cy}$  descrevem, respectivamente, as projeções da velocidade da corrente segundo os eixos  $x_b$  e  $y_b$  do referencial do veículo.

Admitindo-se que a velocidade da corrente é praticamente constante, pois a mesma varia de acordo com o tempo lentamente, sua derivada pode ser considerada nula para curtos intervalos de tempo. Para avaliar os esforços inerciais, pode-se admitir que as seguintes relações são verdadeiras.

$$\dot{u}_r = \dot{u} \quad (5.21)$$

$$\dot{v}_r = -\dot{v} \quad (5.22)$$

A partir destes dados, os esforços de arrasto induzidos pela correnteza podem ser calculados a partir das seguintes fórmulas.

$$X_c = 1/2 * \rho * V_{cr}^2 * A_c * C_{Xc}(\psi_r) \quad (5.23)$$

$$Y_c = 1/2 * \rho * V_{cr}^2 * A_c * C_{Yc}(\psi_r) \quad (5.24)$$

$$N_c = 1/2 * \rho * V_{cr}^2 * A_c * C_{Nc}(\psi_r) \quad (5.25)$$

Para estes casos,  $V_{cr}$  é a velocidade relativa da corrente em relação ao navio,  $A_c$  é a área projetada das obras vivas (parte do navio abaixo da superfície da água) em relação à corrente;  $C_{Xc}$ ,  $C_{Yc}$  e  $C_{Nc}$  representam os coeficientes dos esforços devidos à corrente em relação aos eixos  $x_b$ ,  $y_b$  e  $z_b$ , respectivamente.

Para poder calcular a velocidade relativa  $V_{cr}$  e o ângulo  $\psi_r$ , deve-se utilizar as seguintes fórmulas.

$$V_{cr} = \sqrt{u_r^2 + v_r^2} \tag{5.26}$$

$$\psi_r = \tan^{-1}\left(\frac{v_r}{u_r}\right) - \psi \tag{5.27}$$

## 6 PROJETO DO SISTEMA DE GUIAMENTO, NAVEGAÇÃO E CONTROLE

O presente capítulo aborda as condições necessárias para poder realizar a simulação com sucesso da embarcação. O mesmo divide-se nos subtópicos de planejamento, trajetória, sistema de guiamento, sistema de navegação e sistema de controle.

Deve-se constar que esse é o capítulo de suma importância para o projeto, pois esse determina como será o funcionamento da lógica para uma embarcação autônoma.

### 6.1 PLANEJAMENTO DA MISSÃO

O objetivo deste projeto é o desenvolvimento de um Sistema de Guiamento, Navegação e Controle (GNC) para uma pequena embarcação, capaz de executar com sucesso a entrada na Baía de Guanabara e que percorra o traçado, a fim de evitar regiões da baía em que o calado seja limitado. Isso se dá por conta de uma diferença de profundidade que impossibilita a entrada de navios cujo calado seja profundo, no porto do Rio de Janeiro. O que torna o porto da metrópole limitado, devido ao caminho que deve ser percorrido. Para isso foi elaborado um código GNC por meio das plataformas da empresa Mathworks®, MatLab e Simulink, no qual o projeto foi realizado em uma escala de 1:60, visando permitir a execução de um teste em escala na piscina presente no CEFET-RJ, realizando uma volta em torno da piscina. Tal objetivo, se deu a fim de demonstrar a capacidade de desenvolvimento de embarcações similares para operação em situação de ambiente hostil ou de difícil acesso.

Faremos uma análise de desempenho do sistema simulando a interface do aplicativo MathWorks® Simulink, no qual será simulada a operação intencionada para o projeto. Neste, a embarcação deverá percorrer a rota predefinida demonstrada no Apêndice A. O sistema de guiamento será responsável por efetuar correções no percurso, a fim de que a embarcação siga a rota desejada.

### 6.1.1 Escolha da Trajetória

A trajetória real a ser realizada foi estipulada ao longo de discussões com o professor orientador Alexandre Santiago, que detalhou as dificuldades presentes na aproximação de navios ao porto do Rio de Janeiro, como podemos observar na figura a seguir.

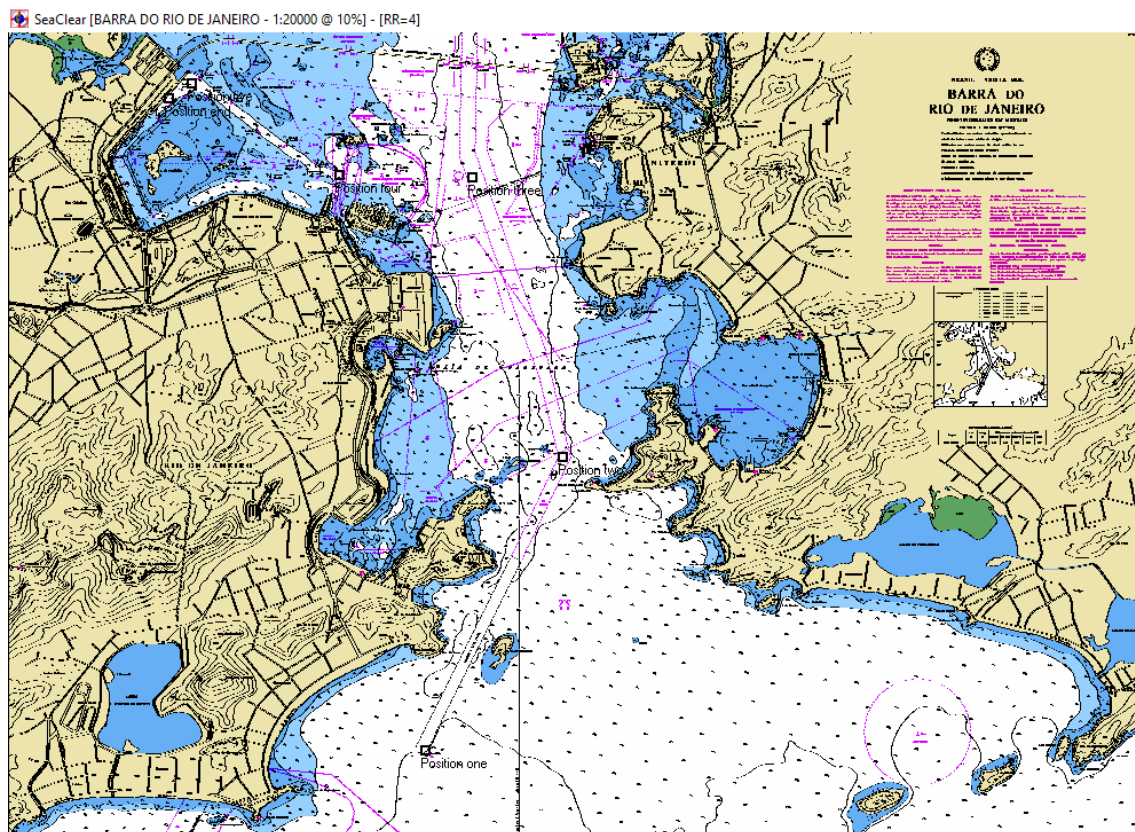


Figura 23: Carta náutica mostrando profundidade na Baía de Guanabara.

Fonte: Sea Clear, Alexandre Santiago (2017)

Como podemos observar na Figura 23, os diferentes tons de azul representam a profundidade dos corpos hídricos presentes na entrada da Baía de Guanabara, com as tonalidades mais escuras representando profundidades diminutas. Neste, podemos perceber que a região ao entorno do porto do Rio de Janeiro (parte noroeste da figura) possui uma profundidade baixa, o que atrapalha a viabilidade econômica do mesmo, já que existe um limite físico para a passagem de embarcações cujo calado seja superior a 17 metros.

Para isso foi projetado um caminho a ser percorrido, sendo este simulado no aplicativo MatLab e Simulink a fim de permitir o teste prático da viabilidade deste projeto, com o traçado sendo representado a seguir.

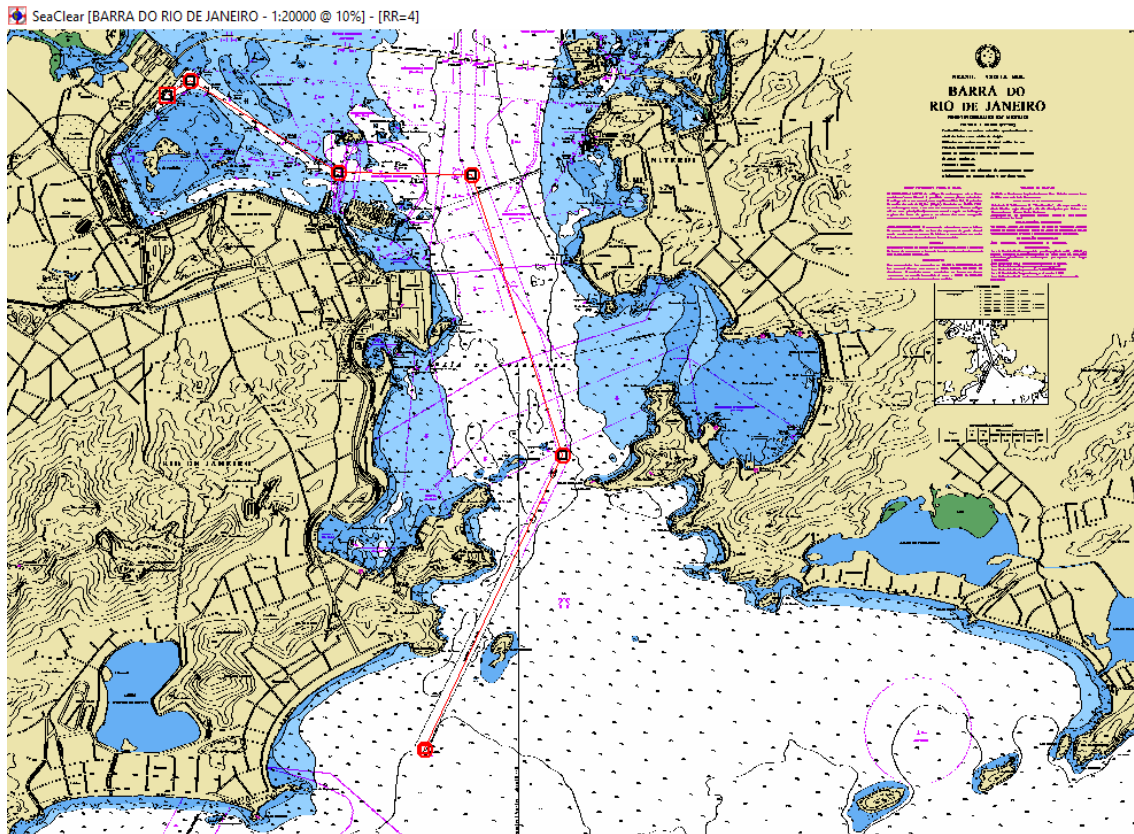


Figura 24: Waypoints sobrepostos na carta náutica.

Fonte: Alexandre Santiago (2017)

A partir do caminho elaborado pelo professor Alexandre Santiago (Figura 24), determinou-se os *way-points* (pontos de caminho) que deverão ser seguidos pelo algoritmo de guiamento.

Tabela 9 – Tabela de posição dos *way-points* para a missão real

Waypoint	Latitude ( $\phi$ )	Longitude ( $\lambda$ )	$\psi_{wp}$
1	22,58.789'S	43,09.788'W	26.47°
2	22,56.010'S	43,08.338'W	-13.77°
3	22,53.360'S	43,09.262'W	-89.61°
4	22,53.344'S	43,10.619'W	-56.84°
5	22,52.744'S	43,12.128'W	-117.09°
6	22,52.623'S	43,12.368'W	0°

Fonte: Santiago (2023)

Caso o projeto viesse a ser realizado em escala, seria utilizada a piscina do CEFET-RJ (representada nas Figuras 25 e 26), com a mesma servindo de testes para garantir que o sistema pode ser aplicado em ambientes reais. A

piscina possui 423,52 metros quadrados, com 25,84 metros de comprimento por 16,39 metros de largura. É válido ainda salientar, que apesar de não ser pertinente para o trabalho devido a se tratar de um barco não submergível, a piscina possui diferentes profundidades, com as bordas de 1,20 metros, enquanto o centro possui profundidade de 1,80 metros.



Figura 25: Foto da piscina a partir do sul, vista do 2º andar do bloco D.

Fonte: O Autor (2023)

Infelizmente não foi possível realizar o protótipo e o projeto acabou por ser realizado no campo teórico do ambiente virtual das plataformas MatLab e Simulink. Manteve-se, porém, a escala de 1:60 dos que seria utilizado para a realização do teste prático, mas optou-se por um campo bidimensional infinito seguindo os *way-points* traçados na tabela 10.

Tabela 10 – Tabela de posição dos *way-points* para escala 1:60

Waypoint	Latitude ( $\phi$ )	Longitude ( $\lambda$ )	$\psi_{wp}$
1	20	20	45°
2	-20	20	135°
3	-20	-5	90°
4	20	-5	90°
5	20	20	90°
6	0	0	135°

Fonte: Santiago, notas de aula (2023)



Figura 26: Foto da piscina vista por satélite com o planejamento traçado.

Fonte: Google Maps (2023)

A trajetória a ser percorrida na piscina seria uma volta simples (representada na Figura 26), programada de maneira que os sensores do navio sejam capazes de percorrer o traçado objetivo apenas por meio da interação dos sensores com as paredes a piscina. Esse teria como objetivo provar a capacidade de barcos autônomos em operar com total independência de operadores humanos para caso de operações em regiões sem sinal de comunicação.

## 6.2 SISTEMA DE GUIAMENTO

De acordo com Fossen (2002), o controle clássico de piloto automático de navios envolve controlar o ângulo de rumo  $\psi$ . O navio pode se mover com uma velocidade constante  $U$ , ao mesmo tempo em que a posição *sway*  $y$  é controlada. A rota desejada deve ser facilmente especificada por *way-points*, onde o principal benefício reside na segurança da navegação. Dessa forma o guiamento é responsável pela rota a ser completa, com o mesmo sendo elaborado a seguir por meio do seu algoritmo.

### 6.2.1 Algoritmo de Guiamento

O guiamento desejado é estipulado pelo algoritmo de guiamento, responsável por seguir uma trajetória (trajectory following) e filtrar os dados recebidos dos sensores da embarcação, e a partir da lógica interna, o mesmo deve traçar a rota a ser seguida, respeitando os limites impostos na lógica.

### 6.2.2 *Way-points* de orientação baseados na linha reta entre dois pontos

O sistema de guiamento por *way-points* é comumente utilizado para veículos não tripulados, podendo ser informados por um operador humano. Este é responsável por seguir a trajetória determinada e por meio da sua lógica, será capaz de desviar de obstáculos.

Segundo Fossen (2002), um sistema de guiamentos deve ser baseado em pelo menos dois *way-points*, com coordenadas  $[x_d(t_0), y_d(t_0)]$  e  $[x_d(t_f), y_d(t_f)]$ , respectivamente. O método utilizado pelo guiamento baseia-se no cálculo da distância entre dois *way-points* sucessivos, utilizando a equação 6.1 para determinar o ângulo  $\psi$ , responsável por ditar a angulação que o movimento irá acompanhar.

A vantagem desse método é a independência do mesmo perante variáveis importantes em estudos dinâmicos como a velocidade e o tempo. Além disso, assume-se que a embarcação está se movendo com velocidade  $U$  e o tempo de aproximação de  $t_f$  seja desconhecido. Conseqüentemente, será possível eliminar o tempo variável para obter a posição angular desejada.

$$\psi_d = \tan^{-1} \left( \frac{y_d(t_f) - y_d(t_0)}{x_d(t_f) - x_d(t_0)} \right) \quad (6.1)$$

Deve-se notar que o ângulo encontrado deve estar em um intervalo de  $(-\pi, \pi]$ . Esta necessidade de intervalo é necessária para evitar uma mudança radical e impraticável em embarcações reais. Esta fórmula requer que um sinal teste seja incluído para garantir que  $\psi_d$  esteja em um quadrante próprio. Nota-se também que a posição angular é observada quando mudados os *way-points*.



### 6.2.3 Way-points de orientação baseados por *Line-of-Sight*

Existe um algoritmo alternativo que é capaz de gerar uma trajetória mais suave, sendo o modelo baseado em LOS (sigla em inglês para *line of sight* [tradução livre para linhas de visão]). Esse modelo baseia-se no conceito trabalhado por Fossen (2002), no qual ocorra que a missão do veículo seja dada por um conjunto de *way-point* de passam  $[x_d(k), y_d(k)]$  para  $(k = 1, 2, \dots, N)$ . Conseqüentemente, define-se LOS em termos de uma posição angular desejada. O mesmo está representado na equação a seguir.

$$\psi_d(t) = \tan^{-1} \left( \frac{y_d(k) - y(t)}{x_d(k) - x(t)} \right) \quad (6.2)$$

Deve se tomar cuidado para selecionar o quadrante adequado de  $\psi_f$ . Após a verificação do quadrante realizada, os próximos *way-points* podem ser selecionados numa base de tempo, se o navio se encontrar dentro de um círculo de aceitação com raio  $\rho_0$  (*threshold*) em torno dos *way-points*  $[x_d(k), y_d(k)]$ . Além disso, se a localização do veículo  $[x(t), y(t)]$  para um determinado tempo  $t$  satisfaça a equação a seguir.

$$[x_d(k) - x(t)]^2 + [y_d(k) - y(t)]^2 \leq \rho_0^2 \quad (6.3)$$

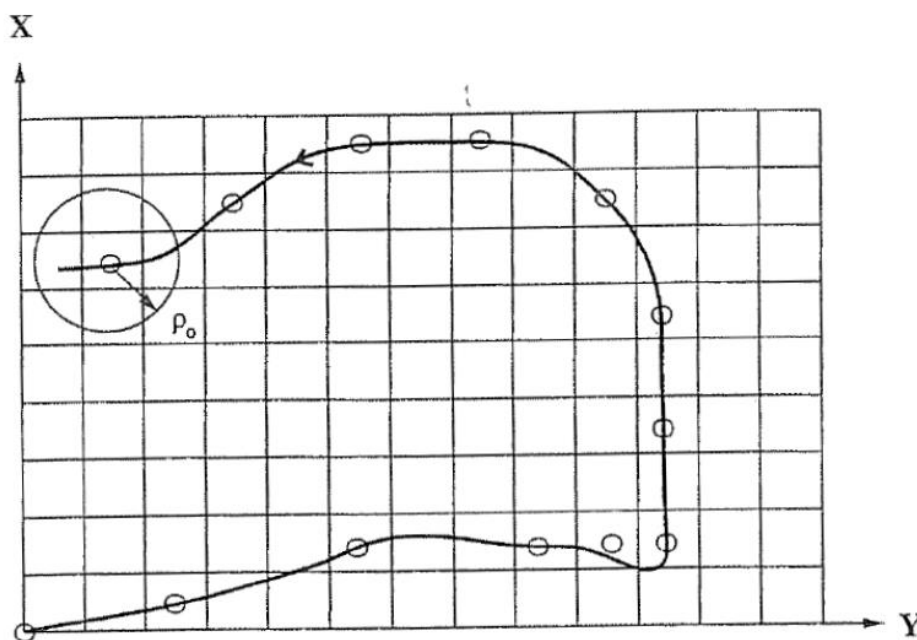


Figura 27: Planejamento de trajetória por meio de LOS.

Fonte: Fossen (1999)

O próximo *way-point*  $[x_d(k+1), y_d(k+1)]$  será selecionado. Uma diretriz poderia ser a escolha  $\rho_0$  igual ao comprimento de dois navios, isto é  $\rho_0 = 2L$ , representado na Figura 27.

### 6.3 SISTEMA DE NAVEGAÇÃO

O processo de filtragem de ondas é um dos mais importantes para o desenvolvimento de sistemas de controle de embarcações (Fossen, 2002). Sua importância se dá pela necessidade de equilibrar a movimentação da mesma, suprimindo as forças do movimento oscilatório das ondas, sendo esta importante para evitar o efeito de ciclo retroalimentativo que represente a perda do controle. A filtragem de ondas é normalmente realizada por meio de observadores que requerem posições e medições em separado.

A filtragem de ondas é crucial para sistemas de controle de movimento para embarcações, com a mesma sendo parte que não deve ser compensada pelo controle do sistema a não ser que a onda induza vibração de forma a danificar a operação.

Contudo, devido ao escopo abordado no início deste capítulo, não serão levados em consideração, as perturbações ambientais para esta simulação.

#### 6.3.1 Observadores para Navegação Autônoma

A navegação necessita de dois sensores para permitir a navegação autônoma de embarcações: um compasso giroscópico que meça os ângulos  $\psi$  e um giroscópio que meça os ângulos de  $r$ . Em muitos sistemas comerciais, o único giroscópio utilizado é o de controle de feedback, uma vez que a razão de *yaw* pode ser estimada unicamente por este estimador. Para sua execução, também é necessário incluir o Sistema GPS para obtenção de posição em tempo real.

## 6.4 SISTEMA DE CONTROLE

Para o projeto do sistema de controle será utilizado o modelo Linear Desacoplado, considerando apenas os movimentos de *surge*, *sway* e *yaw*. Nesta seção será apresentado o desenvolvimento dos controladores de posição e velocidade, como também a determinação de seus ganhos.

A estrutura básica em malha fechada utilizada, será o diagrama de blocos representados pela equação a seguir.

$$G_{MF} = \frac{G(s)G_c(s)}{1 + G(s)G_c(s)} \quad (6.4)$$

Para esta equação, temos que os polos de malha fechada são as raízes do seguinte polinômio característico.

$$1 + G(s)G_c(s) = 0 \quad (6.5)$$

### 6.4.1 Lógica Trajectory Tracking

Com o intuito de permitir o aumento da automação, a aplicação do controle remoto deve ser capaz de operar de maneira autônoma. Tal ponto foi explorado por Zheng (2014), onde foi levantado o método por meio de MPC (sigla em inglês para *Model Predictive Control* [ou em tradução livre Modelo Preditivo de Controle]). Tal método depende de um valor de trajetória informado para que este realize um cálculo de forças ótimas para uma embarcação com 3 DOF.

Ao final do experimento pode-se concluir que este método atendeu as expectativas e entregou os resultados para a correção. Sendo este um dos possíveis pontos que podem ser estudados em trabalhos futuros.

### 6.4.2 Especificação de Desempenho

O controle é obtido por meio da diferença entre a posição desejada (*setpoint*) e o ponto de controle, com este seguindo a lógica a seguir.

$$E_C = \eta_{sp} - \eta_{ref} \quad (6.6)$$

$$\dot{E}_C = -\dot{\eta}_{ref} \quad (6.7)$$

Baseado no tempo de resposta para uma embarcação para efetuar uma manobra em alto mar é de aproximadamente 60 segundos, deve ser utilizada a razão de tempo para a escala do modelo  $\lambda = 60$ , conforme na Tabela 8, encontramos a o tempo de resposta para a escala.

$$T_{Modelo} = \frac{60s}{\sqrt{60}} = 7,75s \quad (6.8)$$

Considerando o *settling time* para o modelo do Cybership II como  $T_{Modelo} = 7,75$ , temos os seguintes valores para encontrar a equação a seguir valor.

$$a_R = \zeta \omega_n \quad (6.9)$$

$$a_R = \frac{4}{7,75} = 0,5161 \quad (6.10)$$

Desta forma, encontra-se  $\omega_n = 1,3699$  a partir de  $\zeta = 0,707$ .

A lógica do cálculo é dada a partir do diagrama de blocos, na qual pode-se escrever a função de transferência em malha fechada a seguir.

$$\tau_x = K_p E + K_d \dot{E} + K_i \int_0^t E dt \quad (6.11)$$

$$(M_x)\ddot{x} + (D_x)\dot{x} = K_p E + K_d \dot{E} + K_i \int_0^t E dt \quad (6.12)$$

$$S^2 M_x x + S D_x x = -K_p x - S K_d x + \frac{K_i}{S} x \quad (6.13)$$

Ao multiplicar a equação 6.13 por S, obtêm-se o polinômio do 3º grau responsável por encontrar a raiz do Controle.

$$S^3 M_x x + S^2 (D_x + K_d) + S K_p + K_i = 0 \quad (6.14)$$

Assim o comportamento desejado pode ser expresso pela função de transferência representada a seguir onde  $a_T = 2\zeta\omega_n$  e  $b_T = \omega_n^2$ .

$$T(s) = \frac{b_T}{s^2 + a_T * s + b_T} \quad (6.15)$$

Considerando que este sistema terá um amortecimento crítico, será empregado o fator de amortecimento de  $\zeta = 0,707$ . A partir disso, obtém-se a função de transferência.

$$T(s) = \frac{0,311}{s^2 + 1,0322 * s + 1,8765} \quad (6.16)$$

### 6.4.3 Estratégia de Controle

Para o controle para os movimentos de *surge* e *sway*, será utilizado um controle tipo Proporcional e Integral, pois não houve a necessidade do uso do controle derivativo. Porém, o controle para o movimento de guinada (*yaw*), será utilizado um controle do tipo Proporcional e Derivativo.

#### 6.4.3.1 Controle de *Surge*

Para o movimento de surge, temos a seguinte função de transferência para a malha aberta.

$$G_x(s) = \frac{1}{25,8s + 0,72253} \quad (6.17)$$

Baseado na equação 4.33, consideramos:

$$\tau_{ux} = -K_{px}E - K_i \int_0^t E dt \quad (6.18)$$

Utilizando as equações 4.33 e 6.14 e aplicando Laplace, temos:

$$(m - X_{\dot{u}})s^2 - X_u s = -K_{px} - K_{ix}/s \quad (6.19)$$

Substituindo os valores relacionados na tabela 8 e multiplicando a equação por “s”, encontramos a seguinte equação.

$$(25,8)s^3 + (0,72253)s^2 + K_{px}s + K_{ix} = S^3M_x x + S^2(D_x + K_d) + SK_p + K_i \quad (6.20)$$

Para resolver essa equação do 3º grau, deve-se utilizar de  $\omega_n = 1,3699$  a partir de  $\zeta = 0,707$ .

$$\Delta(\lambda) = (\lambda^2 + 2\zeta\omega_n\lambda + \omega_n^2) * (\lambda + \zeta\omega_n) \quad (6.21)$$

Encontra-se a equação 6.22 que ao ser igualada com a equação 6.14 retorna os dados desejados.

$$(\lambda^2 + 1,937\lambda + 1,8766) * (\lambda + 0,9685) = \lambda^3 + 2,9055\lambda^2 + 3,7526\lambda + 1,8175 \quad (6.22)$$

$$\lambda^3 + 2,9055\lambda^2 + 3,7526\lambda + 1,8175 = (25,8)s^3 + (0,72253 + K_{dx})s^2 + K_{px}s + K_{ix} \quad (6.23)$$

Baseado na equação 6.23, é possível encontrar os ganhos para os valores de  $K_{px}$  e  $K_{ix}$ , apresentados a seguir, seguindo o modelo do diagrama de blocos presentes na Figura 28.

$$K_{px} = 3,7526 \quad (6.24)$$

$$K_{ix} = 1,8175 \quad (6.25)$$

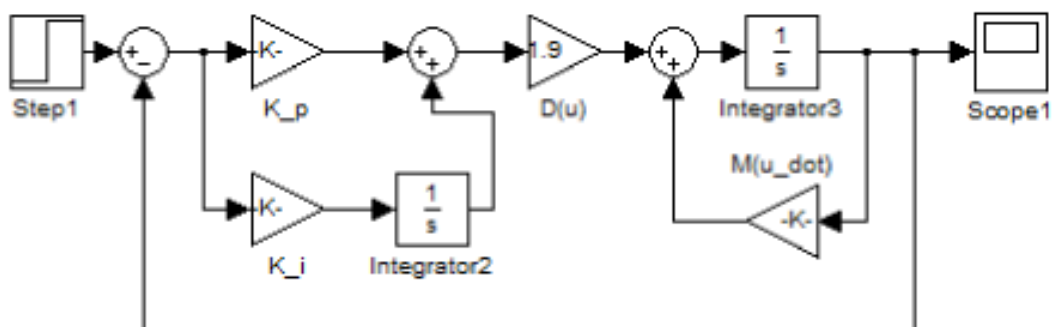


Figura 28: Diagrama de blocos para o controle de surge.

Fonte: MatLab Simulink (2023)

### 7.4.3.2 Controle de Sway

Para o movimento de sway, temos a seguinte função de transferência para a malha aberta.

$$G_Y(s) = \frac{1}{33,8s + 0,88965} \quad (6.26)$$

Baseado na equação 4.34, consideramos:

$$\tau_{vy} = -K_{py}E - K_{iy} \int_0^t E dt \quad (6.27)$$

Utilizando as equações 4.34 e 6.27 e aplicando Laplace, temos:

$$(m - Y_{\dot{v}})s^2 - Y_v s = -K_{py} - \frac{K_{iy}}{s} \quad (6.28)$$

Substituindo os valores relacionados na tabela 8 e multiplicando a equação por "s" e igualando a equação 6.23, encontramos a seguinte equação.

$$(33,8)s^3 + (0,88965)s^2 + K_{py}s + K_{iy} = \lambda^3 + 2,9055\lambda^2 + 3,7526\lambda + 1,8715 \quad (6.29)$$

Baseado na equação 6.29, é possível encontrar os ganhos para os valores de  $K_{py}$  e  $K_{iy}$ , apresentados a seguir, seguindo o modelo do diagrama de blocos presentes na Figura 29.

$$K_{py} = 3,7526 \quad (6.30)$$

$$K_{iy} = 1,8715 \quad (6.31)$$

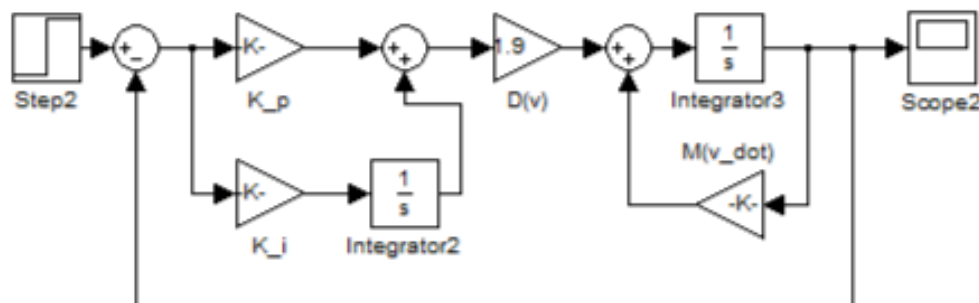


Figura 29: Diagrama de blocos para o controle de Sway.

Fonte: MatLab Simulink (2023)

### 6.4.3.3 Controle de Yaw

Por sua vez, excepcionalmente para o movimento yaw, foi utilizado um controle tipo PD, tendo a seguinte função transferência.

$$G_N(s) = \frac{1}{2,76s + 1,9} \quad (6.32)$$

Baseado na equação 4.35, consideramos:

$$\tau_{rn} = -K_{pn}E - K_{dn}\dot{E} \quad (6.33)$$

Utilizando as equações 4.35 e 6.34 e aplicando Laplace, temos:

$$(I_{zz} - N_r)s^2 + N_r s = -K_{dn}s - K_{pn} \quad (6.34)$$

Substituindo os valores relacionados na tabela 8 e multiplicando a equação por “s” e igualando a equação 6.23, encontramos a seguinte equação.

$$(2,76)s^3 + (1,9 + K_{dn})s^2 + K_{pn}s = \lambda^3 + 2,9055\lambda^2 + 3,7526\lambda + 1,8715 \quad (6.35)$$

Baseado na equação 6.35, é possível encontrar os ganhos para os valores de  $K_{pn}$  e  $K_{dn}$ , apresentados a seguir, seguindo o modelo do diagrama de blocos presentes na Figura 30.

$$K_{pn} = 3,7526 \quad (6.36)$$

$$K_{dn} = 1,0055 \quad (6.37)$$

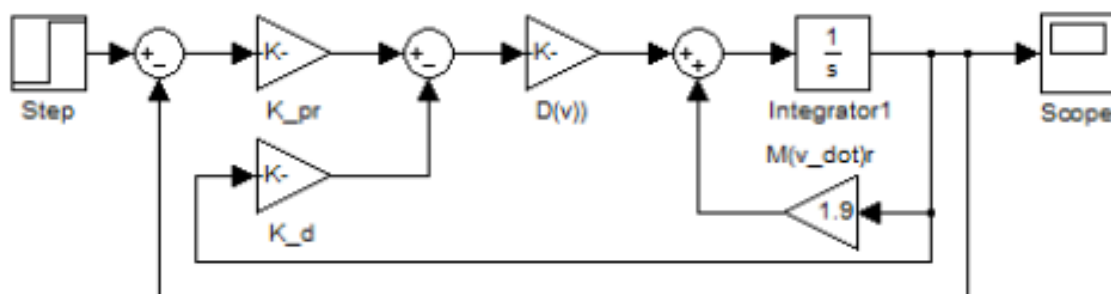


Figura 30: Diagrama de blocos para o controle de Yaw.

Fonte: MatLab Simulink (2023)



Relacionando as equações 6.23, 6.29 e 6.35, de acordo com o desempenho desejado na equação 6.15, é possível encontrar os ganhos a seguir.

$$K_p = \begin{bmatrix} 3,7526 & 0 & 0 \\ 0 & 3,7526 & 0 \\ 0 & 0 & 3,7526 \end{bmatrix} \quad (6.38)$$

$$K_i = \begin{bmatrix} 1,8715 & 0 & 0 \\ 0 & 1,8715 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.39)$$

$$K_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1,0055 \end{bmatrix} \quad (6.40)$$

As matrizes  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  são diagonais e contém respectivamente os ganhos: proporcional, integral e derivado, para cada grau de liberdade.

## 7 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O presente capítulo é relevante para a apresentação do modelo computacional desenvolvido, utilizando os programas MATLAB e Simulink ambos propriedade da empresa Mathworks. Essa simulação foi realizada com a intenção de encontrar os valores simulados para o projeto, utilizando a biblioteca GNU General Public, de livre acesso criadas pelo doutor Thor I. Fossen.

A seguir serão detalhados os sistemas de guiamento, controle e navegação presentes nos experimentos.

### 7.1 MODELO

Por conta do objetivo de permitir a automação de uma embarcação necessitar uma simulação para confirmar a viabilidade do projeto. Foi selecionada a plataforma MATLAB em conjunto com o software Simulink para realizar os experimentos em um campo virtual.

Para execução do projeto foram criados 4 arquivos, dois de MatLab denominados: “Gerencia\_ship.m” e “dist\_delta\_psi\_p.m” e um de Simulink, sendo esse: “Aut\_Ship.mdl”. Também contou-se com auxílio da biblioteca: “mssSimulink.slx”, esse arquivo sendo fundamental por possuir os dados da embarcação selecionada para o projeto.

### 7.2 MATLAB

Os arquivos de MATLAB servem como a janela de interação entre o Simulink e os dados inseridos por um operador que vise realizar testes de trajetória. Para isso contam-se com dois arquivos, ambos presentes no Apêndice B, cuja função é apresentar os dados matriciais da embarcação, os *way-points* pelos quais a mesma deve guiar-se e os gráficos resultantes da operação realizada no campo virtual. O segundo arquivo é referente a lógica do  $\Delta\psi$ , um cálculo de vital importância para o algoritmo de guiamento do projeto.

### 7.3 SIMULINK

O arquivo principal do Simulink, denominado de “Aut\_Ship.mdl” (Figura 31) é responsável por realizar as simulações do projeto, é responsável por interpretar os dados inseridos nos arquivos MATLAB e produzir os gráficos referentes a trajetória/percurso, velocidade u, velocidade v, velocidade r, força em X, força em Y e torque de guinada N.

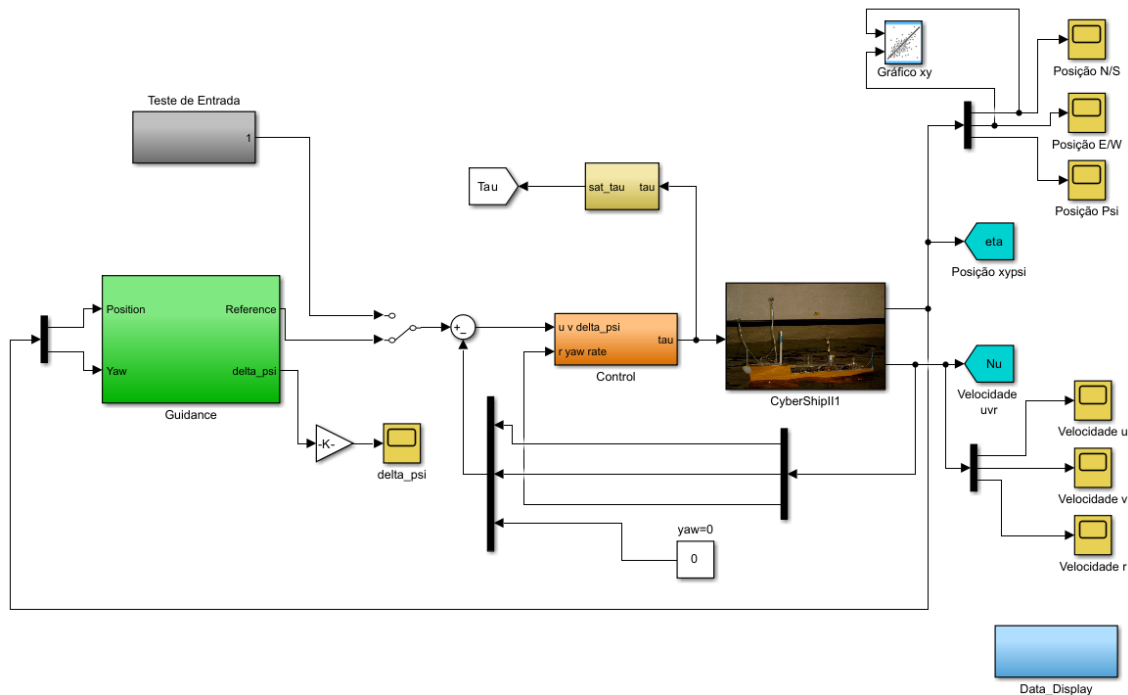


Figura 31: Lógica Aut\_Ship.mdl.

Fonte: MATLAB Simulink (2023)

Para a funcionalidade deste arquivo, necessitou-se o domínio dos algoritmos de guiamento, navegação e controle, todos os quais serão detalhados ao longo desse capítulo.

#### 7.3.1 Sistema de Guiamento no Simulink

O sistema de guiamento, presente no bloco verde da Figura 31, é responsável por realizar os cálculos de acompanhamento de trajetória, correção

do ângulo  $\psi$  e de tomada de decisão de curvas por meio da lógica  $\Delta\psi$  (dependente do arquivo MATLAB), o mesmo está detalhado na Figura 32.

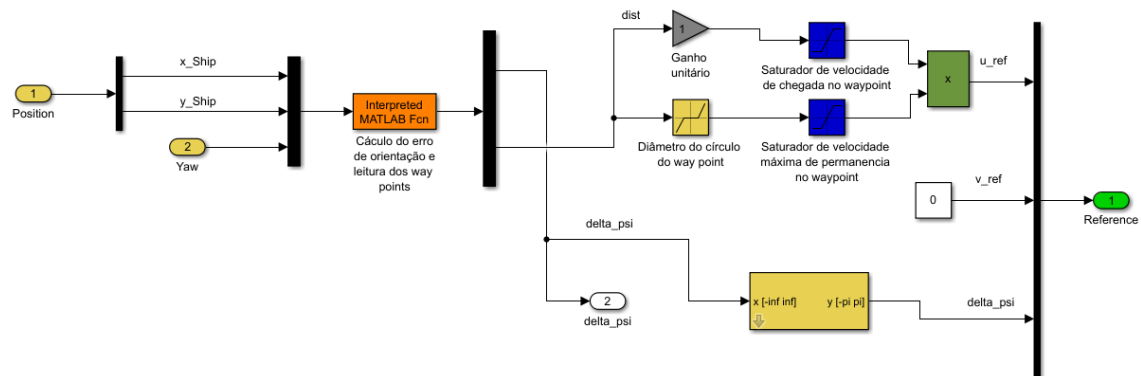


Figura 32: Lógica do Guiamento.

Fonte: MatLab Simulink (2023)

Presentes nesse sistema de guiamento, estão as lógicas responsáveis pelo controle da velocidade do navio e cálculo de erro de orientação. O arquivo toma por referencial sempre o navio, e calcula por meio da distância, a velocidade que a embarcação deve adotar, a fim de não passar do *threshold* de 3 metros do *way-point*. O cálculo do  $\Delta\psi$  é de suma importância, devido a necessidade de realizar curvas suaves, necessárias em embarcações reais.

### 7.3.2 Sistema de Controle no Simulink

O sistema de controle (representado na Figura 33) é responsável pela velocidade, posição e forças atuadores para o CyberShip II. Esse utiliza de controles proporcionais integrativos (PIs) para as suas posições  $x$  e  $y$  dentro do espaço cartesiano e as velocidades  $u$  e  $v$  presentes neste espaço, enquanto o controle proporcional derivativo (PD) é responsável pelo controle de rumo do navio. Os controles podem ser observados na Figura 34.

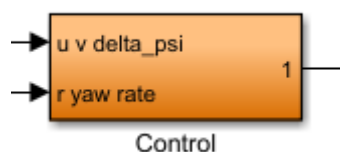


Figura 33: Bloco de Controle.

Fonte: MatLab Simulink (2023)

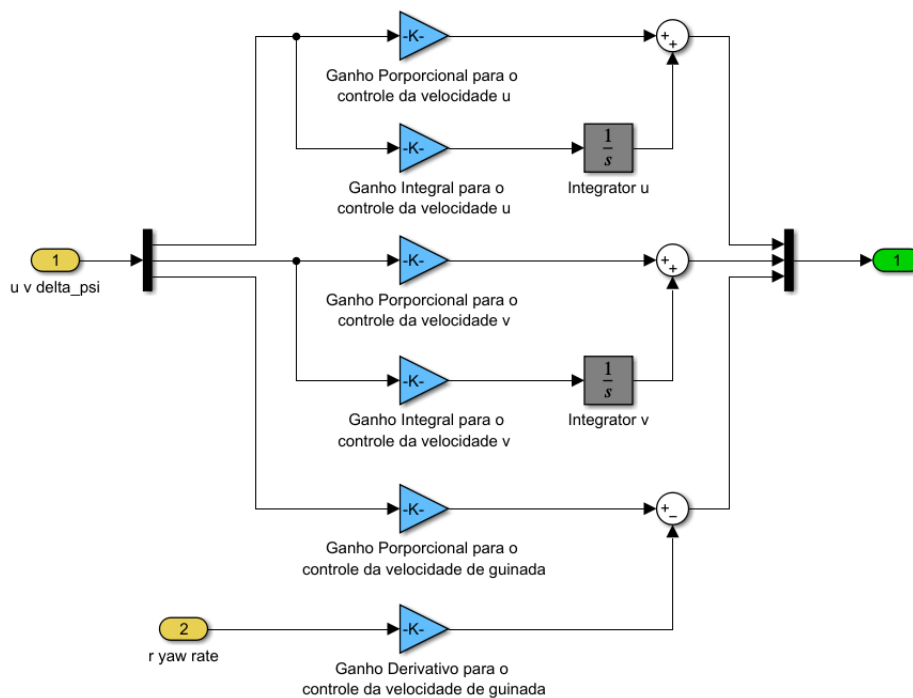


Figura 34: Lógica Controle.

Fonte: MatLab Simulink (2023)

### 7.3.3 Blocos Complementares no Simulink

Afim de realizar testes diretamente pelo Simulink sem a necessidade da utilização de dados presentes Workspace do MATLAB, este bloco é tem objetivo auxiliar e não é relevante para os testes, é representado pela Figura 35.



Figura 35: Bloco de Testes Autônomo.

Fonte: MatLab Simulink (2023)

Dados importantes sobre a operação são representando no bloco Data\_Display, sendo esse responsável por retornar os dados das velocidades e forças obtidas durante a simulação, sua lógica é representada na Figura 36. Esse bloco é responsável pela conversão dessas informações para o arquivo principal do MATLAB, no qual os parâmetros são referentes a Eta ( $\eta$ ) que indica a posição,

$\nu$  ( $v$ ) que indica a velocidade para um dado intervalo de tempo e  $\tau$  ( $\tau$ ) indica a força e o torque.

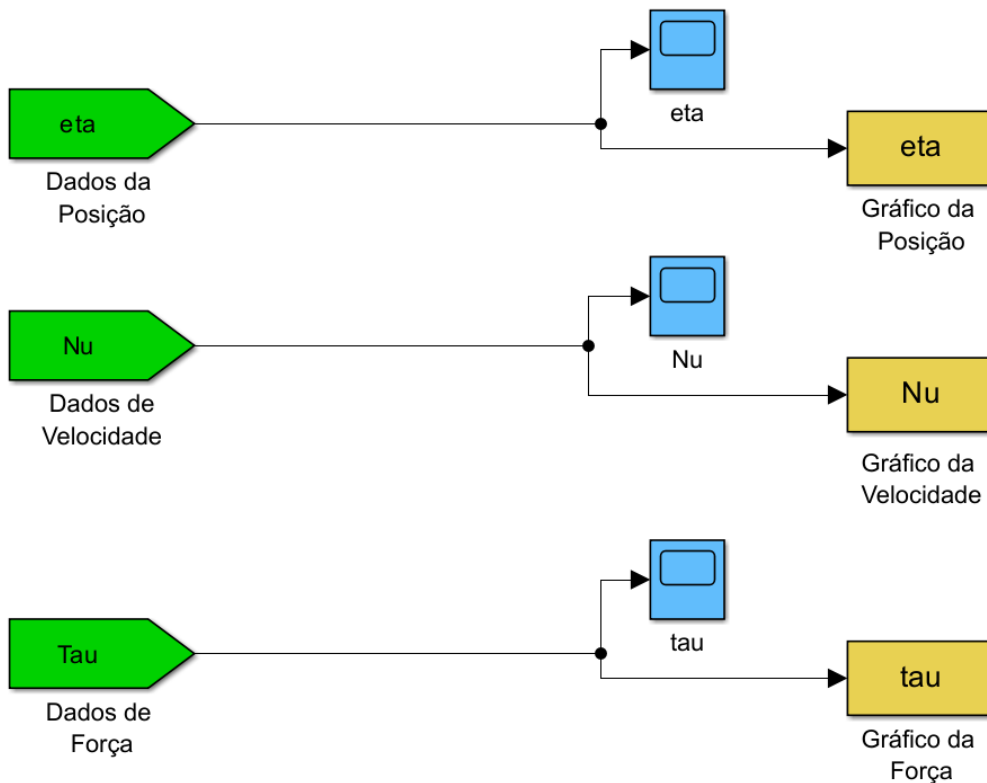


Figura 36: Lógica do Data\_Display.

Fonte: MatLab Simulink (2023)

No sistema do CyberShip II, conforme está demonstrado na Figura 37, pode-se encontrar o controle de saturação das forças  $\tau$  do navio, que restringe os esforços exercidos pelo controlador. Em  $\text{inv}(M)$  e  $D$  são encontradas as matrizes de inércia e de amortecimento hidrodinâmico respectivamente. Em “Rotation matrix in yaw 1”, é encontrado um recurso do próprio CyberShip II, onde calcula-se a matriz de rotação em yaw.

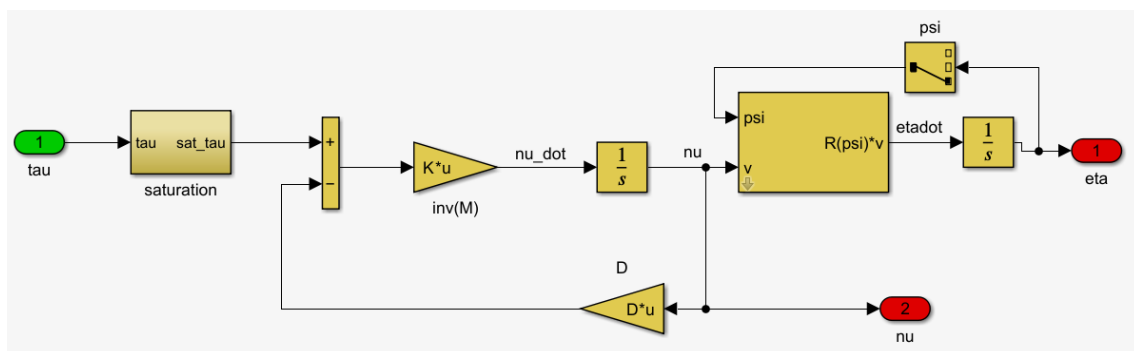


Figura 37: Modelo CyberShip II.

Fonte: MatLab Simulink (2023)

## 7.4 RESULTADOS OBTIDOS

Conforme citado acima, os parâmetros obtidos durante a simulação são transportados para o *Workspace* do MATLAB. O arquivo principal é responsável por gerar as representações gráficas dos mesmos para o período determinado de 2500 segundos.

### 7.4.1 Gráfico da Trajetória

Um dos objetivos primários do trabalho era corrigir a operação do algoritmo de guiamento, a fim de garantir que o mesmo respeitasse os *thresholds* dos *way-points* presentes e realizasse o movimento de guinada correto. A partir da visualização do gráfico a baixo, pode-se concluir que o mesmo obedece aos limites para a realização das curvas e cumpre dentro do planejado o percurso estipulado.

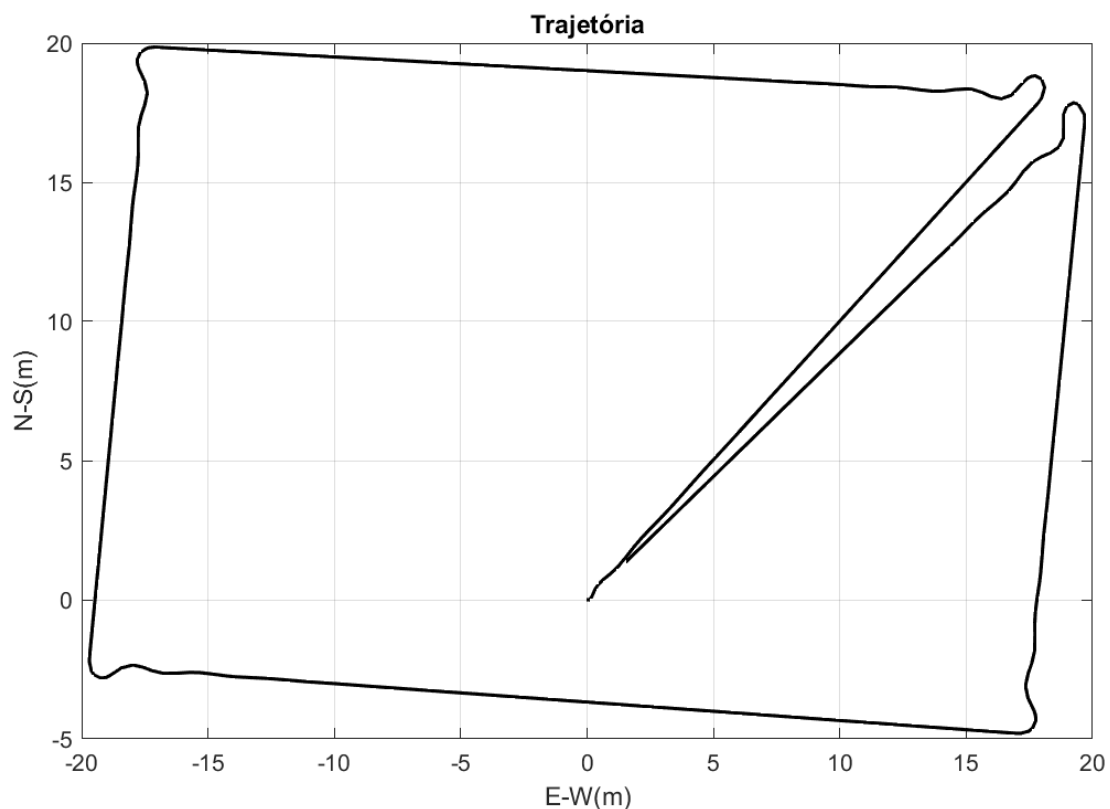


Figura 38: Gráfico da trajetória.

Fonte: MatLab Simulink (2023)

### 7.4.2 Gráfico da Velocidade u

Conforme pode ser observado na figura a seguir, a partir de 5 segundos, é possível observar um aumento exponencial na velocidade para superar a inércia do navio. A embarcação atinge sua velocidade de cruzeiro em 200 segundos, sendo essa de 0,5 m/s. No gráfico é possível perceber variações na velocidade, sendo todas as instâncias *way-points*. Vale ressaltar que a velocidade negativa no final do gráfico é referente ao término do percurso.

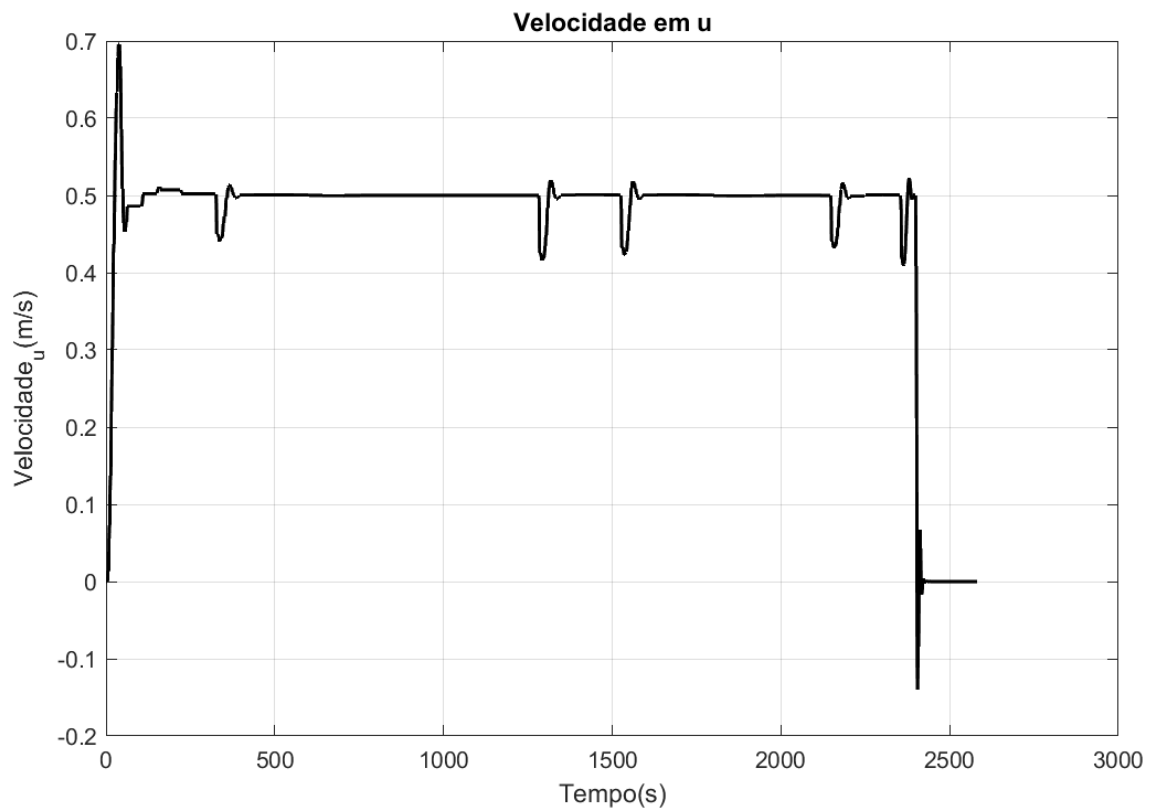


Figura 39: Gráfico da velocidade em u.

Fonte: MatLab Simulink (2023)



### 7.4.3 Gráfico da Velocidade $v$

Pode-se observar que a velocidade em relação a  $v$  possui uma pequena velocidade lateral, coincidente com os *way-points* delimitados para o trajeto da embarcação.

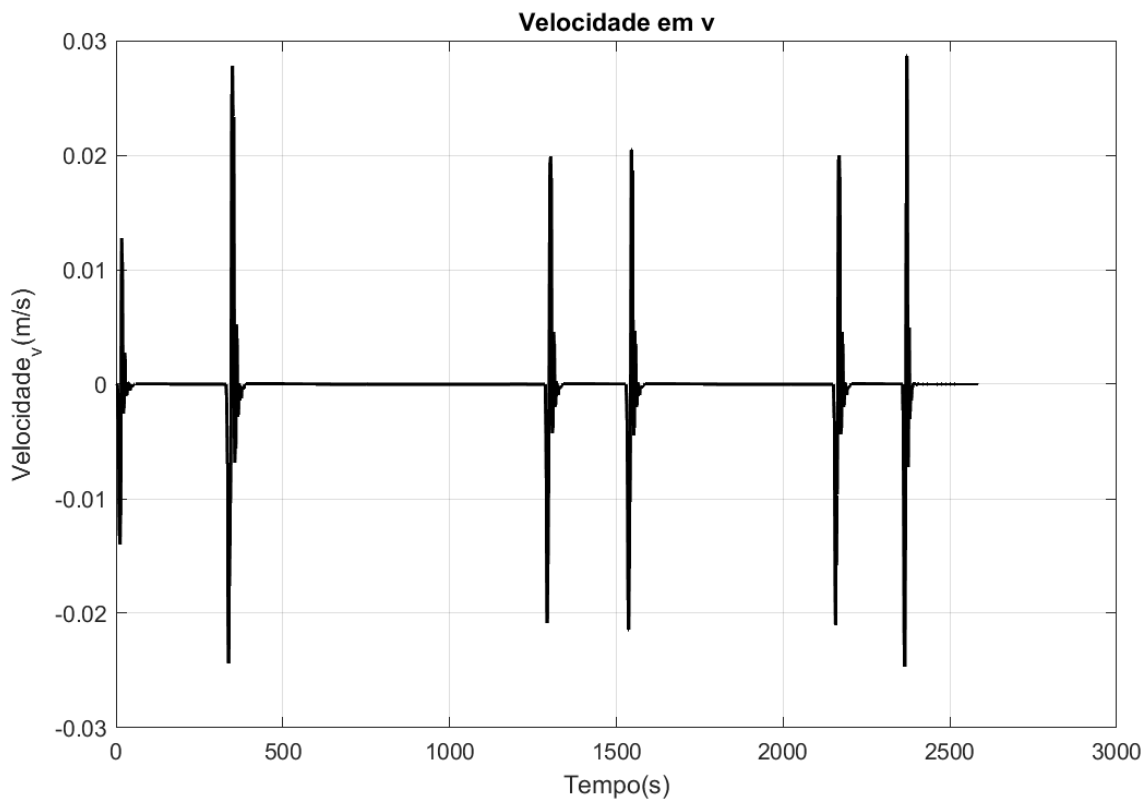


Figura 40: Gráfico da velocidade em  $v$ .

Fonte: MatLab Simulink (2023)

#### 7.4.4 Gráfico da Velocidade r

Pode-se afirmar que a atuação do leme ocorreu devido as mudanças de rumo ao longo dos *way-points* relacionados, todas elas sendo pontuais de maneira não permitir que as mesmas interfiram com a trajetória fora das regiões de *threshold* dos *setpoints*.

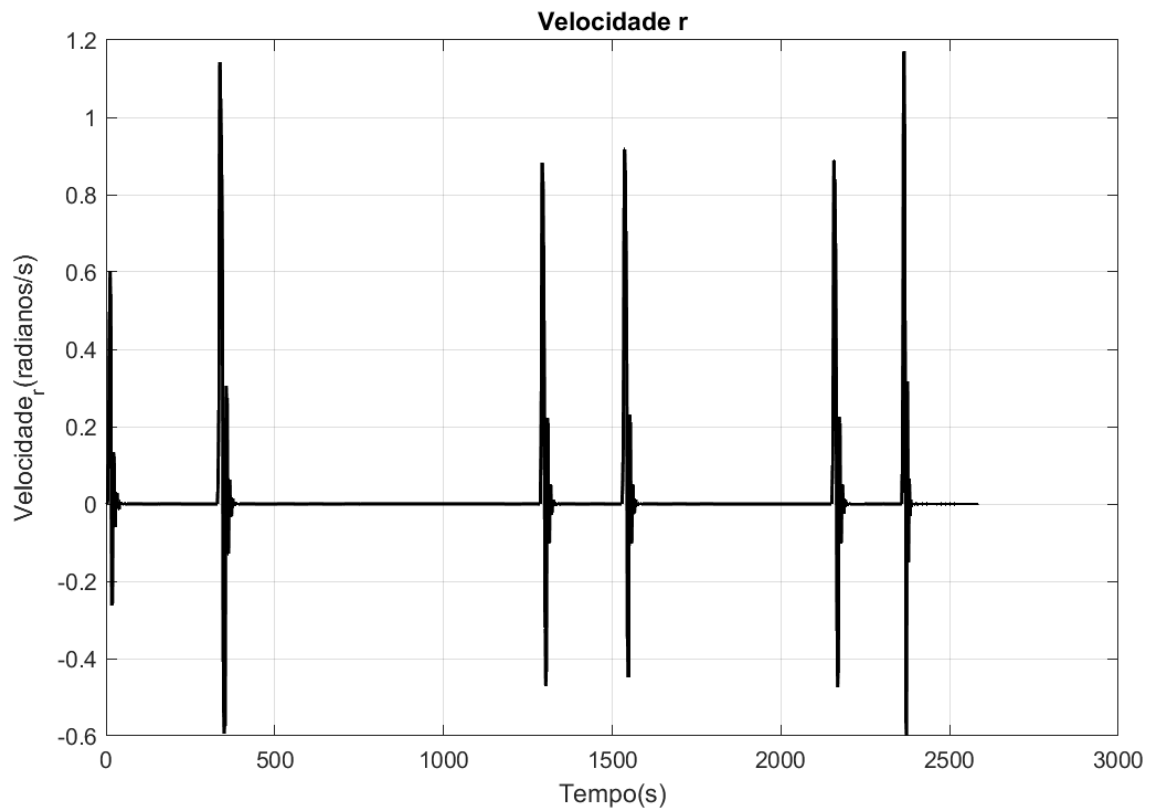


Figura 41: Gráfico da velocidade em r.

Fonte: MatLab Simulink (2023)

#### 7.4.5 Gráfico da Força Longitudinal na direção X

A partir do apresentado na figura a seguir, pode-se afirmar que a atuação da força é de maior impacto no início do percurso devido ao momento de inércia exigir valores de força superiores para iniciar o movimento do navio. Com as atuações seguintes sendo limitadas aos *way-points* relacionados, que delimitaram suas atuações breves.

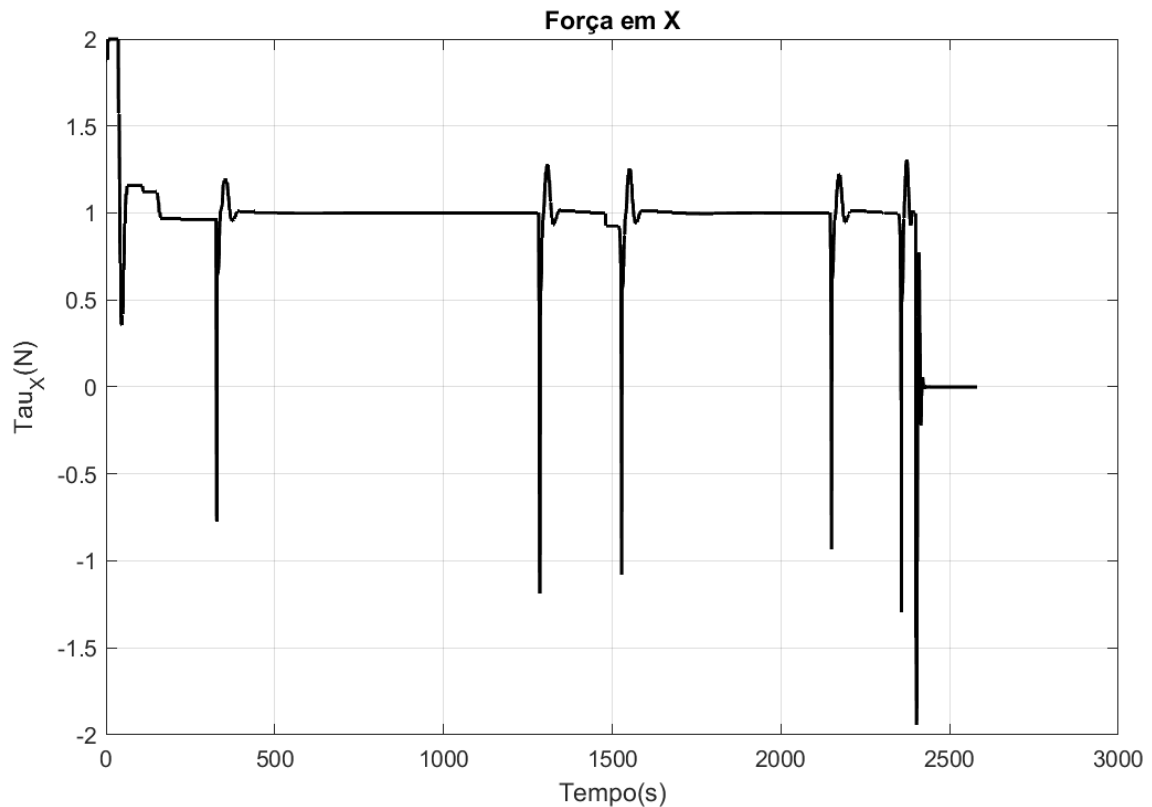


Figura 42: Gráfico da força em X.

Fonte: MatLab Simulink (2023)

#### 7.4.6 Gráfico da Força Transversal na direção Y

Conforme observado a seguir, pode-se perceber que a força Y tem uma atuação mais constante e mais breve que a força X. Isso deve-se por conta da constante presença independente dos *way-points* relacionados, com as ocorrências estando relacionadas com a presença da força lateral.

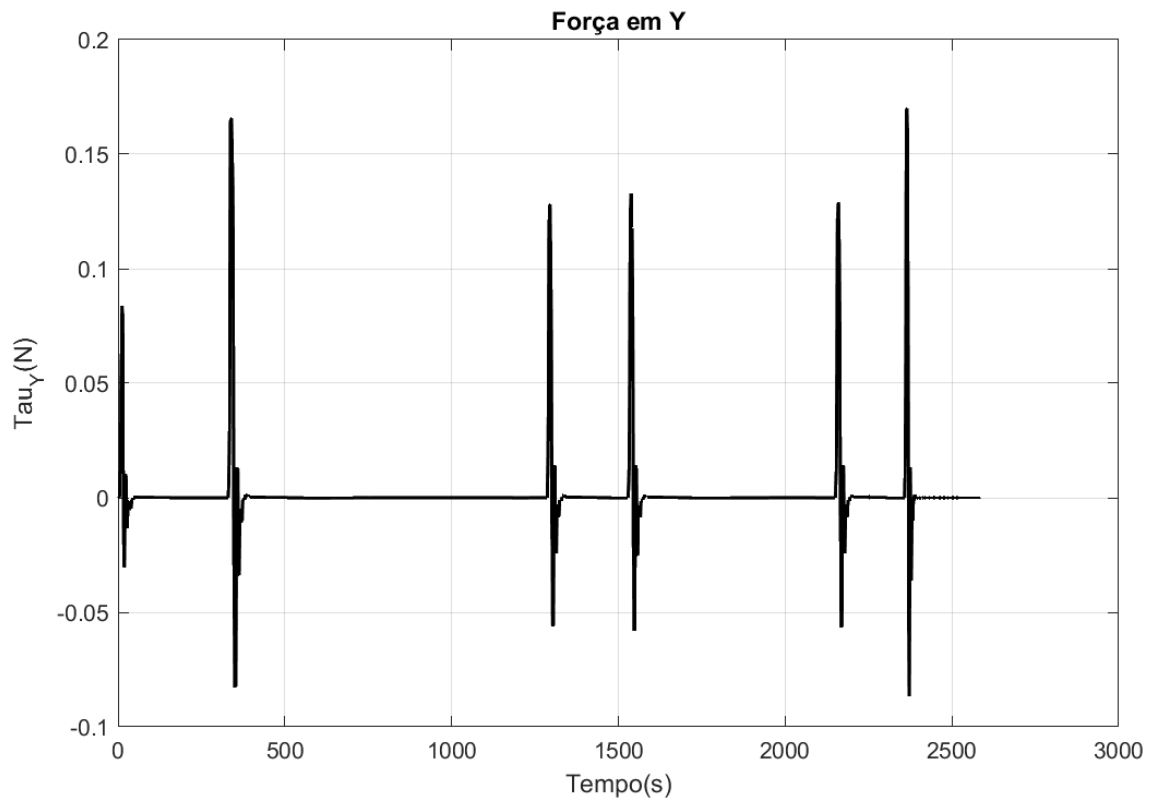


Figura 43: Gráfico da força em Y.

Fonte: MatLab Simulink (2023)

#### 7.4.7 Gráfico do Torque de Guinada N

Deve-se também apresentar os dados referentes ao torque de guinada. Este sendo responsável pela mudança de direção da embarcação e segue a lógica de saturação, sendo está responsável por impor um limite para o torque a ser aplicado. Percebe-se que a atuação ocorre ao longo dos *way-points* e atinge o limite de saturação brevemente, antes de zerar novamente o torque a fim de não interferir na movimentação.

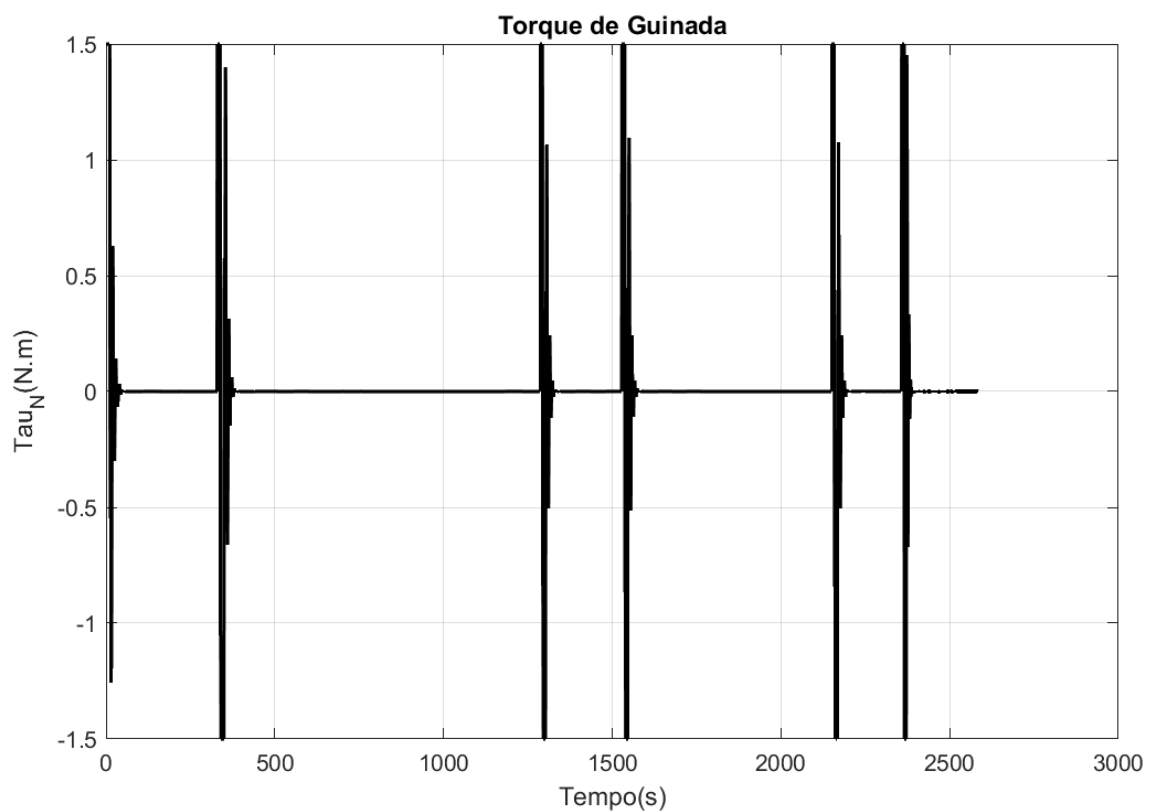


Figura 44: Gráfico do Torque de Guinada N.

Fonte: MatLab Simulink (2023)

## 8 CONCLUSÃO

O presente trabalho pode ser considerado um estudo bem-sucedido quanto aos princípios da mecânica que atua em embarcações. Com este sendo realizado primariamente por meio de estudos na extensa bibliografia do CEFET/RJ, USP, UEZO, IST e por meio de consultas com o professor orientador e seus livros de apoio publicados por Fossen e pela SNAME.

O objetivo deste projeto foi de aprimorar um Sistema de Guiamento e Controle para Navios, de forma a permitir que o mesmo opere de maneira autônoma até a trajetória desejada. Para a implementação deste projeto, foram desenvolvidos conceitos aprendidos nas disciplinas de estática, dinâmica e controle e automação naval e offshore, além de cursos externos dos aplicativos desenvolvidos pela empresa Mathworks® que propiciaram a execução da simulação do mesmo. Desta forma, foi desenvolvido um sistema para simular o guiamento, navegação e controle de uma embarcação, com a tomada para os experimentos sendo o modelo CyberShip II desenvolvido pelo professor doutor Thor I. Fossen.

A partir dos resultados práticos obtidos, pode-se perceber que os algoritmos de guiamento estão executando de maneira desejada, uma vez que a simulação da embarcação percorreu o caminho determinado com exatidão. Deve-se citar o êxito em especial de correção de  $\Delta\psi$ , de vital importância para execução de curvas precisas nos *way-points* apontados. O controle também realizou de maneira correta as adequações de trajetória e corrigiu o percurso a ser executado na simulação.

A partir da execução correta da simulação da embarcação, comprovou-se a capacidade de realização de testes práticos com modelos em escala, estipulados neste trabalho.

### 8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, sugere-se abordar pontos que não puderam ser abordados apropriadamente neste trabalho, e que são vitais durante a execução de uma simulação naval. Dessa forma, são propostas as

seguintes sugestões para a continuação do trabalho a fim de apresentar um protótipo que cumpra os requisitos estabelecidos neste trabalho.

Executar testes fisicamente para confirmar a viabilidade do modelo de automação naval, para execuções sem a presença de intempéries, sugere-se testes na piscina semiolímpica do CEFET-RJ, que teve seus dados descritos no capítulo 6, e para testes mais elaborados, uma colaboração com da Universidade Federal do Rio de Janeiro, que detém um tanque para testes que será capaz de simular intemperes complexas.

Adicionar ao sistema de guiamento distúrbios ambientais como maré, ondas e ventos, com a filtragem de sinais destes sensores para corrigir esses as forças atuantes no navio de maneira a não prejudicar a execução do percurso.

Estudar de maneira mais aprofundada conceitos como *trajectory tracking* e *trajectory following*, devido à seu grande potencial para o desenvolvimento de sistemas de embarcações autônomas.

Modelagem dinâmica dos dois propulsores azimutais e do propulsor túnel por meio de um sistema de alocação de potência.

Com a confirmação de as correções para intemperes estão adequadas, e com o modelo em escala 1:60 executando os testes práticos, poderá realizar um teste na própria Baía de Guanabara para demonstrar a tecnologia que poderá vir a integrar o mercado a fim de facilitar o transporte de navios no Rio de Janeiro.

## REFERÊNCIAS

ALTINO, L. **A frota esquecida e à espera de legislação para ser desmontada.** Jornal O GLOBO, Rio de Janeiro, 19 de novembro de 2023, página 16.

ARANDA, J.; ARMADA, M. A.; CRUZ, J. M.; **Automation for the maritime industries**, 1. ed. Madrid, España: Producción Gráfica Multimedia, 2004.

ABEAM.; **A Navegação de Apoio Marítimos no Brasil, História e Evolução.** 1. Ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Associação Brasileira de Empresas de Apoio Marítimo, 1989.

ARZANFUDI, M. M.; **Low Frequency Second Order Wave Exceting Forces and Floating Structures.** Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação da Delft University of Tecnology. Julianalaan, Delft, Netherlands, 2016.

BERTRAM, V.; **Practical Ship Hydrodynamics.** 1. ed. Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2000.

CARVALHO, L. F. F.; **Controle e Navegação de Navio para Apoio Oceânico** Trabalho de conclusão de curso, Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro Unidade Nova Iguaçu. Nova Iguaçu, RJ, Brasil, 2017.

CHAKRABARTI, S. K.; **Handbook of Offshore Engineering.** 1. ed. Plainfield, Illinois, United States of America: Elsevier, 2005.

FONSECA, M. M.; **Arte Naval**, v. I. 7. ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Serviço de Documentação da Marinha, 2005.

FOSSEN, T. I.; **Guidance and Control of Ocean Vehicles.** 4. ed. New York, NY, United States of America: John Wiley & Sons, 1999.

FOSSEN, T. I.; **Marine Control Systems Guidance, Navigation, and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles.** 1. ed. Trondheim, Norway: Marine Cybernetics, 2002.



JENTZSCH, R.; **Estudo de modelos reduzidos a predição de parâmetros térmicos ambientais em instalações agrícolas**. 2002. 113 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, Brasil, 2002.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION; **International Towing Tank Conference (frictional resistance coefficient)**. London, United Kingdom, 1957.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION; **International Convention on Load Lines**. London, United Kingdom, 1966.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION; **International Towing Tank Conference (performance prediction method)**. London, United Kingdom, 1978.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION; **International Towing Tank Conference (Resistance Uncertainty Analysis, Example for Resistance Test)**. London, United Kingdom, 2002.

LEWIS, E. V.; **Principles of Naval Architecture: Stability and Strength, v. I**. 1. ed. New Jersey, NJ, United States of America: The Society of Naval Architecture and Marine Engineers (SNAME), 1988.

LEWIS, E. V.; **Principles of Naval Architecture: Resistance, Propulsion and Vibration, v. II**. 1. ed. New Jersey, NJ, United States of America: The Society of Naval Architecture and Marine Engineers (SNAME), 1988.

NEWMAN, J. N.; **Marine Hydrodynamics**, 40. ed. Cambridge, MA, United States of America: MIT Press, 2017.

PINKSTER, J. A.; **Low Frequency Second Order Wave Exciting Forces and Floating Structures**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação da Delft University of Technology. Julianalaan, Delft, Netherlands, 1980.

SANTIAGO, A. A.; **Identificação Modal Aplicada ao Posicionamento Dinâmico de Sistemas Oceânicos** Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro da COPPE. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

SIQUEIRA, J. F.; **Projeto de um Navio em Escala Dotado de Posicionamento Dinâmico** Trabalho de conclusão de curso, Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro Unidade Nova Iguaçu. Nova Iguaçu, RJ, Brasil, 2014.

SKJETNE, R.; SMOGELI, Ø; FOSSEN, T. I.; Modeling, identification, and adaptive maneuvering of CyberShip II: A complete design with experiments. **IFAC Proceeding**, Trondheim, Norway, v.37, n. 10, p. 203-208, jul. 2004.

TRIANAFYLLOU, M. S.; HOVER, F. S.; **Maneuvering and Control of Marine Vehicles**. 2. ed. Cambridge, MA, United States of America: MIT Press, 2003.

ZHENG, H.; NEGENBORN, R. R.; LODEWIJKS, G.; Trajectory tracking of autonomous vessels using model predictive control, 2014, Cape Town. **Anais...** Cape Town, CT, Union of South Africa: International Federation of Automatic Control, 2014. p. 8812-8818.

## APÊNDICE A – PEQUENO DICIONÁRIO NAVAL

- Anteparas – São as separações verticais que subdividem em compartimentos o espaço interno do casco para cada pavimento. Concorrem também para manter a forma e aumentar a resistência do casco.
- Bombordo – Parte esquerda do navio.
- Boreste – Parte direita do navio.
- Buçarda – Peça horizontal que se coloca no bico da proa ou na popa, contornando-as por dentro de Bombordo ou Boreste para dar maior resistência.
- Carena – Invólucro do casco abaixo do plano de flutuação, isto é, a parte que fica quase totalmente ou totalmente imersa.
- Casco – Corpo do navio sem mastreação, aparelhos e acessórios.
- Cavernas – Peças curvas que fixam na quilha em direção perpendicular a ela e que servem para dar forma ao casco e sustentar o chapeamento exterior. Os braços das cavernas acima do bojo são denominadas balizas.
- Convés – Pavimentos contínuos (ou não) de proa a popa.
- Embornal – Abertura para escoamento das águas de baldeação ou da chuva.
- Hastilhas – Chapas colocadas verticalmente no fundo do navio, em cada caverna, aumentando a altura destas na parte que se estende da quilha ao bojo.
- Longarina ou Longitudinais – Peças colocadas de proa a popa, na parte interna das cavernas, ligando-as entre si.
- Passadiço – Pavimento de onde o comandante manobra o navio. Nele ficam usualmente os camarins do leme, de navegação e de rádio.
- Pé de carneiro – Colunas suportando os vaus para aumentar a rigidez da estrutura, quando o espaço entre as anteparas estruturais é grande, ou para distribuir um esforço local por uma extensão maior do casco.
- Perpendiculares (PP) – São duas retas normais à linha d'água projetada, contidas no plano diametral e traçadas em dois pontos especiais na proa e na popa, no desenho de linhas do navio.
- Popa – Parte posterior do navio.
- Proa – Parte anterior do navio a partir de um sentido de navegação normal.
- Quilha – Peça disposta em todo o comprimento do casco no plano diametral e na parte mais baixa do navio. É a peça que suporta os maiores esforços.
- Roda de proa – Peça robusta que, em prolongamento da quilha, na direção vertical, forma o extremo avante do navio.
- Sicordas – Peças colocadas de proa a popa num convés, ligando os vaus entre si.
- Superestrutura – Construção feita sobre o convés principal, estendendo-se ou não de um bordo ao outro.
- Superfície molhada – É a superfície externa da carena que fica efetivamente em contato com a água.

- Trincariz – Fiada de chapas mais próximas aos costados, em cada convés, usualmente de maior espessura que as demais, e ligando os vaus entre si às cavernas.
- Vaus – Vigas colocadas de Boreste a Bombordo em cada caverna, servindo para sustentar os chapeamentos dos conveses e das cobertas, e também para atracar entre si as balizas das cavernas.

## APÊNDICE B – CÓDIGOS DE MATLAB

Arquivo 1 (Principal): Gerencia\_ship.m

```

%%_____Limpa a tela
clear
clc

global WP linha x_req y_req dist nWP

%%_____parâmetros do navio_____%%
%PARAMETROS
tfinal = 2500;

linha=1;
%% Matrizes

M=[25.8 0 0; 0 33.8 0; 0 0 2.76]; %Matriz de inércia
D=[0.72253 0 0; 0 0.88965 0.1; 0 0.1 1.9]; %Matriz de amortecimento

K_p =[3.7526; 3.7526; 3.7526];
K_i =[1.8715; 1.8715; 0];
K_d =1.0055;

WP=[20 20
    -20 20
    -20 -5
    20 -5
    20 20
    0 0]; %way-points definidos para o percurso

WP=WP.*1;

x_req=WP(1,2);
y_req=WP(1,2);
dist=10;
linha=1;

% Numero de Waypoints
tam=size(WP);
nWP=tam(1);

%%_____Simulation_____%%
open('Aut_Ship')
sim('Aut_Ship',tfinal);

%%_____Apresentação de dados_____%%

plot(eta(:,1), eta(:,2),'k-', 'LineWidth',1.5)
title('Trajetória');
ylabel('N-S(m)');
xlabel('E-W(m)');
grid;
pause
% print -depsc2 trajectory

```

```

plot(Nu(:,1),'k-','LineWidth',1.5)
title('Velocidade em u');
ylabel('Velocidade_u(m/s)');
xlabel('Tempo(s)');
grid;
pause
% print -depsc2 velocidade_u_time

plot(Nu(:,2),'k-','LineWidth',1.5)
title('Velocidade em v');
ylabel('Velocidade_v(m/s)');
xlabel('Tempo(s)');
grid;
pause
% print -depsc2 velocidade_v_time

plot(Nu(:,3),'k-','LineWidth',1.5)
title('Velocidade r');
ylabel('Velocidade_r(radianos/s)'); %trocado de graus/s para radianos/s
xlabel('Tempo(s)');
grid;
pause
% print -depsc2 velocidade_psi_time

plot(tau(:,1),'k-','LineWidth',1.5)
title('Força em X');
ylabel('Tau_X(N)');
xlabel('Tempo(s)');
grid;
pause
% print -depsc2 tau_x_time

plot(tau(:,2),'k-','LineWidth',1.5)
title('Força em Y');
ylabel('Tau_Y(N)');
xlabel('Tempo(s)');
grid;
pause
% print -depsc2 tau_y_time

plot(tau(:,3),'k-','LineWidth',1.5)
title('Torque de Guinada');
ylabel('Tau_N(N.m)');
xlabel('Tempo(s)');
grid;
% print -depsc2 tau_N_time

```

Arquivo 2 (Auxiliar): dist\_delta\_psi\_p.m

```

function [out] = dist_delta_psi_p(u)
%UNTITLED Parametros de Guiamento do Navio
% Valor e direction de guinada

global WP linha x_req y_req dist nWP

```

```
x_ship=u(1);
y_ship=u(2);
psi_ship=u(3);

% Distance to go
dist= (sqrt((x_req-x_ship)^2+(y_req-y_ship)^2));

psi_final=atan2((y_req-y_ship),(x_req-x_ship));

% -pi<psi_final<+pi

% Lógica de Cálculo para mudança de Waypoint

if((dist<3)&&(linha<nWP))
    linha=linha+1;
    x_req=WP(linha,1);
    y_req=WP(linha,2);
end

% Lógica para o Cálculo de delta_psi

delta_psi = psi_final-psi_ship;

if (delta_psi<=(-pi))
    delta_psi=delta_psi+2*pi;
elseif(delta_psi>(pi))
    delta_psi=-delta_psi+2*pi;
end

out=[delta_psi;dist];
```

## ANEXO A – LÓGICA DE CONTROLADORES PI, PD E PID

Um dos tópicos abordados foi sobre o controle da embarcação, esse necessita tomar ações, com essas sendo o foco do presente anexo.

### AÇÃO PROPORCIONAL (P)

Para este controle, a entrega de energia realizada pelo controlador ocorre com um valor proporcional a diferença entre o *setpoint* e o valor momentâneo da variável de processo (VP). Com este contendo um erro denominado de erro estacionário devido a mudança ocorrida entre o cálculo e a próxima posição.

$$u(t) = K_p e(t) + u_i \quad (\text{A.1})$$

Desta forma, para um momento, o valor de saída do processo será menor (ou maior) que o valor de referência, sendo proporcional a  $e(t)$ .

Para regimes permanentes, cujas propriedades são inalteradas no tempo, existirá uma relação inversamente proporcional entre o valor de  $K_p$  e o erro.

### AÇÃO INTEGRAL (I)

Para a ação de controle integral, a mesma é responsável por atuar ao longo do tempo desde que exista diferença entre o valor desejado e o valor medido. Desta forma, é possível realizar a redução, e possivelmente eliminação, de erros do estado estacionário. Com a lógica sendo descrita a seguir.

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \quad (\text{A.2})$$

Esse controlador integral é responsável por aumentar o tipo de sistema em uma unidade, esta mudança faz com que o sistema compensado seja menos estável e eventualmente se torne instável. Devido a ser uma função do tempo, sua resposta ocorre de maneira lenta o que pode ocasionar em sobressinal.

De modo geral, associa-se um controlador integral e proporcional para obter um controlador PI.



$$G_C(s) = K_p + K_I/s \quad (\text{A.3})$$

### AÇÃO DERIVATIVA (D)

Por sua vez, a ação derivativa consiste em uma resposta na saída do controlador que seja proporcional a velocidade de variação do desvio. Esta é descrita como preditiva, uma vez que tende a controlar o sistema para que o mesmo reaja rapidamente. Esta ocorrência se deve devido ao instante em que o desvio tende a acontecer, com a ação forneça uma correção de forma a prevenir o sistema de realizar um aumento no desvio.

Este modelo utiliza respostas transitórias mais rápidas, desta forma, possui melhor operação em sistemas dinâmicos de malha fechada (como o presente trabalho).

$$u(t) = K_D \dot{e}(t) \quad (\text{A.4})$$

$$G_C(s) = K_D s \quad (\text{A.5})$$

### AÇÃO PROPORCIONAL INTEGRAL (PI)

O controlador PI corresponde à soma de uma ação proporcional com uma ação integral. Desta forma a resposta transitória é melhorada com a contribuição da ação proporcional, de forma que a ação integral corrija o erro estacionário.

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right) \quad (\text{A.6})$$

Sua função de transferência é caracterizada a seguir.

$$U(s) = \frac{(K_p s + K_i)}{s} E(s) \quad (\text{A.7})$$

O tempo integral ajusta a ação de controle integral, enquanto a mudança no valor de  $K_p$  é responsável por afetar a parte proporcional como a parte integral da ação de controle.

### AÇÃO PROPORCIONAL DERIVATIVO (PD)

O controlador PD é definido como Controle Proporcional Derivativo, cuja definição segue a seguir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{A.8})$$

Sua função de transferência é caracterizada a seguir.

$$U(s) = K_p (1 + T_d s) E(s) \quad (\text{A.9})$$

A ação de controle derivativa possui a vantagem de ser preditiva, apresenta vantagens de amplificar os sinais de ruído e causar um efeito de saturação, não deve ser utilizada sozinha.

### AÇÃO PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID)

O controlador PID pode ser considerado versátil e robusto, uma vez que consegue utilizar as vantagens dos controladores PI (como o erro nulo em regime estacionário) e PD (resposta mais rápida). Também vale ressaltar que este modelo é simples, o que torna a sua utilização fácil.

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + K_i \int e(t) dt \quad (\text{A.10})$$

Com as variáveis sendo representadas por,  $u(t)$  é o sinal de controle na saída do controlador,  $e(t)$  é o sinal de erro na entrada do controlador,  $u(k)$  é o sinal de controle na saída do controlador no domínio digital,  $K_p$  é a constante de proporcionalidade associada ao termo proporcional,  $K_i$  é a constante de proporcionalidade associada ao termo integral  $\left(\frac{K_p}{T_i}\right)$  e  $K_d$  é a constante de proporcionalidade associada ao termo derivativo  $(K_p T_d)$ .

**ANEXO B – CARTA NÁUTICA 1511**

Segue uma versão em maior resolução da Carta Náutica 1511, sendo esta acessada no site da Marinha do Brasil.

