Instituto Alberto Luiz Coimbra de
Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
COPPE UFRJ

UM PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA QUANTO À NAVEGAÇÃO EM CANAIS DE ACESSO AOS PORTOS BRASILEIROS

Adriana Pina Silveira Santos Gomes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Sergio Hamilton Sphaier

Rio de Janeiro

Outubro de 2015

UM PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA QUANTO À NAVEGAÇÃO EM CANAIS DE ACESSO AOS PORTOS BRASILEIROS

Adriana Pina Silveira Santos Gomes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

_____

Prof. Sergio Hamilton Sphaier, Dr.-Ing

_____

Prof. Cláudio Luiz Baraúna Vieira, Ph. D.

_____

Prof. Eduardo Aoun Tannuri, D. Sc.

.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

OUTUBRO DE 2015

Gomes, Adriana Pina Silveira Santos

Um procedimento para avaliação da viabilidade técnica quanto à navegação em canais de acesso aos portos brasileiros / Adriana Pina Silveira Santos Gomes. – Rio de Janeiro: UFRJ / COPPE, 2015.

XV: 82p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Sergio Hamilton Sphaier

Dissertação (mestrado) - UFRJ / COPPE / Programa de Engenharia Oceânica, 2015

Referências Bibliográficas: p. 57-60

1. Acesso Portuário. 2. Monte Carlo. 3. Navegação. 4. PIANC. 5. Simulação. I. Sphaier, Sergio Hamilton. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, à minha mãe Alice, ao meu esposo, José David e, ao meu filho, Jean David, pela paciência e pelo tempo que precisei dedicar aos estudos e às pesquisas e não pude estar presente em alguns momentos de suas vidas. Ao meu filho Miguel, que compartilhou, antes e depois de seu nascimento, as horas dispensadas para a finalização da pesquisa e todo o esforço empreendido para a conclusão do trabalho.

À Diretoria de Portos e Costas pela oportunidade de servir em uma Diretoria Especializada, que trata de assuntos muito relevantes à segurança da navegação, o que me motivou a buscar o meu aperfeiçoamento e ampliar os meus conhecimentos obtidos na Escola de Formação de Oficiais da Marinha Mercante (EFOMM), no Centro de Instrução Almirante Graça Aranha (CIAGA).

Ao grande amigo Capitão-de-Mar-e-Guerra Arthur Emílio Macedo Santa Rita pelo incentivo, motivação e autorização para a realização do Mestrado no renomado Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), o qual possibilitou o meu desenvolvimento intelectual e que certamente muito contribuirá para a minha carreira na Marinha do Brasil.

Ao Almirante Jorge Lopes, Capitão-de-Mar-e-Guerra Sérgio Carneiro, Capitão-de-Mar-e-Guerra Cimino, Capitão-de-Fragata Motta, Engenheiro Naval Jorge Luiz, Engenheiro Mecânico Pedro Alberto e Engenheiro Mecânico Wanderley pela compreensão nos períodos em que precisei conciliar as minhas atividades desenvolvidas no Departamento Técnico da Diretoria de Portos e Costas (DPC) com as pesquisas necessárias para o trabalho.

Aos amigos Capitão-de-Mar-e-Guerra Guaranys, Capitão-de-Mar-e-Guerra Restum, Capitão-de-Mar-e-Guerra Attila Coury, Capitão-de-Mar-e-Guerra Andréa, Capitão-de-Mar-e-Guerra Maximira, Capitão-de-Mar-e-Guerra Tommy, Capitão-de-Mar-e-Guerra Arionor, Siegberto Schenk e Leonardo Soares pelo incentivo e pelo apoio durante a realização do curso.

Ao Capitão-de-Fragata Malheiros, Capitão-de-Fragata Leandro, Capitão-de-Corveta Coreixas e Funcionária Civil Valéria, todos do Centro de Análises de Sistemas Navais (CASNAV), pela atenção e ensinamentos sobre o software utilizado no trabalho, o qual foi fundamental para a demonstração do procedimento proposto.

Agradeço de forma especial à minha fiel amiga que conheci no curso de mestrado, engenheira naval Sandra Garcia Ramon, que esteve ao meu lado em momentos cruciais da elaboração e revisão desta dissertação, quer em períodos de calmaria, quer de mar grosso, sempre me apoiando e dando forças para continuar. Dedicou ainda seu tempo realizando a leitura do trabalho, apesar de seu idioma pátrio ser o espanhol, com o objetivo de aperfeiçoar o texto, sempre com comentários muito valiosos.

Aos professores Sphaier, Severino, Marcelo Neves, Paulo de Tarso e, Geraldo Wilson pelos ensinamentos e base técnica para as pesquisas.

Ao Professor Baraúna, que possui vasta experiência na área de Estatística, com quem eu aprendi que é fundamental a obtenção e utilização de dados estatísticos no procedimento apresentado no trabalho para que se possa obter resultados relevantes.

À Sra. Lucianita, pela grande ajuda em todas as ações administrativas durante todo o período em que estive na COPPE, por todas as suas orientações e pelo pronto atendimento às minhas dúvidas.

Ao Coordenador do Centro de Simulação Aquaviária (CSA) e amigo, Mario Calixto pelos ensinamentos relativos à simulação.

Em especial ao meu orientador, Prof. Doutor Sergio Hamilton Sphaier, pela amizade, orientação, dedicação, apoio, paciência, e principalmente pela confiança no meu trabalho.

A todos aqueles que, embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino”. (Leonardo da Vinci).

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

UM PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA QUANTO À NAVEGAÇÃO EM CANAIS DE ACESSO AOS PORTOS BRASILEIROS

Adriana Pina Silveira Santos Gomes

Outubro / 2015

Orientador: Sergio Hamilton Sphaier

Programa: Engenharia Oceânica

Este trabalho apresenta um procedimento que permite a primeira avaliação quanto à viabilidade técnica de uma embarcação acessar um porto. O procedimento contempla os aspectos relacionados à embarcação, ao porto, às condições ambientais da área de navegação, e, principalmente, ao fator humano, por ser indispensável a ação do homem na condução da embarcação. Para possibilitar a realização de inúmeros ensaios, é utilizado um simulador de manobras do tipo *fast time,* ajustado com as características da embarcação, do porto, ambientais, e ainda, com a introdução de um tempo de retardo nas ações do piloto automático, buscando representar a reação de diferentes seres humanos nas simulações. Por fim, com o uso do método de Monte Carlo são estimados os valores das probabilidades de a embarcação sair do canal de navegação e, a partir dessa informação, a primeira avaliação técnica quanto ao acesso a um porto brasileiro.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

A PROCEDURE FOR EVALUATION OF THE TECHNICAL FEASIBILITY OF A VESSEL APPROACH BRAZILIAN'S HARBOUR ENTRANCE

Adriana Pina Silveira Santos Gomes

October / 2015

Advisor: Sergio Hamilton Sphaier

Department: Oceanic Engineering

This work presents a procedure that allows the first assessment on the technical feasibility of a vessel approach a harbour entrance. The procedure contemplates aspects related to the vessel, the port, the environmental conditions of the navigation area, and especially the human factor, being essential to human action in the conduct of the vessel. To enable the performance of many tests, it is used a *fast time* simulator, adjusted to the characteristics of the vessel, the port, environmental, and also to introduce a time delay in action of the autopilot, aiming represent the reaction of different humans in the simulations. Finally, the Monte Carlo technique estimates the probability of the vessel out of the navigation channel and from that information, the first evaluation of the technical feasibility of a vessel approach Brazilian's harbour entrance.

Sumário

1. Introdução 1

1.1. Introdução Geral 1

1.2. Revisão bibliográfica e proposta do trabalho. 1

1.3. Contextualização do problema 2

1.4. Histórico de acidentes marítimos 4

2. Fundamentos legais 6

2.1. Estrutura da Autoridade Marítima Brasileira 6

2.2. Estrutura da Autoridade Portuária Brasileira 9

3. A arte de navegar 12

3.1. Cartas náuticas 13

3.2. Publicações de auxílio à navegação 15

3.3. Sinalização náutica e balizamento 15

3.4. Tipos de navegação e de canais de acesso 15

4. A arte de navegar no simulador 19

4.1. Elementos fundamentais de entrada no simulador 23

4.1.1. Fenômenos meteorológicos 23

4.1.2. Fator humano 31

4.1.2.1. Funcionalidade do piloto automático na simulação com a introdução do tempo de retardo 32

4.2. Método de Monte Carlo 33

4.2.1. Consideração do fator humano no método de Monte Carlo em fast time..... 33

5. Procedimento para avaliação da viabilidade técnica quanto à navegação em canais de acesso aos portos brasileiros (modelo probabilístico) 34

5.1. Obter os dados táticos do navio e modelagem hidrodinâmica da embarcação.. 35

5.2. Pesquisar as características do porto ou canal de acesso da área de estudo..... 35

5.3. Identificar as condições meteorológicas características do porto 37

5.4. Obter os dados das condições meteorológicas 37

5.5. Tratar os dados meteorológicos..... 38

5.6. Procurar outros parâmetros que poderão influenciar na operação de entrada e saída do canal 38

5.7. Usar um simulador do tipo *fast time* e o método de Monte Carlo 39

5.8. Obter os valores estimados das probabilidades de a embarcação sair do canal para cada tempo de retardo pré-determinado 40

5.9. Analisar os resultados..... 40

6. Aplicação do procedimento para avaliação da viabilidade técnica quanto à navegação no canal de acesso ao porto de Sepetiba..... 41

6.1. Obter os dados táticos do navio e modelagem hidrodinâmica da embarcação.. 41

6.2. Pesquisar as características do porto ou canal de acesso da área de estudo..... 42

6.3. Identificar as condições meteorológicas características do porto 43

6.4. Obter os dados das condições meteorológicas 43

6.5. Tratamento dos dados meteorológicos..... 45

6.6. Procurar outros parâmetros que poderão influenciar na operação de entrada e saída do canal 51

6.7. Usar um simulador do tipo *fast time* e o método de Monte Carlo 51

6.8. Obter os valores estimados das probabilidades de a embarcação sair do canal para cada tempo de retardo pré-determinado 52

6.9. Análise dos resultados..... 53

7. Conclusões..... 54

8. Discussão e contribuição esperada 54

9. Trabalhos futuros 55

10. Bibliografia..... 57

11. Anexos 61

12. Anexo A- Dados de vento para baía de Guanabara obtidos das cartas piloto..... 62

13. Anexo B- Dados de vento da carta piloto segundo as direções de incidência do vento. 64

14. Anexo C- Frequências relativas e acumuladas, cálculo dos valores *c* e *k* de Weibull usando o método de ajuste de mínimos quadrados, para cada uma das direções de vento. 67

15. Anexo D- Distribuição de Weibull para todas as direções de incidência do vento..... 79

Lista de Figuras

Figura 1- Programa Nacional de Dragagem Portuária e Hidroviária (PND)(Fonte: [8]) 3

Figura 2- Cruzeiro chinês de luxo colidiu sobre o rio Oujiang (Fonte: [9]) 5

Figura 3- Recomendação do novo relatório da PIANC para determinação do calado aéreo requerido (Fonte: [3]). 5

Figura 4-Organograma da Estrutura da Autoridade Marítima Brasileira (Fonte: [10]) 7

Figura 5- Normas da AM (Fonte: Adriana Pina) 8

Figura 6- Carta nº 1506 – Proximidade da baía de Guanabara (Fonte: [14]) ... 14

Figura 7-Carta nº 1511 – Barra do Rio de Janeiro (Fonte [14]) 14

Figura 8-Carta nº 1512 – Porto do Rio de Janeiro (Fonte: [14]) 14

Figura 9-Porto de Paranaguá (acima) e porto de São Francisco do Sul (Fonte: [14]) 17

Figura 10- Discretização das parcelas constituintes do cálculo da largura requerida de navegação para canal de acesso (Fonte: [17]) 18

Figura 11 –Folga bruta abaixo da quilha necessária num canal em função do calado do navio e de fatores externos variáveis (Fonte: PIANC, figure 2.1 [3]) 18

Figura 12-Simulador Real Time (Fonte: [3]) 20

Figura 13- Simulação em *fast time* (Fonte : [3]) 20

Figura 14- Movimentos do navio no seus seis graus de liberdade (Fonte: [22]) 22

Figura 15- relação entre a eficiência do ser humano na execução das tarefas em função do movimento da embarcação. (Fonte: [24]) 25

Figura 16- Exemplo da passagem de entrada e saída de um navio usando a maré (Fonte: PIANC, Figure 2.2 [3]) 30

Figura 17- Cartas de corrente de maré. (Fonte: [25]) 30

Figura 18- Tempo de retardo (distância de reação) de um motorista ao avistar um obstáculo 31

Figura 19- controle do navio (Fonte: [26]) 33

Figura 20-porto de Rio Grande (Fonte: [28]) 35

Figura 21-porto de Itajaí (Fonte: [29]) 36

Figura 22-Porto de Itaqui (Fonte: [14]) 36

Figura 23-Porto de Itaqui (Fonte: [30]) 37

Figura 24- Plotagem do canal em estudo no simulador com a derrota que deverá ser realizada pelo piloto automático (Fonte: Adriana Pina). 40

Figura 25-Canal de acesso na baía de Sepetiba ((Fonte: [14])) 42

Figura 26-Representação no simulador do canal de acesso (Fonte: Adriana Pina) 43

Figura 27- Distribuição de vento estatística para a baía de Sepetiba. (Fonte: [31]) 44

Figura 28- Atlas de cartas piloto (Fonte: [14]) 45

Figura 29-Carta piloto da entrada a baía de Guanabara (Fonte: [14]) 45

Figura 30- Reta para cálculo dos parâmetros *c* e *k* da distribuição de Weibull na direção de 315º (Fonte: Adriana Pina) 49

Figura 31-Distribuição de Weibull para a direção de incidência do vento de 315º (Fonte: Adriana Pina) 50

Figura 32-Embarcação A – Porta-Contêiner de 210.54m de comprimento e 29.88m de largura e com capacidade máxima de 2478 TEU.(Fonte: [31]) 52

Figura 33-Embarcação B – Porta-Contêiner de 228.08m de comprimento e 37m de largura e com capacidade máxima de 3800 TEU (Fonte : [31]) 53

Lista de Tabelas

Tabela 1-Administração dos 18 portos organizados brasileiros. (Fonte: [12]) .. 10

Tabela 2- Os 19 portos brasileiros administrados pela União. (Fonte: [12]) 11

Tabela 3- Tipos de ondas e suas características (Fonte: [22]) 24

Tabela 4-Escala Beaufort: tempo mínimo em horas que o vento deve soprar para gerar ondas com altura significativa H (pés). (Fonte BOWDITCH (Bowditch)) . 26

Tabela 5- Influência da velocidade, da pista e da duração do vento sobre a altura e o período das ondas, em águas profundas. (Fonte [13]) 27

Tabela 6-Escala Beaufort (Fonte: [14]) 28

Tabela 7- Organização da força dos ventos na direção 315 (Fonte: Adriana Pina) 46

Tabela 8-Correspondência da Força do vento com o seu intervalo de velocidade na escala Beaufort (Fonte: Adriana Pina) 46

Tabela 9-Cálculo dos valores de x e y para a direção de vento de 315º segundo o procedimento de ajuste de mínimos (Fonte: Adriana Pina) 48

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AP	Autoridade Portuária
AJB	Águas Jurisdicionais Brasileiras
AM	Autoridade Marítima
AMB	Autoridade Marítima Brasileira
CHM	Centro de Hidrografia da Marinha
CM	Comandante da Marinha
CP	Capitania dos Portos
DHN	Diretoria de Hidrovia e Navegação
DPC	Diretoria de Portos e Costas
IAFN	Inquérito Administrativo sobre Acidentes e Fatos da Navegação
IALA	International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities
LESTA	Lei nº 9.537 de 11/12/1997 que dispõe sobre a segurança do tráfego aquaviário
MB	Marinha do Brasil
MMC	Método de Monte Carlo
NBR 13246	Norma da ABNT - Planejamento Portuário
NORMAM	Normas da Autoridade Marítima
NORMAM-01	Normas da Autoridade Marítima para Embarcações Empregadas na Navegação em Mar Aberto
NORMAM-11	Normas da Autoridade Marítima para Obras, Dragagem, Pesquisa e Lavra de Minerais Sob, Sobre e às Margens das Águas sob Jurisdição Brasileira
NORMAM-17	Normas da Autoridade Marítima para Auxílios à Navegação
NPCP	Normas e Procedimentos para as Capitanias dos Portos

NPCF	Normas e Procedimentos para as Capitanias Fluviais
PIANC	Permanent International Association of Navigation Congresses / World Association for Waterborne Transport Infrastructure
PND	Programa Nacional de Dragagem
PND1	Programa Nacional de Dragagem 1
PND2	Programa Nacional de Dragagem 2
PTCII-30	Relatório da Pianc - Approach channels - a guide for design
RLESTA	Regulamentação da LESTA (Decreto nº 2.596 de 18/05/1998)
TEU	*Twenty Foot Equivalent Unit* / Unidade Equivalente de Transporte. Esta unidade de transporte possui um tamanho padrão de contêiner intermodal de 20 pés.

1. Introdução

1.1. Introdução Geral

Desde a abertura dos portos brasileiros por Dom João VI, no início de 1808, as atividades comerciais marítimas têm desempenhado um papel importante para a sociedade e para a economia brasileira.

Com o passar dos anos, e com o crescimento do comércio marítimo, novos portos e terminais foram construídos para atender a essa demanda. Um porto, após a sua construção, poderá, eventualmente, em função das características de sua área de implantação, necessitar da realização de obras para que as suas características operacionais sejam mantidas e o tráfego das embarcações seja realizado com segurança.

No tocante à construção de um terminal portuário público ou privado e de seus canais de acesso, são necessários investimentos, planejamentos e estudos técnicos para a verificação da entrada de navios e a movimentação das cargas pretendidas para a região de sua implantação. Certamente, a construção de novos terminais, além de contribuir para o crescimento da região, alavanca o desenvolvimento e o crescimento econômico do país.

Têm-se observado que, após o estabelecimento das operações portuárias, o desenvolvimento da região, motivado por interesse comercial, leva à necessidade da entrada de embarcações com características técnicas diferentes para as quais o porto foi inicialmente projetado (navio tipo). Surge, então, a necessidade de ser avaliada se essa nova necessidade de operação poderá ser realizada, sem prejuízo da segurança da navegação, ou seja, a viabilidade técnica da navegação pretendida.

1.2. Revisão bibliográfica e proposta do trabalho.

Durante a realização desta pesquisa, foi observado que as referências bibliográficas existentes sobre o assunto foram fundamentalmente elaboradas para estabelecer critérios para a construção de portos e dimensionamento de seus canais de acesso, considerando as dimensões de um determinado navio de projeto. O navio de projeto é denominado “navio tipo” e, quando uma embarcação com características diferentes desse navio tipo tenciona operar no porto, é necessária a avaliação pelas autoridades competentes quanto à viabilidade dessa operação. Ocorre que

atualmente não há uma norma específica que apresente um procedimento para subsidiar essa avaliação.

As principais referências bibliográficas nacionais e internacionais são a NBR ABNT 13246 [1] , o Relatório PTC-II-30 da PIANC [2] e o Relatório Técnico nº 121 ([3],, Janeiro 2014), publicado em janeiro de 2014 em substituição ao Relatório PTC-II-30 [2]. Esse último documento, devido a relevância do seu conteúdo, foi apresentado na última Conferência mundial da PIANC sobre navegação. Tanto a norma da ABNT quanto a publicação PTC-II-30, além da NORMAM-11/DPC [4] são os documentos utilizados nos estudos de planejamento portuário no Brasil.

Outro documento importante, que trata dos parâmetros operacionais dos portos brasileiros, dentro dos limites do porto organizado, advém do artigo 18º da Lei nº 12.815 [5], conhecida na comunidade marítima como “Nova Lei dos Portos”, por ter substituído a Lei nº 8.630 [6]. Essa Lei estabelece que dentro dos limites da área do porto organizado, compete à administração do porto, sob a coordenação da Autoridade Marítima, estabelecer e divulgar o calado máximo de operação dos navios e o porte bruto máximo e as dimensões máximas dos navios que trafegarão, em função das limitações e características físicas do cais do porto.

Essa Lei está relacionada à viabilidade técnica das embarcações operarem dentro dos limites do porto organizado, porém, não dispõe que seja elaborada norma para tratar o assunto, tal como ocorre com a Lei 9.537/97/99 [7] que trata da segurança da navegação, e que motivou a elaboração das NORMAM pela Autoridade Marítima Brasileira.

Diante da escassez de referências bibliográficas, e considerando a relevância da pesquisa para contribuir para a eficiência dos portos, sem prejuízo da segurança da navegação, este trabalho tem como proposta apresentar um procedimento que com a utilização de um simulador do tipo *fast time,* e o uso do método de Monte Carlo, possa ser realizada a primeira avaliação técnica quanto à viabilidade de uma embarcação acessar um porto.

1.3. Contextualização do problema

Novas tecnologias têm sido empregadas nas embarcações mercantes, o que as tornam mais modernas, com novos equipamentos de auxílio à navegação, com propulsores mais eficientes e com menor consumo, melhores condições de

manobrabilidade. As embarcações também têm sido construídas com maiores dimensões (comprimento, boca, etc.), e também com maior porte bruto, tornando as viagens mais rentáveis pela possibilidade de transportar mais carga.

Essas embarcações mercantes modernas, também poderão operar nos portos brasileiros, desde que os portos estejam preparados para recebê-las, ou seja, o dimensionamento do canal de acesso portuário, da bacia de evolução, dos berços de atracação, e de outras áreas portuárias, seja compatível com as dimensões dessas novas embarcações. A demanda quanto à solicitação de autorização para a entrada e operação de novas embarcações, ou ao estabelecimento de novos parâmetros operacionais para os portos brasileiros, tende a aumentar, uma vez que atualmente os portos brasileiros se encontram em um momento favorável para a sua modernização. Com o estabelecimento do Programa Nacional de Dragagem (Figura 1) é esperado o crescimento de movimentação de cargas nos portos beneficiados pelo programa. Estes portos tendem a operar com embarcações de maior porte após a realização das obras necessárias para o aprofundamento, e manutenção das novas profundidades atingidas nos canais de acesso, bacia de evolução e dos berços de atracação.

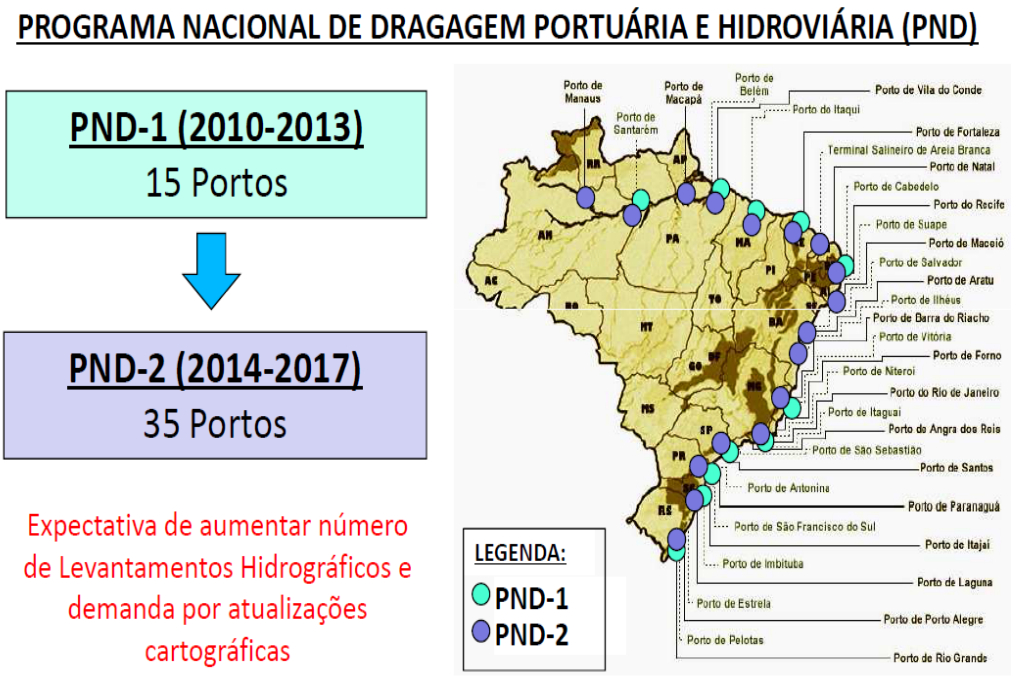


Figura 1- Programa Nacional de Dragagem Portuária e Hidroviária (PND)(Fonte: [8])

É esperado que portos internacionais também realizem investimento em sua infraestrutura para receber embarcações com maiores dimensões, e, possivelmente, por essa razão, os aspectos relacionados à modernização das embarcações mercantes e as novas tecnologias empregadas foi discutida internacionalmente durante o 33rd Congresso Mundial da *Permanent International Association of Navigation Congresses* (PIANC), realizado em junho de 2014, em *San Francisco*, na Califórnia, cujo tema condiz com a realidade atual, também observada nos portos brasileiros: "*Navigating the New Millennium*", ou seja, "Navegar no novo milênio**".**

Com tantos parâmetros envolvendo a navegação, e com as novas tecnologias disponíveis, seria possível conciliar as demandas relacionadas ao desenvolvimento do comércio marítimo com a indispensável segurança da navegação? Será que a prática, sem a utilização de um procedimento que permita avaliar a viabilidade técnica da navegação pretendida, permite o acesso da embarcação com segurança e sem a ocorrência de acidente?

Basta refletir sobre a ocorrência de um acidente, que poderá ainda culminar com a perda de vida humana e a poluição hídrica, para concluirmos que é necessária uma avaliação prévia do comportamento hidrodinâmico da embarcação, utilizando-se um procedimento que contemple todos os aspectos técnicos relevantes, desde as características da embarcação, até as características físicas e ambientais do porto.

1.4. Histórico de acidentes marítimos

Um acidente ocorrido na China no ano de 2012 (Figura 2), quando o navio realizava a sua viagem inaugural, poderia ter sido evitado com a realização de estudos relacionados ao comportamento da embarcação, considerando os aspectos náuticos e as referências bibliográficas existentes já citadas. Nesse caso, durante o planejamento da navegação, uma vez que a existência de uma ponte, deveria ter sido verificado o calado aéreo requerido para a passagem com segurança pela mesma. A altura do vão livre da ponte, bem como, os cálculos para determinação do calado aéreo requerido para a passagem com segurança sob a ponte, constam das publicações de auxílio à navegação e nas normas brasileiras relacionadas ao assunto (NORMAM). Assim os responsáveis por esse tipo de estudo devem conhecer esses documentos e, ao mesmo tempo, saber interpretar as informações nelas contidas.

Figura 2- Cruzeiro chinês de luxo colidiu sobre o rio Oujiang (Fonte: [9])

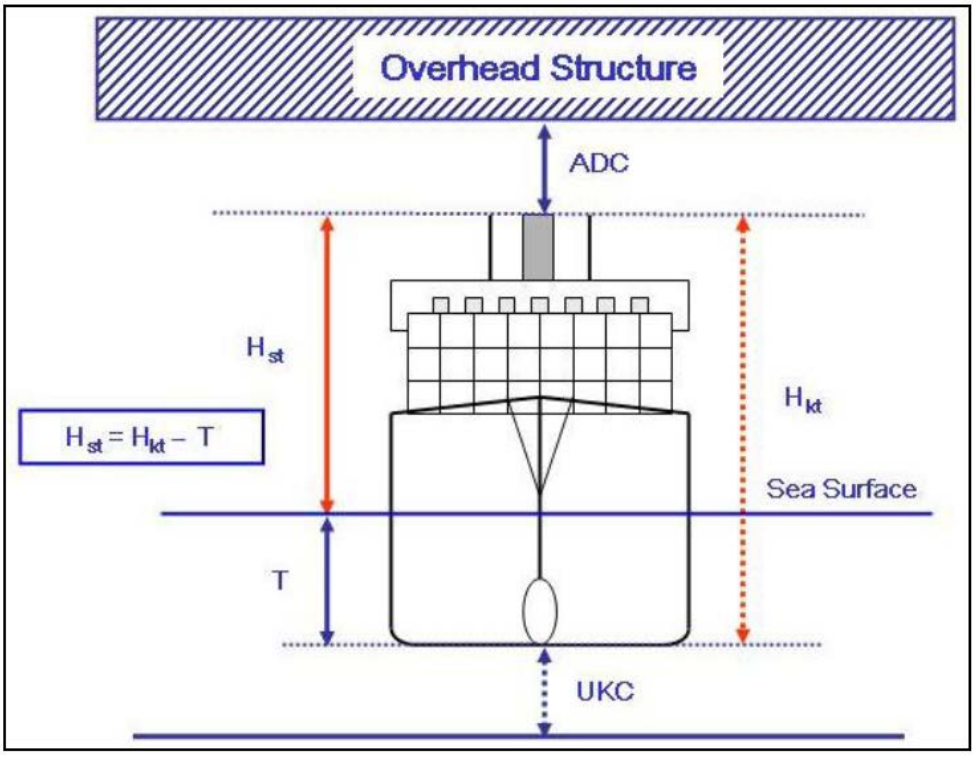


Figura 3- Recomendação do novo relatório da PIANC para determinação do calado aéreo requerido (Fonte: [3]).

O referido acidente poderia ter culminado com perda da vida humana ou poluição hídrica, mas, felizmente, não resultou em maiores danos à ponte ou à tripulação da embarcação. Pode-se então inferir que não houve o estudo da viabilidade técnica

quanto à navegação da embarcação sob a ponte, considerando as recomendações da PIANC (Figura 3), nem realização de simulação para identificar os possíveis riscos da navegação pretendida.

2. Fundamentos legais

2.1. Estrutura da Autoridade Marítima Brasileira

Inicialmente, é importante tecer alguns comentários sobre a estrutura da Autoridade Marítima Brasileira.

A Autoridade Marítima Brasileira (AMB) é exercida pelo Comandante da Marinha (CM), que têm competência para tratar dos assuntos que cabem à Marinha do Brasil (MB), como atribuições subsidiárias.

São atribuições subsidiárias todas aquelas conferidas à MB, por dispositivo legal, que não estejam relacionadas com a defesa da Pátria e a garantia dos poderes constitucionais, da Lei e da ordem, como estabelecido na Constituição Federal.

A Lei nº 9.537/97 [7] em seu Art. 3º, estabelece que “cabe à Autoridade Marítima promover a implementação e a execução desta Lei, com o propósito de assegurar a salvaguarda da vida humana e a segurança da navegação, no mar aberto e hidrovias interiores, e a prevenção da poluição ambiental por parte de embarcações, plataformas ou suas instalações de apoio.”

Para o cumprimento do disposto na LESTA [7], o Comandante da Marinha do Brasil delegou competência para vários órgãos da MB. A estrutura da Autoridade Marítima Brasileira, bem como a representatividade da competência delegada, foi estabelecida pela Portaria nº 156/MB [10], sendo apresentada de forma sucinta pelo organograma da Figura 4.

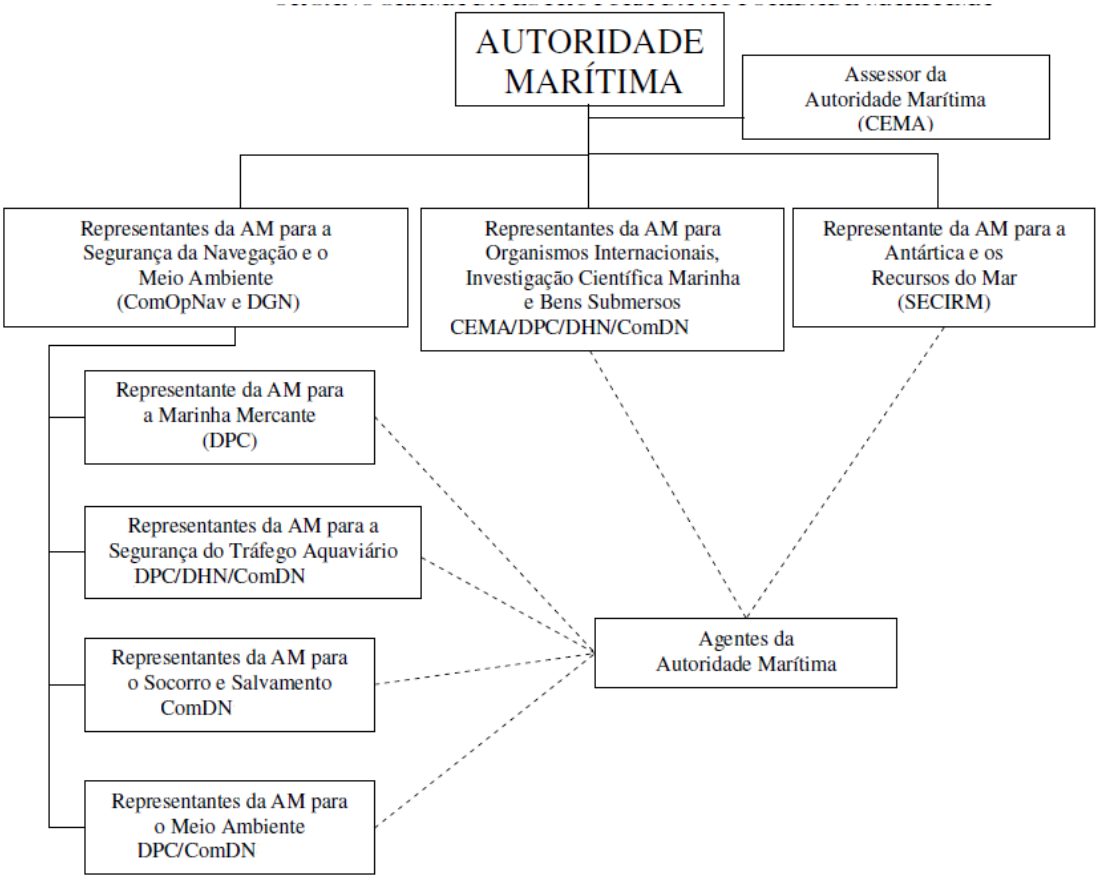


Figura 4-Organograma da Estrutura da Autoridade Marítima Brasileira (Fonte: [10])

Em cumprimento ao disposto no Art. 4º da LESTA [7], a Diretoria de Portos e Costas (DPC) e a Diretoria de Hidrovia e Navegação (DHN) elaboraram normas para prover a segurança da navegação, a salvaguarda da vida humana no mar e nas hidrovias interiores e a prevenção à poluição ambiental, nas águas sob jurisdição nacional (Figura 5).

01	Navegação em mar aberto	16	Requisitos para a concessão e delegação das atividades da assistência e salvamento de embarcação em perigo no mar, portos e vias interiores
02	Navegação Interior	17	Auxílios à navegação
03	Esporte e/ou recreio	18	Operação do sistema de controle da arrecadação
04	Embarcações estrangeiras operando em AJB	19	Atividades de meteorologia marinha
05	Homologação de Material	20	Gerenciamento de água de lastro
06	Credenciamento de Sociedades Classificadoras	21	Uso de uniformes da Marinha Marcante nacional
07	Inspeção Naval	22	Cerimonial da Marinha Mercante nacional
08	Tráfego e permanência de embarcações em AJB	23	Controle de sistemas antiincrustantes danosos em embarcações
09	Inquéritos administrativos sobre acidentes e fatos da navegação e investigação de acidentes	24	Credenciamento de instituições para ministrar cursos para profissionais não tripulantes e tripulantes não aquaviários
10	Pesquisa, exploração, remoção e demolição de coisas e bens afundados, submersos, encalhados e perdidos	25	Levantamentos hidrográficos
11	Obras, dragagens, pesquisas e lavra de minerais sob, sobre e às margens das AJB	26	Serviço de tráfego de embarcações
12	Serviço de praticagem	27	Homologação de helipontos em plataformas e embarcações
13	Aquaviários	28	Navegação e cartas náuticas
14	Cadastramento de empresas de navegação, peritos e sociedades classificadoras	29	Transporte de cargas perigosas
15	Atividades subaquáticas	30	Ensino profissional marítimo

Figura 5- Normas da AM (Fonte: Adriana Pina)

Outra competência da AM relacionada à segurança da navegação, nas águas sob jurisdição nacional, estabelecida pela Lei nº 12.815 [5], é a de exercer a coordenação junto a Autoridade Portuária para estabelecer e divulgar o calado máximo de operação dos navios, o porte bruto máximo e as dimensões máximas dos navios que trafegarão dentro dos limites da área do porto organizado, em função das limitações e características físicas do cais do porto.

Uma vez estabelecidos os parâmetros operacionais pelas autoridades competentes, para o porto organizado, tais parâmetros deverão ser divulgados pela Autoridade Portuária por meio de documento próprio e pela AM por intermédio das Normas e Procedimentos para as Capitanias dos Portos (NPCP) ou Normas e Procedimentos para as Capitanias Fluviais (NPCF).

Sempre que houver alteração do parâmetro operacional estabelecido para o porto e um novo tipo de embarcação for autorizado a operar, deverá ser expedida uma Portaria pelo Capitão dos Portos com jurisdição na área do porto, divulgando os novos parâmetros operacionais, os quais permanecerão em vigor até que a NPCP/NPCF seja atualizada com a inclusão de tais parâmetros.

A relevância da coordenação pela AM junto à Autoridade Portuária, no estabelecimento de parâmetros operacionais para os portos em operação, está intrinsicamente relacionada ao fato de que compete à AM prover a segurança da navegação. Assim, na definição de tais parâmetros, devem prevalecer os aspectos afetos à segurança da navegação e não os aspectos comerciais que tendem a pressionar as APs no sentido de autorizar o tráfego de embarcações de maior porte para possibilitar o transporte de maior quantidade de carga.

2.2. Estrutura da Autoridade Portuária Brasileira

Além da estrutura da Autoridade Marítima Brasileira, é importante também tecer alguns comentários sobre a estrutura da Autoridade Portuária no Brasil.

O marco regulatório da estrutura da AP brasileira é a Constituição da República Federativa do Brasil [11], que dispõe que compete à União:

"XII - explorar, diretamente ou mediante autorização, concessão ou permissão:

a) os serviços de radiodifusão sonora, e de sons e imagens
b) os serviços e instalações de energia elétrica e o aproveitamento energético dos cursos de água, em articulação com os Estados onde se situam os potenciais hidroenergéticos;
c) a navegação aérea, aeroespacial e a infraestrutura aeroportuária;
d) os serviços de transporte ferroviário e aquaviário entre portos Brasileiros e fronteiras nacionais, ou que transponham os limites de Estado ou Território;
e) os serviços de transporte rodoviário interestadual e internacional de passageiros;
f) os portos marítimos, fluviais e lacustres"

Atualmente, existem 37 Portos Públicos organizados no país. Nessa categoria, há portos com administração exercida pela União, no caso das Companhias Docas, ou delegados a municípios, estados ou consórcios públicos. A área dos portos é delimitada por ato do Poder Executivo, segundo art. 2º da Lei nº 12.815 [5].

A administração dos 18 portos organizados foi delegada às distintas AP, conforme se pode observar na Tabela 1, que se segue.

Tabela 1-Administração dos 18 portos organizados brasileiros. (Fonte: [12])

Porto	Estado	Autoridade Portuária	Tipo
Porto de SUAPE	PE	SDEC-PE	Marítimo
Porto de IMBITUBA	SC	SCPAR	Marítimo
Porto de SÃO FRANC. SUL	SC	APSFS	Marítimo
Porto de ITAQUI	MA	EMAP	Marítimo
Porto de CABEDELO	PB	DOCAS-PB	Marítimo
Porto do RECIFE	PE	PORTO DO RECIFE S.A.	Marítimo
Porto de SÃO SEBASTIÃO	SP	DERSA	Marítimo
Porto de ANTONINA	PR	APPA	Marítimo
Porto de PARANAGUÁ	PR	APPA	Marítimo
Porto de PELOTAS	RS	SPH	Marítimo
Porto de PORTO ALEGRE	RS	SPH	Marítimo
Porto de ESTRELA	RS	SPH	Fluvial
Porto de CACHOEIRA DO SUL	RS	SPH	Fluvial
Porto de RIO GRANDE	RS	SUPRG	Marítimo
Porto de PORTO VELHO	RO	SOPH-RO	Fluvial
Porto de ITAJAÍ	SC	ADHOC	Marítimo
Porto de MACAPÁ	AP	CDSA	Marítimo
Porto do FORNO	RJ	COMAP	Marítimo

Já os 19 portos organizados públicos listados na Tabela 2, são administrados pela União.

Tabela 2- Os 19 portos brasileiros administrados pela União. (Fonte: [12])

Porto	Estado	Autoridade Portuária
Porto de MANAUS	AM	CODOMAR
Porto de LAGUNA	SC	CODESP
Porto de SANTOS	SP	CODESP
Porto de ANGRA DOS REIS	RJ	CDRJ
Porto de ITAGUAÍ	RJ	CDRJ
Porto do RIO DE JANEIRO	RJ	CDRJ
Porto de NITERÓI	RJ	CDRJ
Porto de VITÓRIA	ES	CODESA
Porto de BARRA DO RIACHO	ES	CODESA
Porto de ILHÉUS	BA	CODEBA
Porto de ARATU	BA	CODEBA
Porto de SALVADOR	BA	CODEBA
Porto de MACEIÓ	AL	CODERN
Porto de NATAL	RN	CODERN
Porto de AREIA BRANCA	RN	CODERN
Porto de FORTALEZA	CE	CDC
Porto de VILA DO CONDE	PA	CDP
Porto de BELÉM	PA	CDP
Porto de SANTARÉM	PA	CDP

Diante do exposto, pode-se concluir que, no Brasil, a Autoridade Portuária não é exercida por único órgão. Portanto, deve-se observar que o interessado deve verificar a quem deverá ser encaminhada a solicitação de alteração do parâmetro operacional do porto, caso seja necessária para possibilitar a entrada e a operação da embarcação. Ademais, a Diretoria de Portos e Costas, como também já foi explicado, é um dos representantes da AMB e suas atribuições não estão diretamente relacionadas à administração dos portos públicos ou privados, como poderia se depreender em virtude de seu nome. Dessa forma, a DPC não deve ser considerada como o órgão da Marinha do Brasil, de abrangência nacional, com a atribuição de gerenciar as atividades dos portos nacionais.

Importante mencionar que, no caso de terminais de uso privado, não é aplicável o contido na nova Lei dos Portos [5], uma vez que esta trata especificamente dos portos organizados. Contudo, também são estabelecidos parâmetros operacionais para as embarcações que operam nesses terminais, e quaisquer alterações devem ser submetidas à apreciação da AM.

3. A arte de navegar

O procedimento proposto no trabalho propõe que seja utilizado um simulador do tipo *fast time* para a realização da navegação. No entanto, na elaboração dos estudos relacionados à avaliação quanto à viabilidade técnica de uma embarcação acessar um porto, é fundamental a compreensão dos aspectos relacionados à navegação (ciência), à embarcação (veículo) e ao mar e suas hidrovias interiores (ambiente), uma vez que essas informações deverão ser inseridas corretamente no simulador que será utilizado. Por essa razão, serão apresentados comentários sucintos sobre os aspectos relacionados à navegação, para ampliar o conhecimento sobre o assunto.

A importância da navegação e a especificidade da arte de navegar é ressaltada pelo renomado autor PIRES MIGUENS [13] ao definir que: *“Navegação é a ciência e a arte de conduzir com segurança, dirigir e controlar os movimentos de um veículo, desde o ponto de partida até o seu destino”. O veículo pode ser um navio ou embarcação, um submarino, uma aeronave, uma espaçonave ou um veículo terrestre. É uma ciência, pois envolve o desenvolvimento e utilização de instrumentos de precisão, procedimentos, técnicas, cartas, tábuas e almanaques. É, também, uma arte, pois envolve o uso adequado dessas ferramentas sofisticadas e,*

principalmente, a interpretação das informações obtidas. A maior parte do trabalho da Navegação é feita com instrumentos de precisão e cálculos matemáticos. Porém, após a execução das observações e dos cálculos, o navegante experimentado aplica sua medida de arte, quando interpreta os dados disponíveis e resultados obtidos."

Assim, durante a elaboração do procedimento proposto, foram utilizados fundamentos científicos, inclusive com a utilização da técnica da simulação de Monte Carlo, além de uma ferramenta sofisticada (simulador), conforme a doutrina de Miguens.

3.1. Cartas náuticas

Todas as informações necessárias para a navegação e para a simulação, referentes aos acidentes terrestres e submarinos, profundidades, perigos, natureza do fundo, fundeadouros e áreas de fundeio, auxílios à navegação, altitudes e pontos notáveis aos navegantes, linha de costa e de contorno das ilhas, elementos de marés, correntes e magnetismo, dentre outras indicações pertinentes à segurança da navegação, são obtidas através das cartas náuticas.

As cartas náuticas são os documentos cartográficos resultantes de levantamentos de áreas oceânicas, mares, baías, rios, canais, lagos, lagoas, ou qualquer outra massa d'água navegável, geralmente construídas na Projeção de Mercator (projeção cilíndrica do globo terrestre).

No Brasil, a DHN, na qualidade de Serviço Hidrográfico Brasileiro, mantém, por meio do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), todas as cartas náuticas em águas jurisdicionais brasileiras atualizadas. Para o planejamento da navegação, as cartas náuticas devem ser selecionadas e utilizadas de acordo com o porto e área de estudo.

Na Figura 6 a 8, são apresentados exemplos de cartas náuticas *raster* que podem ser utilizadas para o planejamento da navegação da barra da baía de Guanabara (águas desabrigadas) até o local de atracação da embarcação (águas abrigadas (Figura 7 e Figura 8)).

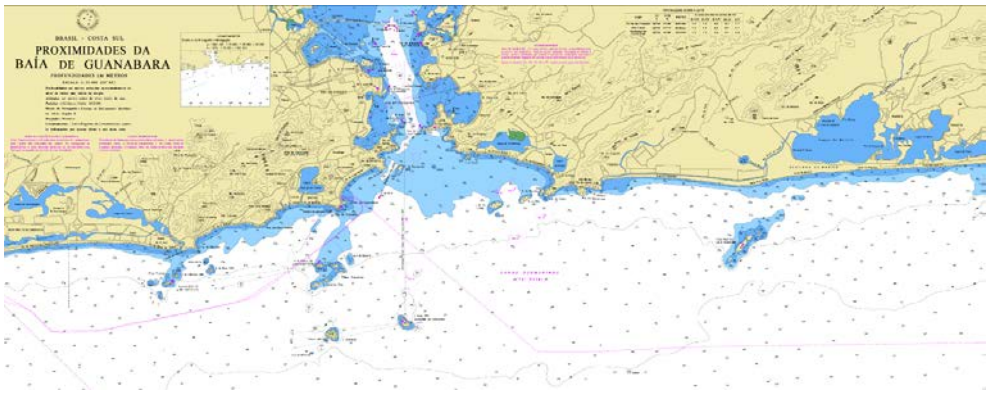


Figura 6- Carta nº 1506 – Proximidade da baía de Guanabara (Fonte: [14])

Figura 7-Carta nº 1511 – Barra do Rio de Janeiro (Fonte [14])

Figura 8-Carta nº 1512 – Porto do Rio de Janeiro (Fonte: [14])

3.2. Publicações de auxílio à navegação

Além das cartas náuticas que se constituem, sem dúvida, no mais importante documento de auxílio à navegação, outras diversas Publicações Náuticas ou Publicações de Auxílio à Navegação, complementam, ou ampliam, os elementos fornecidos pelas cartas náuticas.

A consulta às Publicações de Auxílio à Navegação é indispensável, tanto na fase de planejamento da navegação como na fase de execução (simulação) e análise dos resultados. As principais publicações que poderão ser utilizadas são Catálogo de Cartas e Publicações, Carta 12.000 Símbolos e Abreviaturas, Roteiros, Lista de Faróis, Lista de Sinais Cegos, Lista de Auxílios–Rádio, Tábuas das Marés, Cartas de Correntes de Maré, Atlas de Cartas Piloto e Almanaque Náutico.

3.3. Sinalização náutica e balizamento

Os canais de acesso brasileiro possuem sinalização náutica e balizamento que concorrem para a garantia da segurança da navegação em uma região ou área perfeitamente definida, como, marinas e hidrovias. Antes de ser realizada a simulação, é importante observar se o canal de acesso possui balizamento, para que essa informação possa ser considerada na simulação, e a navegação seja realizada em uma passagem desimpedida, entre obstáculos ou restrições à navegação.

Todas as informações necessárias referentes ao tipo de sinalização náutica utilizada nos portos brasileiros constam da NORMAM-17/DHN [15] e poderão ser consultadas para representação no simulador.

3.4. Tipos de navegação e de canais de acesso

O acesso aos portos normalmente é realizado navegando-se por águas marítimas consideradas desabrigadas (navegação em mar aberto) ou abrigadas (navegação interior).

Na navegação em mar aberto (oceânica ou costeira), definida pela NORMAM-01/DPC [16] como sendo “a realizada em águas marítimas consideradas desabrigadas”, a embarcação poderá, navegar sob certas condições meteorológicas desfavoráveis, tais como em situações de ocorrência de ventos fortes, ondas

significativas, visibilidade restrita, sem que isto acarrete em risco à segurança da navegação devido a existência, normalmente, de espaço físico para manobrar.

Por outro lado, na navegação interior, a navegação é realizada em águas restritas, definida pelo autor PIRES MIGUENS [13] como a ***"****navegação que se pratica em portos ou suas proximidades, em barras, baías, canais, rios, lagos, proximidades de perigos ou quaisquer outras situações em que a manobra do navio é limitada pela estrita configuração da costa ou da topografia submarina. É este, também, o tipo de navegação utilizado quando se navega a distância da costa (ou do perigo mais próximo) menores que 3 milhas. É o tipo de navegação que maior precisão exige".*

Na Figura 9, são apresentados dois exemplos de acessos portuários, com geometrias distintas, sendo o porto de Paranaguá com uma grande faixa de área de navegação em águas restritas e, o porto de São Francisco do Sul com extensa faixa de área de navegação em água restrita, e também uma área do acesso desabrigada, o que poderá dificultar a entrada ou saída da embarcação do porto dependendo das condições ambientais e da influência da ação de ondas.

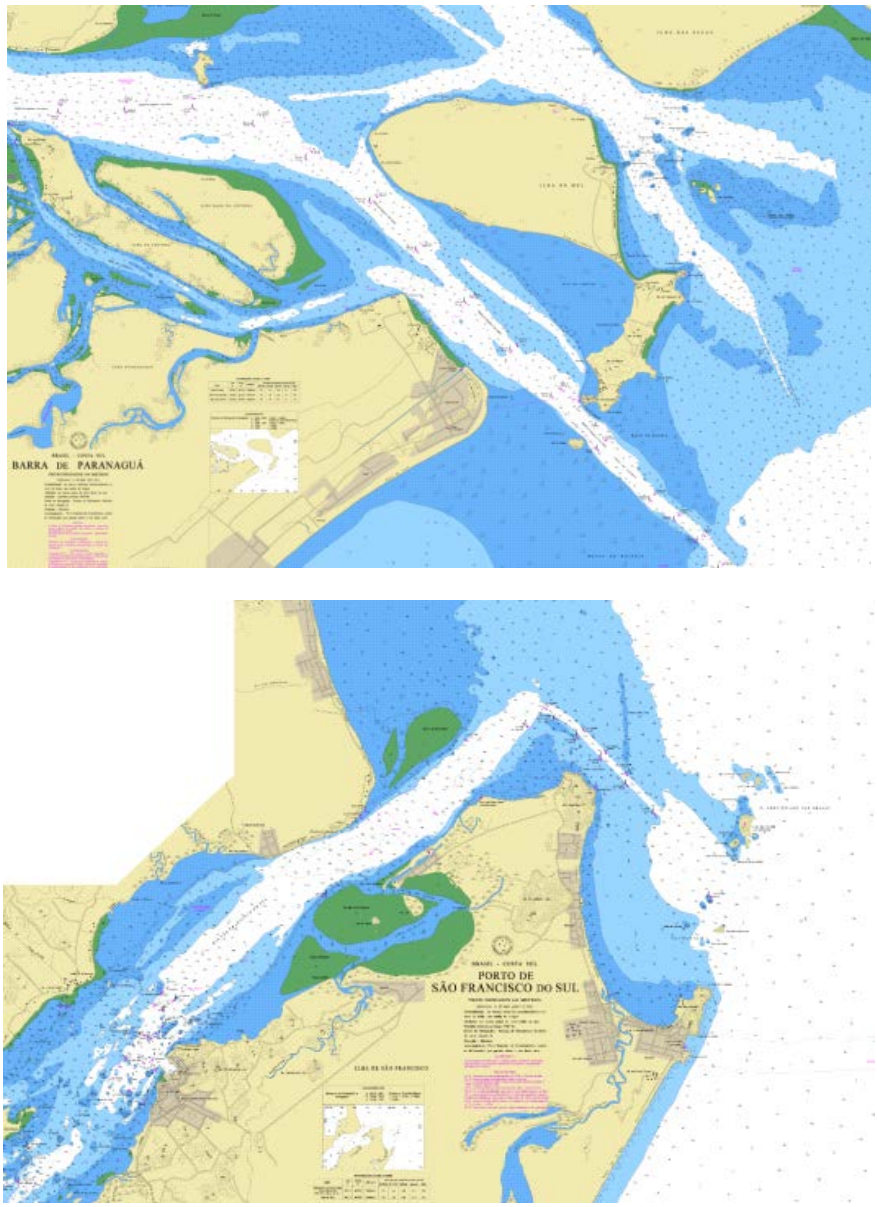


Figura 9-Porto de Paranaguá (acima) e porto de São Francisco do Sul (Fonte: [14])

Em virtude das diferenças apresentadas entre os tipos de navegação, reveste-se de importância a necessidade da avaliação do comportamento da embarcação também ao se aproximar do porto, onde serão executadas manobras em águas restritas, sob a influência das condições meteorológicas reinantes no local.

Para essa avaliação, devem ser conhecidos os fatores a serem considerados por ocasião do estabelecimento da largura e da profundidade da via navegável, conforme as Figura 10 e Figura 11.

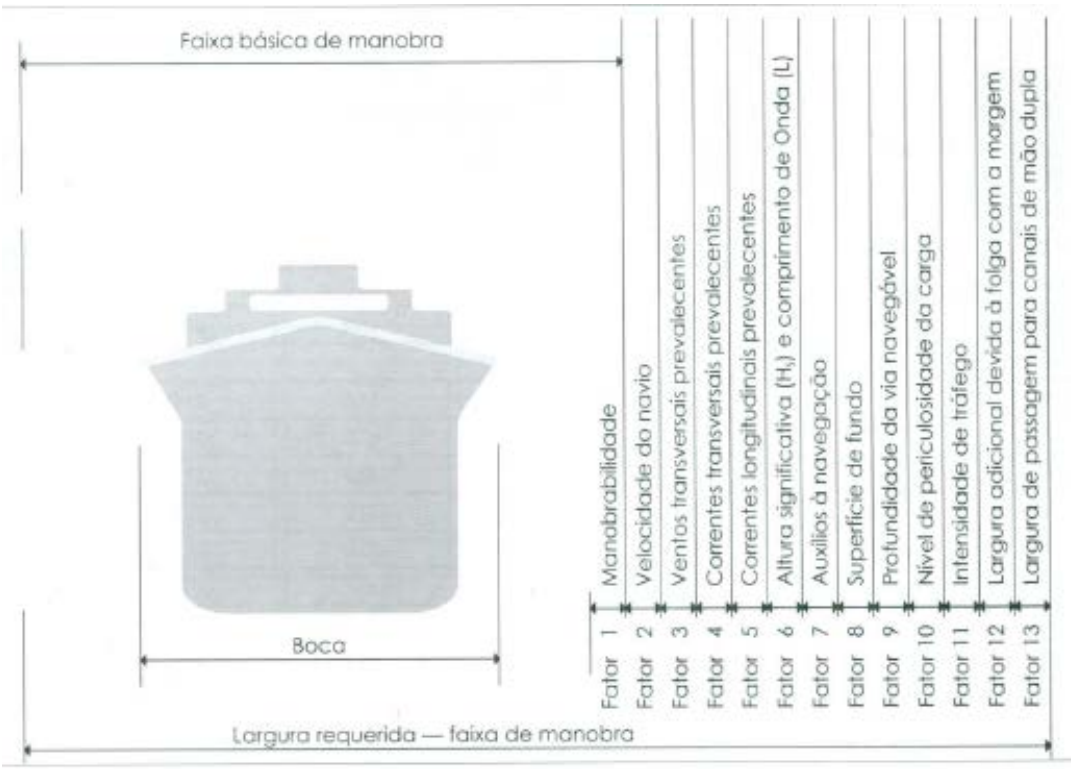


Figura 10- Discretização das parcelas constituintes do cálculo da largura requerida de navegação para canal de acesso (Fonte: [17])

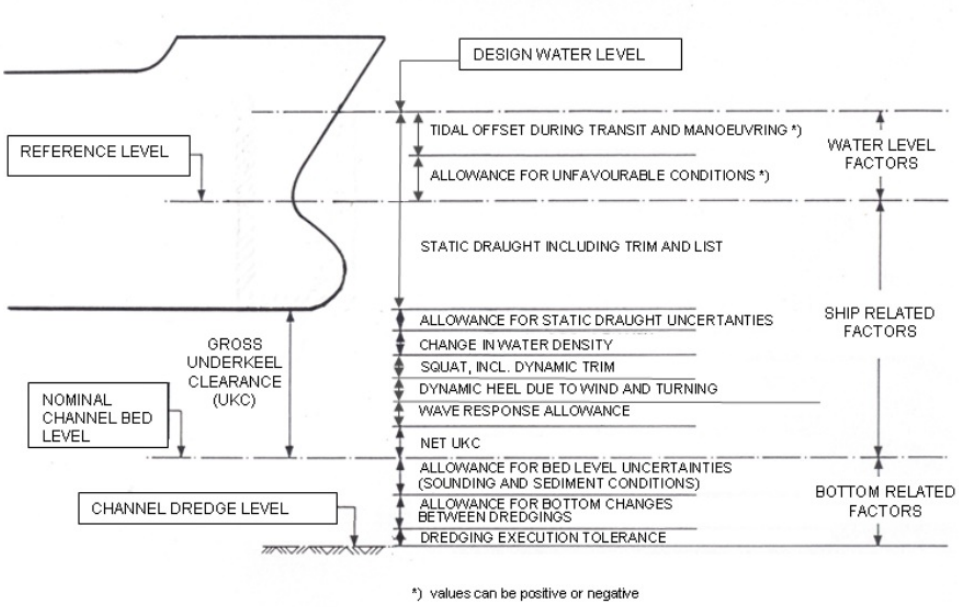


Figure 2.1: Channel depth factors

Figura 11 –Folga bruta abaixo da quilha necessária num canal em função do calado do navio e de fatores externos variáveis (Fonte: PIANC, figure 2.1 [3])

Consoante o contido na literatura [18], não basta a informação do estado do mar para se estimar como irá se comportar o navio e mesmo avaliar a ocorrência de possíveis danos e avarias da embarcação, à carga ou à tripulação. Necessitam também ser avaliados os seguintes aspectos:

- estado do mar;
- características das ondas;
- características do navio;
- rumo do navio;
- ângulo com que as ondas incidem no navio;
- velocidade do navio;
- olho marinheiro de quem manobra o navio.

O comportamento da embarcação sob a influência desses aspectos pode ser avaliados por simulador, tanto *fast time* como *real time*, que usando um modelo matemático deve representar o comportamento real da embarcação no seus 6 graus de liberdade, desde que os parâmetros empregados na avaliação sejam inseridos corretamente no simulador.

4. A arte de navegar no simulador

"Simulação é o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação." [19]

A simulação deve proporcionar ao usuário a sensação de estar a bordo da embarcação, apesar de estar na realidade em um ambiente virtual. A grande vantagem da simulação é quanto a possibilidade de verificar quais serão as dificuldades de cada ambiente para qual a simulação está sendo realizada, sem contudo, pôr em risco a segurança da navegação, a salvaguarda da vida humana no mar e ainda, sem poluir o meio ambiente em caso de uma manobra mal sucedida em que a embarcação venha a encalhar.

A simulação pode ser realizada de duas formas: em tempo real (real time, Figura 12) ou em tempo rápido (*fast time*, Figura 13).

Figura 12-Simulador Real Time (Fonte: [3])

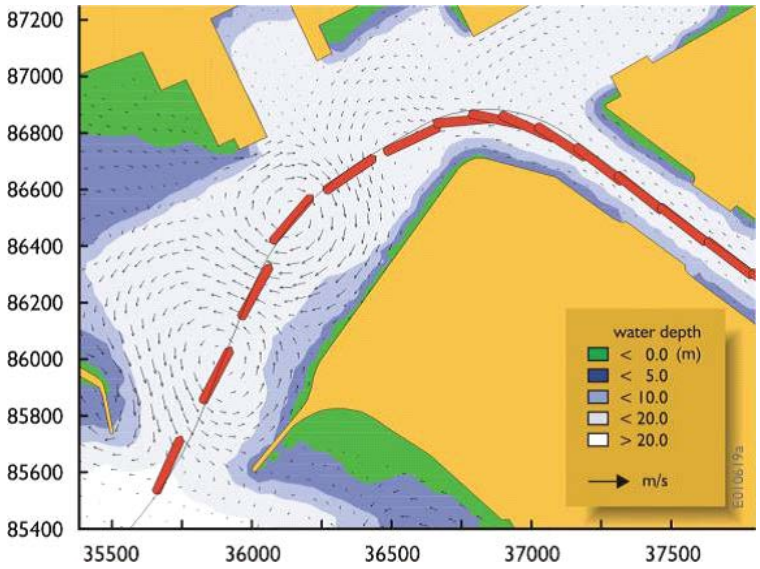


Figura 13- Simulação em *fast time* (Fonte : [3])

Além da embarcação que será estudada estar bem ajustada às características da embarcação real, é importante que também seja considerado no simulador o aspecto relacionado ao fator humano, uma vez que a embarcação real sempre será

conduzida por uma pessoa habilitada, apesar da diversidade de equipamentos e novas tecnologias utilizadas na navegação e na robótica.

Nesse contexto, pode-se afirmar que um simulador que contemple os fatores relacionados à embarcação, ao ambiente físico e ao fator humano, e que ainda permita a realização de inúmeros ensaios com diversas condições ambientais em tempo rápido, pode ser utilizado para a primeira avaliação quanto à viabilidade técnica da navegação pretendida. Por esse motivo foi escolhido um simulador de tempo rápido (*fast time*) para a realização do procedimento. Alguns cenários podem ser escolhidos para serem simulados em real time, porém, cabe ressaltar que, nesse caso existe a limitação quanto a realização de inúmeras simulações, tendo em vista o tempo demandado para a navegação em uma situação real.

O uso da modelagem hidrodinâmica de uma embarcação em um simulador através de um modelo empírico, possibilita a avaliação das condições de navegabilidade da embarcação modelada, e a partir dos resultados obtidos, a primeira avaliação quanto a viabilidade técnica de sua operação em um determinado porto.

A aferição da embarcação real no simulador pode ser feita de acordo com a metodologia proposta por SÁ COUTINHO JUNIOR [20], modelação hidrodinâmica de um navio em um simulador através de um modelo empírico.

A simulação dos movimentos de um navio sujeito a ventos, ondas e correntes respondendo a ações dos sistemas de propulsão e governo é realizada através da integração das equações de movimento [21]. Essas equações são expressões da segunda lei de Newton, estendida para corpos rígidos, escritas em um sistema de coordenadas solidário ao navio Oxyz, com eixo Oz voltado para baixo (Figura 14) em condição navio parado em águas tranqüilas.

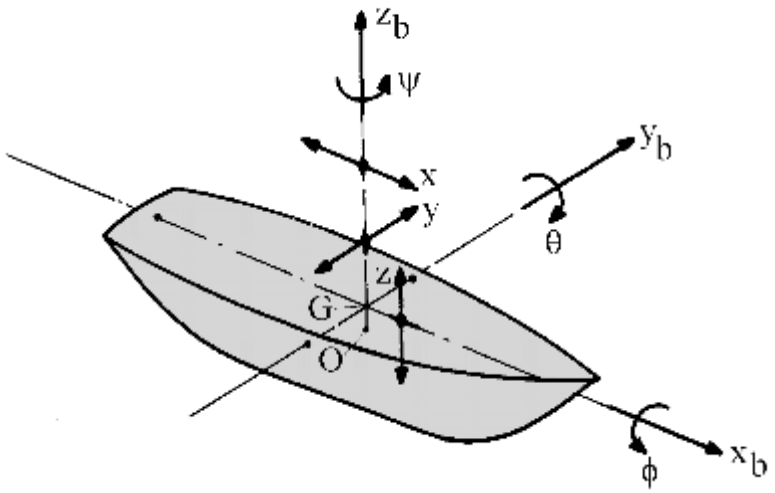


Figura 14- Movimentos do navio no seus seis graus de liberdade (Fonte: [22])

No presente trabalho nos ateremos aos movimentos no plano horizontal, isto é, não serão simulados os movimentos de heave, pitch e roll. Nestas condições as equações de movimento são dadas por:

Equação de força na direção x:

$$m * [\dot{u} - v * r - y_G * \dot{r} - x_G * r^2] = X_H + X_P + X_R + X_{WA} + X_{WI}$$

Equação de força na direção y:

$$m * [\dot{v} - u * r - x_G * \dot{r} * y_G * r^2] = Y_H + Y_P + Y_R + Y_{WA} + Y_{WI}$$

Equação de momento:

$$I * \dot{r} + m * x_G * (\dot{v} + u * r) - m * y_G * (\dot{u} + v * r) = N_H + N_P + N_R + N_{WA} + N_{WI}$$

Onde:

X_H, Y_H e N_H representam as forças e momentos devidos ao movimento relativo fluido-corpo, considerando a correnteza e o movimento do corpo, que chamaremos aqui de forças de manobra.

X_P, Y_P e N_P representam as forças e momentos devidos ao propulsor.

X_R, Y_R e N_R representam as forças e momentos devidos ao leme.

X_{WA}, Y_{WA} e N_{WA} representam as forças e momentos devidos as ondas incidentes.

X_{WI}, Y_{WI} e N_{WI} representam as forças e momentos devidos ao movimento relativo ar-corpo, considerando o vento e o movimento do corpo.

É mister mencionar que tanto um simulador de manobras do tipo *fast time* ou *real time* devem possuir o modelo matemático que resolvam as clássicas equações do movimento do navio.

4.1. Elementos fundamentais de entrada no simulador

4.1.1. Fenômenos meteorológicos

Como já foi visto nas equações de movimento no Capítulo 4, os movimentos da embarcação devem-se às forças externas. Dentro dessas forças externas estão incluídas as produzidas pelos fenômenos naturais.

A influência dos fenômenos meteorológicos na navegação pode ser significativa. É o caso da incidência de ventos fortes, que podem dificultar a manobra de navios com grande área vélica, e da ocorrência de fenômenos que afetem a visibilidade, como tempestades tropicais e nevoeiro. Áreas sujeitas a furacões devem ter especial atenção, uma vez que ventos muito fortes podem arrastar navios de seus fundeadouros e impor severas restrições à navegação.

Usando simuladores para os estudos, a influência desses fenômenos poderá ser avaliada sem pôr em risco a embarcação e sua tripulação. No entanto, é importante novamente ressaltar que os dados de entrada do simulador sejam inseridos de acordo com dados climatológicos corretos, para a realização de um estudo consistente.

4.1.1.1. Ondas

Um dos efeitos de grande influência que uma embarcação irá sofrer é produzido pelas ondas.

PIRENS MIGUENS [13], enfatiza a relevância desse efeito na embarcação ao mencionar que as ondas são, normalmente, muito pouco conhecidas pelos navegantes, embora seja um dos fenômenos naturais que mais afetam o movimento do navio.

Vejamos na Tabela 3 as principais características das ondas de gravidade e de outros tipos de ondas:

Tabela 3- Tipos de ondas e suas características (Fonte: [23])

Tipo	Faixa de período	Força controladora	Força geradora	Obs.
Ondas capilares	< 0,1 s	Tensão superficial	Vento	
Ondas ultra-gravidade	0,1–1 s	Tensão superficial e gravidade	Vento	
Ondas de gravidade ordinárias	1–30 s	Gravidade	Vento	*Swell* e vagas pertencem a esta categoria.
Ondas de infra-gravidade	30 s–5 min	Gravidade e efeito de Coriolis	Vento e ondas de gravidade ordinárias	*Surf beat*, ondas de tormenta e *seiches* pertencem a esta categoria.
Ondas de longo período	> 5 min	Gravidade e efeito de coriolis	Tormentas e terremotos	Fazem parte desta categoria os tsunamis e marés de tormenta.
Ondas de maré ordinárias	Períodos fixos diurnos ou semi-diurnos	Gravidade e efeito de coriolis	Atração gravitacional do Sol e da Lua	
Ondas trans-maré	> 24 h	Gravidade e efeito de Coriolis	Tormentas e atração gravitacional do Sol e da Lua	

Além de contribuir para o movimento da embarcação, a ação das ondas e os movimentos de resposta da embarcação, poderão influenciar na ação humana (aumento do tempo de reação devido ao desconforto ocasionado pelo movimento da embarcação), como também na embarcação, devido a diminuição de eficiência do propulsor devido a algumas emersões. A Figura 15 apresenta a relação entre a eficiência do ser humano na execução das tarefas em função do movimento da embarcação.

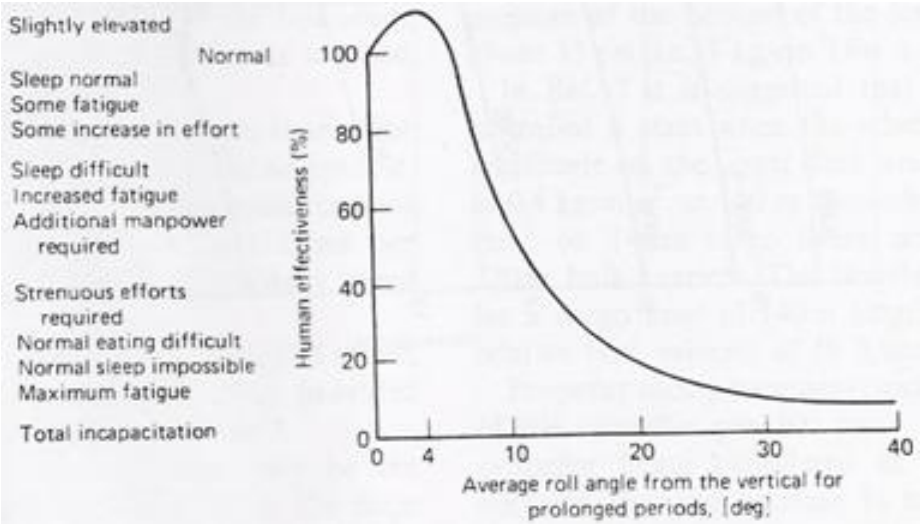


Figura 15- relação entre a eficiência do ser humano na execução das tarefas em função do movimento da embarcação. (Fonte: **[24])**

4.1.1.2. Vento

Ao ser considerada a ação do vento no comportamento da embarcação, a intensidade do vento será sempre fator decisivo no estado do mar. A pista e a duração só agem no início do processo, como fatores de limitação. A pista só influi no estado do mar enquanto pequena; se aumentarmos a pista indefinidamente, as ondas irão crescendo até uma determinada altura, a partir da qual o aumento da pista deixa de ter influência.

Da mesma forma, também atua a duração se aumentarmos o tempo em que sopra um vento de determinada intensidade; o mar então irá crescendo até certa altura, a partir da qual se estabiliza. Mar completamente desenvolvido é aquele em que a pista e a duração são tão grandes que já deixam de ter influência, e o tamanho das ondas é função apenas da intensidade do vento, conforme pode ser observado na escala Beaufort (Tabela 4), que representa o tempo mínimo em horas que o vento deve soprar para gerar ondas com altura significativa H, em pés (1 pé = 0,3048m), e período P, em segundos.

Tabela 4-Escala Beaufort: tempo mínimo em horas que o vento deve soprar para gerar ondas com altura significativa H (pés). (Fonte BOWDITCH (Bowditch))

Fetch	BEAUFORT NUMBER																												Fetch
	3			4			5			6			7			8			9			10			11				
	T	H	P	T	H	P	T	H	P	T	H	P	T	H	P	T	H	P	T	H	P	T	H	P	T	H	P		
10	4.4	1.8	2.1	3.7	2.6	2.4	3.2	3.5	2.8	2.7	5.0	3.1	2.5	6.0	3.4	2.3	7.3	3.9	2.0	8.0	4.1	1.9	10.0	4.2	1.8	10.0	5.0		10
20	7.1	2.0	2.5	6.2	3.2	2.9	5.4	4.9	3.3	4.7	7.0	3.8	4.2	8.6	4.3	3.9	10.0	4.4	3.5	12.0	5.0	3.2	14.0	5.2	3.0	16.0	5.9		20
30	9.8	2.0	2.8	8.3	3.8	3.3	7.2	5.8	3.7	6.2	8.0	4.2	5.8	10.0	4.6	5.2	12.1	5.0	4.7	15.8	5.5	4.4	18.0	6.0	4.1	19.8	6.3		30
40	12.0	2.0	3.0	10.3	3.9	3.6	8.9	6.2	4.1	7.8	9.0	4.6	7.1	11.2	4.9	6.5	14.0	5.4	5.8	17.7	5.9	5.4	21.0	6.3	5.1	22.5	6.7		40
50	14.0	2.0	3.2	12.4	4.0	3.8	11.0	6.5	4.4	9.1	9.8	4.8	8.4	12.2	5.2	7.7	15.7	5.6	6.9	19.8	6.3	6.4	23.0	6.7	6.1	25.0	7.1		50
60	16.0	2.0	3.5	14.0	4.0	4.0	12.0	6.8	4.6	10.2	10.3	5.1	9.6	13.2	5.5	8.7	17.0	6.0	8.0	21.0	6.5	7.4	25.0	7.0	7.0	27.5	7.5		60
70	18.0	2.0	3.7	15.8	4.0	4.1	13.5	7.0	4.8	11.9	10.8	5.4	10.5	13.9	5.7	9.9	18.0	6.4	9.0	22.5	6.8	8.3	26.5	7.3	7.8	29.5	7.7		70
80	20.0	2.0	3.8	17.0	4.0	4.2	15.0	7.2	4.9	13.0	11.0	5.6	12.0	14.5	6.0	11.0	18.9	6.6	10.0	24.0	7.1	9.3	28.0	7.7	8.6	31.5	7.9		80
90	23.6	2.0	3.9	18.8	4.0	4.3	16.5	7.3	5.1	14.1	11.2	5.8	13.0	15.0	6.3	12.0	20.0	6.7	11.0	25.0	7.2	10.2	30.0	7.9	9.5	34.0	8.2		90
100	27.1	2.0	4.0	20.0	4.0	4.4	17.5	7.3	5.3	15.1	11.4	6.0	14.0	15.5	6.5	12.8	20.5	6.9	11.9	26.5	7.6	11.0	32.0	8.1	10.3	35.0	8.5		100
120	31.1	2.0	4.2	22.4	4.1	4.7	20.0	7.8	5.4	17.0	11.7	6.2	15.9	16.0	6.7	14.5	21.5	7.3	13.1	27.5	7.9	12.3	33.5	8.4	11.5	37.5	8.8		120
140	36.6	2.0	4.5	25.8	4.2	4.9	22.5	7.9	5.8	19.1	11.9	6.4	17.6	16.2	7.0	16.0	22.0	7.6	14.8	29.0	8.3	13.9	35.5	8.8	13.0	40.0	9.2		140
160	43.2	2.0	4.9	28.4	4.2	5.2	24.3	7.9	6.0	21.1	12.0	6.6	19.5	16.5	7.3	18.0	23.0	8.0	16.4	30.5	8.7	15.1	37.0	9.1	14.5	42.5	9.6		160
180	50.0	2.0	4.9	30.9	4.3	5.4	27.0	8.0	6.2	23.1	12.1	6.8	21.3	17.0	7.5	19.9	23.5	8.3	18.0	31.5	9.0	16.5	38.5	9.5	16.0	44.5	10.0		180
200				33.5	4.3	5.6	29.0	8.0	6.4	25.4	12.2	7.1	23.1	17.5	7.7	21.5	23.5	8.5	19.3	32.5	9.2	18.1	40.0	9.8	17.1	46.0	10.3		200
220				36.5	4.4	5.8	31.1	8.0	6.6	27.2	12.3	7.2	25.0	17.9	8.0	22.9	24.0	8.8	20.9	34.0	9.6	19.1	41.5	10.1	18.2	47.5	10.6		220
240				39.2	4.4	5.9	33.1	8.0	6.8	29.0	12.4	7.3	26.8	17.9	8.2	24.4	24.5	9.0	22.0	34.5	9.8	20.5	43.0	10.3	19.5	49.0	10.8		240
260				41.9	4.4	6.0	34.9	8.0	6.9	30.5	12.6	7.5	28.0	18.0	8.4	26.0	25.0	9.2	23.5	34.5	10.0	21.8	44.0	10.6	20.9	50.5	11.1		260
280				44.5	4.4	6.2	36.8	8.0	7.0	32.4	12.9	7.8	29.5	18.0	8.5	27.7	25.0	9.4	25.0	35.0	10.2	23.0	45.0	10.9	22.0	51.5	11.3		280
300				47.0	4.4	6.3	38.5	8.0	7.1	34.1	13.1	8.0	31.5	18.0	8.7	29.0	25.0	9.5	26.3	35.0	10.4	24.3	45.0	11.1	23.2	53.0	11.6		300
320							40.5	8.0	7.2	36.0	13.3	8.2	33.0	18.0	8.9	30.2	25.0	9.6	27.6	35.5	10.6	25.5	45.5	11.2	24.5	54.0	11.8		320
340							42.4	8.0	7.3	37.6	13.4	8.3	34.2	18.0	9.0	31.6	25.0	9.8	29.0	36.0	10.8	26.7	46.0	11.4	25.5	55.0	12.0		340
360							44.2	8.0	7.4	38.8	13.4	8.4	35.7	18.1	9.1	33.0	25.0	9.9	30.0	36.5	10.9	27.7	46.5	11.6	26.6	55.0	12.2		360
380							46.1	8.0	7.5	40.2	13.5	8.5	37.1	18.2	9.3	34.2	25.5	10.0	31.3	37.0	11.1	29.1	47.0	11.8	27.7	55.5	12.4		380
400							48.0	8.0	7.7	42.2	13.5	8.6	38.8	18.4	9.5	35.6	26.0	10.2	32.5	37.0	11.2	30.2	47.5	12.0	28.9	56.0	12.6		400
420							50.0	8.0	7.8	43.5	13.6	8.7	40.0	18.7	9.6	36.9	26.5	10.3	33.7	37.5	11.4	31.5	47.5	12.2	29.6	56.5	12.7		420
440							52.0	8.0	7.9	44.7	13.7	8.8	41.3	18.8	9.7	38.1	27.0	10.4	34.8	37.5	11.5	32.5	48.0	12.3	30.9	57.0	12.9		440
460							54.0	8.0	8.0	46.2	13.7	8.9	42.8	19.0	9.8	39.5	27.5	10.6	36.0	37.5	11.7	33.5	48.5	12.5	31.8	57.5	13.1		460
480							56.0	8.0	8.1	47.8	13.7	9.0	44.0	19.0	9.9	41.0	27.5	10.8	37.0	37.5	11.8	34.5	49.0	12.6	32.7	57.5	13.2		480
500							58.0	8.0	8.2	49.2	13.8	9.1	45.5	19.1	10.1	42.1	27.5	10.9	38.3	38.0	11.9	35.5	49.0	12.7	33.9	58.0	13.4		500
550										53.0	13.8	9.3	48.5	19.5	10.3	44.9	27.5	11.1	41.0	38.5	12.2	38.2	50.0	13.0	36.5	59.0	13.7		550
600										56.3	13.8	9.5	51.8	19.7	10.5	47.7	27.5	11.3	43.6	39.0	12.5	40.3	50.0	13.3	38.7	60.0	14.0		600
650													55.0	19.8	10.7	50.3	27.5	11.6	46.4	39.5	12.8	43.0	50.0	13.7	41.0	60.0	14.2		650
700													58.5	19.8	11.0	53.2	27.5	11.8	49.0	40.0	13.1	45.4	50.5	14.0	43.5	60.5	14.5		700
750																56.2	27.5	12.1	51.0	40.0	13.3	48.0	51.0	14.2	45.8	61.0	14.8		750
800																59.2	27.5	12.3	53.8	40.0	13.5	50.6	51.5	14.5	47.8	61.5	15.0		800
850																			56.2	40.0	13.8	52.5	52.0	14.6	50.0	62.0	15.2		850
900																			58.2	40.0	14.0	54.6	52.0	14.9	52.0	62.5	15.5		900
950																						57.2	52.0	15.1	54.0	63.0	15.7		950
1000																						59.3	52.0	15.3	56.3	63.0	16.0		1000

Table 3202. Minimum Time (T) in hours that wind must blow to form waves of H significant height (in feet) and P period (in seconds). Fetch in nautical miles.

A Tabela 5 indica a influência da velocidade, da pista e da duração do vento sobre a altura e o período das ondas, em águas profundas.

Tabela 5- Influência da velocidade, da pista e da duração do vento sobre a altura e o período das ondas, em águas profundas. (Fonte [13])

PISTA MILHAS NÁUTICAS	FORÇA DO VENTO (INTENSIDADE) – ESCALA BEAUFORT																											PISTA MILHAS NÁUTICAS
	3 (7 a 10 NÓS)			4 (11 a 16 NÓS)			5 (17 a 21 NÓS)			6 (22 a 27 NÓS)			7 (28 a 33 NÓS)			8 (34 a 40 NÓS)			9 (41 a 47 NÓS)			10 (48 a 55 NÓS)			11 (56 a 63 NÓS)			
	T (horas)	H (m)	P (seg)	T (horas)	H (m)	P (seg)	T (horas)	H (m)	P (seg)	T (horas)	H (m)	P (seg)	T (horas)	H (m)	P (seg)	T (horas)	H (m)	P (seg)	T (horas)	H (m)	P (seg)	T (horas)	H (m)	P (seg)	T (horas)	H (m)	P (seg)	
10	4.4	0.5	2.1	3.7	0.8	2.4	3.2	1.1	2.8	2.7	1.5	3.1	2.5	1.8	3.4	2.3	2.2	3.9	2.0	2.4	4.1	1.9	3.0	4.2	1.8	3.0	5.0	10
20	7.1	0.6	2.5	6.2	1.0	2.9	5.4	1.5	3.3	4.7	2.1	3.8	4.2	2.6	4.3	3.9	3.0	4.4	3.5	3.7	5.0	3.2	4.3	5.2	3.0	4.9	5.9	20
30	9.8	0.6	2.8	8.3	1.2	3.3	7.2	1.8	3.7	6.2	2.4	4.2	5.8	3.0	4.6	5.2	3.7	5.0	4.7	4.8	5.5	4.4	5.5	6.0	4.1	6.0	6.3	30
40	12.0	0.6	3.0	10.3	1.3	3.6	8.9	1.9	4.1	7.8	2.7	4.6	7.1	3.4	4.9	6.5	4.3	5.4	5.8	5.4	5.9	5.4	6.4	6.3	5.1	6.9	6.7	40
50	14.0	0.6	3.2	12.4	1.3	3.8	11.0	2.0	4.4	9.1	3.0	4.8	8.4	3.7	5.2	7.7	4.8	5.6	6.9	6.0	6.3	6.4	7.0	6.7	6.1	7.6	7.1	50
60	16.0	0.6	3.5	14.0	1.3	4.0	12.0	2.1	4.6	10.2	3.1	5.1	9.6	4.0	5.5	8.7	5.2	6.0	8.0	6.4	6.5	7.4	7.6	7.0	7.0	8.4	7.5	60
70	18.0	0.6	3.7	15.8	1.3	4.1	13.5	2.1	4.8	11.9	3.3	5.4	10.5	4.2	5.7	9.9	5.5	6.4	9.0	6.9	6.8	8.3	8.1	7.3	7.8	9.0	7.7	70
80	20.0	0.6	3.8	17.0	1.3	4.2	15.0	2.2	4.9	13.0	3.4	5.6	12.0	4.4	6.0	11.0	5.8	6.6	10.0	7.3	7.1	9.3	8.5	7.7	8.6	9.6	7.9	80
90	23.6	0.6	3.9	18.8	1.3	4.3	16.5	2.2	5.1	14.1	3.4	5.8	13.0	4.6	6.3	12.0	6.1	6.7	11.0	7.6	7.2	10.2	9.1	7.9	9.5	10.4	8.2	90
100	27.1	0.6	4.0	20.0	1.3	4.4	17.5	2.2	5.3	15.1	3.5	6.0	14.0	4.7	6.5	12.8	6.3	6.9	11.9	8.1	7.6	11.0	9.8	8.1	10.3	10.7	8.5	100
120	31.1	0.6	4.2	22.4	1.3	4.7	20.0	2.4	5.4	17.0	3.6	6.2	15.9	4.9	6.7	14.5	6.6	7.3	13.1	8.4	7.9	12.3	10.2	8.4	11.5	11.4	8.8	120
140	36.6	0.6	4.5	25.8	1.3	4.9	22.5	2.4	5.8	19.1	3.6	6.4	17.6	5.0	7.0	16.0	6.7	7.6	14.8	8.8	8.3	13.9	10.8	8.8	13.0	12.2	9.2	140
160	43.2	0.6	4.9	28.4	1.3	5.2	24.3	2.4	6.0	21.1	3.7	6.6	19.5	5.0	7.3	18.0	7.0	8.0	16.4	9.3	8.7	15.1	11.3	9.1	14.5	12.9	9.6	160
180	50.0	0.6	4.9	30.9	1.3	5.4	27.0	2.4	6.2	23.1	3.7	6.8	21.3	5.2	7.5	19.9	7.2	8.3	18.0	9.6	9.0	16.5	11.7	9.5	16.0	13.5	10.0	180
200				33.5	1.3	5.6	29.0	2.4	6.4	25.4	3.7	7.1	23.1	5.3	7.7	21.5	7.2	8.5	19.3	9.9	9.2	18.1	12.2	9.8	17.1	14.0	10.3	200
220				36.5	1.4	5.8	31.1	2.4	6.6	27.2	3.8	7.2	25.0	5.5	8.0	22.9	7.3	8.8	20.9	10.4	9.6	19.1	12.6	10.1	18.2	14.5	10.6	220
240				39.2	1.4	5.9	33.1	2.4	6.8	29.0	3.8	7.3	26.8	5.5	8.2	24.4	7.5	9.0	22.0	10.5	9.8	20.5	13.1	10.3	19.5	14.9	10.8	240
260				41.9	1.4	6.0	34.9	2.4	6.9	30.5	3.8	7.5	28.0	5.5	8.4	26.0	7.6	9.2	23.5	10.5	10.0	21.8	13.4	10.6	20.9	15.4	11.1	260
280				44.5	1.4	6.2	36.8	2.4	7.0	32.4	3.9	7.8	29.5	5.5	8.5	27.7	7.6	9.4	25.0	10.7	10.2	23.0	13.7	10.9	22.0	15.7	11.3	280
300				47.0	1.4	6.3	38.5	2.4	7.1	34.1	4.0	8.0	31.5	5.5	8.7	29.0	7.6	9.5	26.3	10.8	10.4	24.3	13.7	11.1	23.2	16.2	11.6	300
320							40.5	2.4	7.2	36.0	4.1	8.2	33.0	5.5	8.9	30.2	7.6	9.6	27.6	10.8	10.6	25.5	13.9	11.2	24.5	16.5	11.8	320
340							42.4	2.4	7.3	37.6	4.1	8.3	34.2	5.5	9.0	31.6	7.6	9.8	29.0	11.0	10.8	26.7	14.0	11.4	25.5	16.8	12.0	340
360							44.2	2.4	7.4	38.8	4.1	8.4	35.7	5.5	9.1	33.0	7.6	9.9	30.0	11.1	10.9	27.7	14.2	11.6	26.6	16.8	12.2	360
380							46.1	2.4	7.5	40.2	4.1	8.5	37.1	5.6	9.3	34.2	7.8	10.0	31.3	11.3	11.1	29.1	14.3	11.8	27.7	16.9	12.4	380
400							48.0	2.4	7.7	42.2	4.1	8.6	38.8	5.6	9.5	35.6	7.9	10.2	32.5	11.3	11.2	30.2	14.5	12.0	28.9	17.1	12.6	400
420							50.0	2.4	7.8	43.5	4.2	8.7	40.0	5.7	9.6	36.9	8.1	10.3	33.7	11.4	11.4	31.5	14.5	12.2	29.6	17.2	12.7	420
440							52.0	2.4	7.9	44.7	4.2	8.8	41.3	5.7	9.7	38.1	8.2	10.4	34.8	11.4	11.5	32.5	14.6	12.3	30.9	17.3	12.9	440
460							54.0	2.4	8.0	46.2	4.2	8.9	42.8	5.8	9.8	39.5	8.4	10.6	36.0	11.4	11.7	33.5	14.8	12.5	31.8	17.5	13.1	460
480							56.0	2.4	8.1	47.8	4.2	9.0	44.0	5.8	9.9	41.0	8.4	10.8	37.0	11.4	11.8	34.5	14.9	12.6	32.7	17.5	13.2	480
500							58.0	2.4	8.2	49.2	4.2	9.1	45.5	5.8	10.1	42.1	8.4	10.9	38.3	11.6	11.9	35.5	14.9	12.7	33.9	17.7	13.4	500
550										53.0	4.2	9.3	48.5	5.9	10.3	44.9	8.4	11.1	41.0	11.7	12.2	38.2	15.2	13.0	36.5	18.0	13.7	550
600										56.3	4.2	9.5	51.8	6.0	10.5	47.7	8.4	11.3	43.6	11.9	12.5	40.3	15.2	13.3	38.7	18.3	14.0	600
650													55.0	6.0	10.7	50.3	8.4	11.6	46.4	12.0	12.8	43.0	15.2	13.7	41.0	18.3	14.2	650
700													58.5	6.0	11.0	53.2	8.4	11.8	49.0	12.2	13.1	45.4	15.4	14.0	43.5	18.4	14.5	700
800																59.2	8.4	12.3	53.8	12.2	13.5	50.6	15.7	14.5	47.8	18.7	15.0	800
900																			58.2	12.2	14.0	54.6	15.8	14.9	52.0	19.0	15.5	900
1000																						59.3	15.8	15.3	56.3	19.2	16.0	1000

Além das informações acima, a escala Beaufort (Tabela 6) também apresenta o aspecto esperado do mar, de acordo com a ocorrência das forças designadas de 0 a 12.

Tabela 6-Escala Beaufort (Fonte: [14])

Designação Beaufort	Velocidade em nós	Aspecto do mar
0 — Calmaria	< 1	Espelhado.
1 — Bafagem	1 a 3	Mar encrespado em pequenas rugas com aparência de escamas, sem cristas.
2 — Aragem	4 a 6	Ligeiras ondulações curtas, de 30 cm de altura, com cristas vidradas, mas sem arrebentação.
3 — Fraco	7 a 10	Grandes ondulações de 60 cm, com princípio de arrebentação. Alguns carneiros.
4 — Moderado	11 a 16	Pequenas vagas, 1,50 m, com freqüentes carneiros.
5 — Fresco	17 a 21	Vagas moderadas, de forma longa e 2,40 m de altura. Muitos carneiros. Possibilidades de alguns borrifos.
6 — Muito fresco	22 a 27	Grandes vagas de 3,60 m de altura. Muitas cristas brancas. Freqüentes borrifos.
7 — Forte	28 a 33	Mar grosso; vagas de 4,80 m de altura. A espuma da arrebentação se dispõe em estrias, indicando a direção do vento. Muitos borrifos.
8 — Muito forte	34 a 40	Vagalhões regulares de 5,50 a 7,50 m com faixas espessas e espuma branca e franca arrebentação.
9 — Duro	41 a 47	Vagalhões de 7,00 m a 10,00 m com faixas de espuma densa. O mar rola. A visibilidade começa a ser afetada.
10 — Muito duro	48 a 55	Grandes vagalhões de 9 a 12 m. O vento arranca as faixas de espuma, arrebentando as vagas em cascata. Visibilidade reduzida. A superfície do mar é quase toda coberta de estrias brancas.
11 — Tempestuoso	56 a 63	Vagalhões excepcionalmente grandes, até 16,00 m. A visibilidade é afetada. Os navios de tamanho médio desaparecem no cavado das vagas.
12 — Furacão	64 e acima	Mar branco de espuma; respingos saturam o ar. A visibilidade é seriamente afetada.

Quando as condições de mar e vento incidem perpendicularmente ao costado da embarcação (mar de través), um importante efeito das ondas sobre um navio é a perda de estabilidade, que ocorre quando o mesmo desliza sobre a crista de uma onda. Em um navio com uma baixa reserva de estabilidade, isso pode resultar em um perigoso aumento do balanço ou da banda (adernamento), particularmente com vento forte de través.

Concluímos que os fenômenos naturais de onda e vento devem ser avaliados qualitativamente, e não apenas numericamente, para os casos em que os estudos são relativos ao comportamento da embarcação e sua interação com o ambiente aquaviário. Além das intensidades do vento e altura da onda, deve ser considerada a

direção desses fenômenos, uma vez que influenciarão de forma distinta na manobra da embarcação. Todas essas informações são fundamentais nos dados de entrada do simulador.

4.1.1.3. Correntes de maré

A superfície dos mares não permanece estacionária. Isso ocorre devido, principalmente, às atrações da Lua e do Sol, pois a massa líquida se movimenta no sentido vertical, dando origem às marés, e também, horizontalmente, provocando as correntes de maré. Ademais, o aquecimento desigual dos diferentes pontos da Terra pelo Sol e os grandes sistemas de vento resultantes dão origem às correntes oceânicas [13].

Quando o navio se encontra em locais profundos, o conhecimento preciso da altura da água em relação ao fundo do mar não tem maior significado. Entretanto, em águas rasas, é esse conhecimento que permitirá definir em que ocasiões e em que áreas, portos ou canais um navio pode navegar com segurança.

As correntes de maré também deverão ser levadas em conta na navegação em águas restritas, quando não se pode permitir que o navio se afaste da derrota prevista. O conhecimento antecipado da direção e velocidade dessa corrente facilitará o planejamento não só da derrota como também da atracação ou desatracação e dos horários mais convenientes das manobras.

Por essas razões, outro parâmetro a ser considerado nos estudos que envolvam o acesso de embarcações em portos e em água restritas é a maré e a sua influência na manobra.

A maré poderá até mesmo possibilitar a entrada de embarcações com calado maior que o navio tipo (Figura 16).

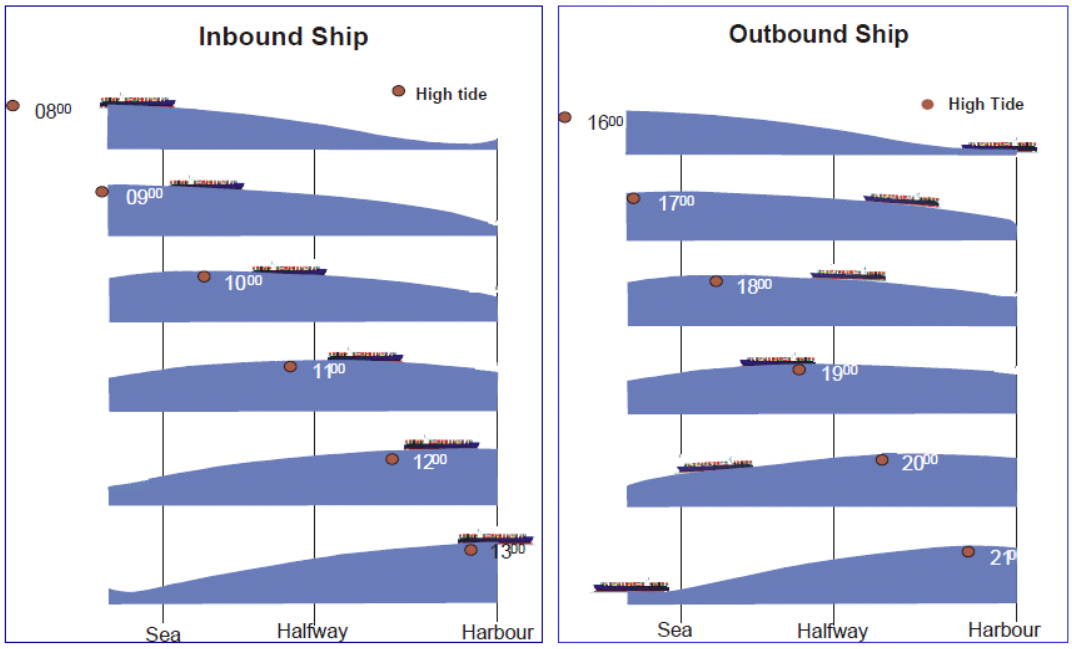


Figura 16- Exemplo da passagem de entrada e saída de um navio usando a maré (Fonte: PIANC, Figure 2.2 [3])

A Figura 17 fornece de modo aproximado a direção e a velocidade das correntes de maré na baía de Guanabara, que podem ser obtidas nas Cartas de Corrente de Maré [25]. É conveniente frisar que ventos anormais poderão modificar substancialmente as informações indicadas nas cartas apresentadas.

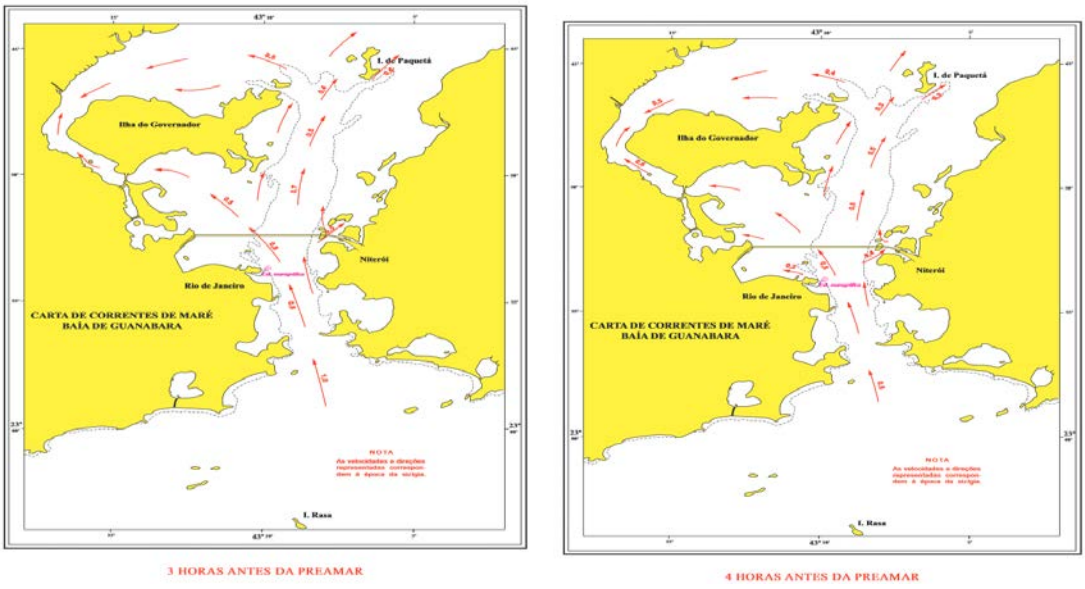


Figura 17- Cartas de corrente de maré. (Fonte: [25])

Para se obter os valores de corrente de maré a serem utilizados no simulador, a seleção da carta a ser utilizada é feita, tendo-se em conta apenas a diferença em horas entre o instante considerado e o da preamar prevista nas Tábuas das Marés.

4.1.2. Fator humano

Apesar de existirem diversos instrumentos de auxílio à navegação e do desenvolvimento de novas tecnologias, não é possível que nenhuma embarcação acesse um determinado porto sem ser conduzida por uma pessoa, a quem caberá dar as ordens de leme, de máquina e manobrar a embarcação sempre que necessário. Por essa razão, deve ser considerado um tempo de retardo na manobra, devido ao tempo de reação de quem conduz a embarcação.

O reflexo que um indivíduo tem se inicia com uma mensagem enviada ao cérebro e termina quando o corpo executa uma resposta ou reação física. Uma analogia com situações conhecidas do modal terrestre é quando um motorista avista um obstáculo (a mensagem) (Figura 18), isso é registrado no cérebro e resulta numa reação ao perigo: numa freada, desvio do obstáculo ou outra manobra apropriada. Para que o cérebro receba a mensagem e diga ao corpo para executar uma ação leva tempo, o tempo de reação.

Velocidade (km/h)	Distância de reação (m)
40	11
60	16
80	22
100	27

Figura 18- Tempo de retardo (distância de reação) de um motorista ao avistar um obstáculo

Na navegação (modal aquaviário), o tempo de retardo dependerá de diversos fatores de acordo com a situação particular de cada porto, como por exemplo:

- o canal é sinuoso e é permanentemente afetado pelo efeitos de vento e corrente.

- o canal possui segmentos retilíneos bem definidos com deflexões suaves. Não há necessidade de manobrar o navio com grande variações de leme e regime de máquinas.
- o canal possui segmentos retilíneos, mas apresenta deflexões mais acentuadas. Em algumas pernadas, é necessário efetuar guinadas e variações do regime de máquinas mais acentuadas.
- o canal é sinuoso ou possui muitas mudanças de direção. É necessário efetuar guinadas acentuadas e variação do regime de máquinas constantemente, ou manobrar empregando rebocadores.
- o tráfego se realiza apenas em uma faixa de navegação.
- o tráfego se realiza em duas faixas de navegação.

4.1.2.1. Funcionalidade do piloto automático na simulação com a introdução do tempo de retardo

✓ O rumo do navio é ajustado a cada segundo para que esteja sobre a derrota em uma distância previamente ajustada por tentativa e erro.

✓ O leme é carregado para que o rumo seja atingido com *rate* máxima após percorrer uma distância previamente ajustada por tentativa e erro.

✓ A corrente começa a ser compensada, antes de ser sentida, em uma distância previamente ajustada por tentativa e erro.

✓ Do mesmo modo, em uma distância de seu fim, previamente ajustada, o rumo é ajustado para que a ausência da corrente não tire o navio do canal.

✓ Quando há retardo, a mesma correção do rumo ocorre, apenas com intervalo de tempo correspondente ao retardo.

✓ O leme é carregado para atingir o rumo de maneira ótima.

✓ A corrente é imediatamente compensada, como se o Comandante a sentisse instantaneamente. Somente a compensação antecipada não é aplicada.

✓ Após o termino das simulações, são gerados gráficos que representam o comportamento da embarcação modelada.

4.2. Método de Monte Carlo

Caracteriza-se por método de Monte Carlo qualquer procedimento de uma classe de eventos estatísticos que se baseiam em amostragens aleatórias massivas para obter resultados numéricos. Assim, o uso do método de Monte Carlo nas simulações *fast time*, possibilitará conhecer o comportamento da embarcação ao trafegar no canal de navegação, sob diversas condições ambientais e ainda, outros fatores, como o fator humano.

4.2.1. Consideração do fator humano no método de Monte Carlo em fast time

Nas simulações, o fator humano normalmente é considerado quando se faz uma simulação real time, uma vez que durante a simulação as ordens de máquina e leme são dadas por uma pessoa (comandante, prático...) (Figura 19)

. Como no presente trabalho será realizada simulação em *fast time,* para que o tempo necessário para que as ordens de máquina e leme possam ser representadas como se estivessem sendo dadas por um ser humano, como ocorre no *real time*, foi inserida uma variável correspondente a influência do fator humano, nesse caso o tempo de atraso na realização das mudanças de rumo, velocidade, etc , a qual será denominada tempo de retardo.

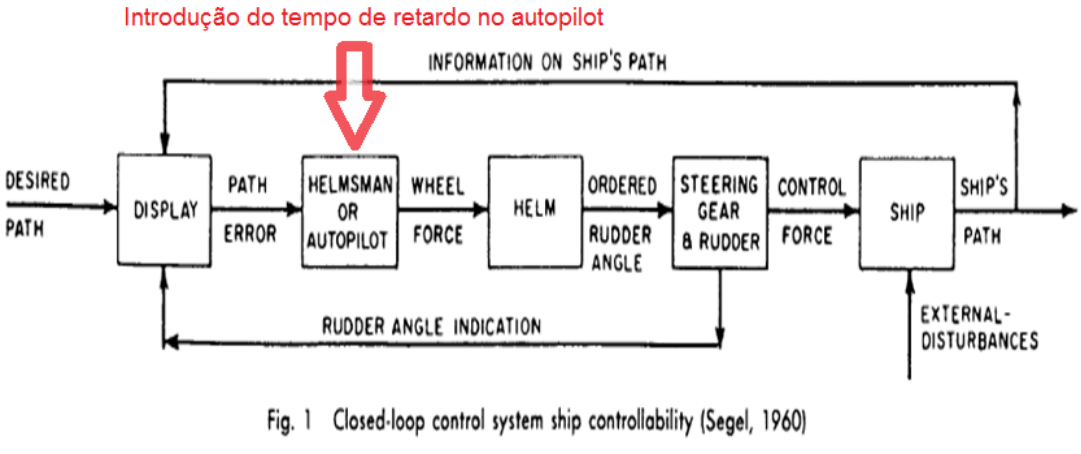


Fig. 1 Closed-loop control system ship controllability (Segel, 1960)

Figura 19- controle do navio (Fonte: [26])

Cabe ressaltar que o tempo de reação do condutor da embarcação não será um tempo com valor constante, pois existem diversas situações que podem ocasionar aumento ou diminuição desse tempo, como, por exemplo, situações de estresse, fadiga, ou até mesmo ansiedade.

Assim, devido às diversas questões relacionadas ao tempo de retardo, no presente trabalho foram assumidos alguns tempos de retardo para serem utilizados na simulação de Monte Carlo, todos utilizados como uma constante durante todo o percurso do canal, com a finalidade de representar o fator humano nas simulações realizadas, uma vez que esse fator normalmente é considerado apenas nas simulações em *real time*.

5. Procedimento para avaliação da viabilidade técnica quanto à navegação em canais de acesso aos portos brasileiros (modelo probabilístico)

O procedimento utiliza um modelo probabilístico para que possam ser estimados os valores das probabilidades de a embarcação modelada no simulador sair do canal em função do tempo de retardo. A escolha por um modelo probabilístico prende-se ao fato de que sempre existirá a possibilidade de a embarcação sair do canal de navegação, ainda que esta seja muito baixa.

Outros modelos probabilísticos já foram desenvolvidos, como o de Vantorre [27] utilizado para identificar as janelas de maré, utilizando o cálculo da probabilidade da embarcação tocar o fundo durante a navegação em canais belgas.

O procedimento proposto no presente trabalho é constituído de 8 etapas, a saber:

1) obter os dados táticos do navio e modelagem hidrodinâmica da embarcação;

2) pesquisar as características do porto ou canal de acesso da área de estudo;

3) identificar as condições meteorológicas características do porto;

4) obter os dados das condições meteorológicas;

5) tratar os dados meteorológicos;

6) procurar outros parâmetros que poderão influenciar na operação de entrada e saída do canal;

7) usar um simulador do tipo *fast time* e o método de Monte Carlo;

8) obter os valores estimados das probabilidades de a embarcação sair do canal para cada tempo de retardo pré-determinado; e

9) Analisar os resultados da simulação.

5.1. Obter os dados táticos do navio e modelagem hidrodinâmica da embarcação.

A embarcação utilizada na simulação deve possuir as características de manobrabilidade e modelagem hidrodinâmica correspondentes às da embarcação real.

5.2. Pesquisar as características do porto ou canal de acesso da área de estudo

É de grande importância conhecer todas as características do porto e do canal por serem determinantes no estabelecimento do navio tipo ou na viabilidade técnica quanto à operação de embarcações com dimensões e porte bruto superiores às do navio tipo.

As cartas náuticas e as publicações de auxilio à navegação fornecem as informações que permitem a modelagem do porto no simulador.

A importância da modelagem do porto deve-se ao fato de, no litoral do Brasil, existirem diversos portos e, analisando alguns exemplos nas Figura 20 a Figura 22, pode-se observar que eles não têm as mesmas características físicas. Além disso, podem até mesmo apresentar diferenças extremas nas condições meteorológicas, nas marés e nas características de ondas e ventos.

Figura 20-porto de Rio Grande (Fonte: [28])

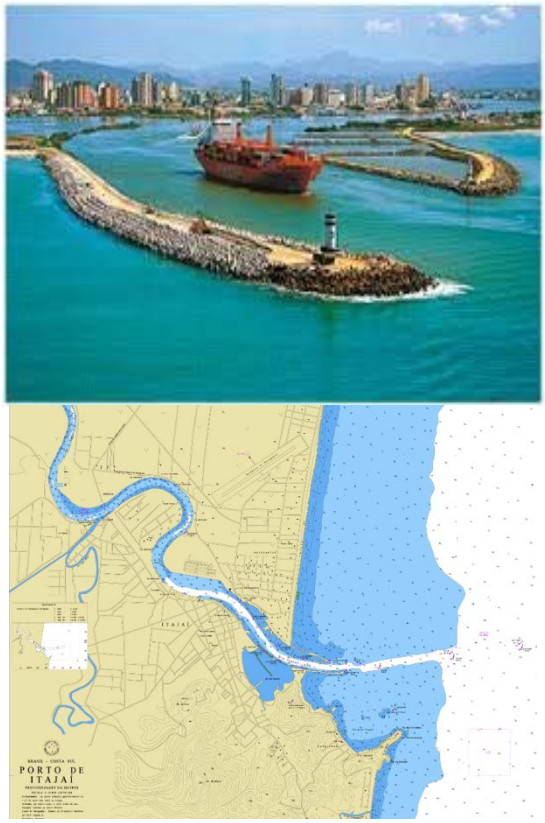


Figura 21-porto de Itajaí (Fonte: [29])

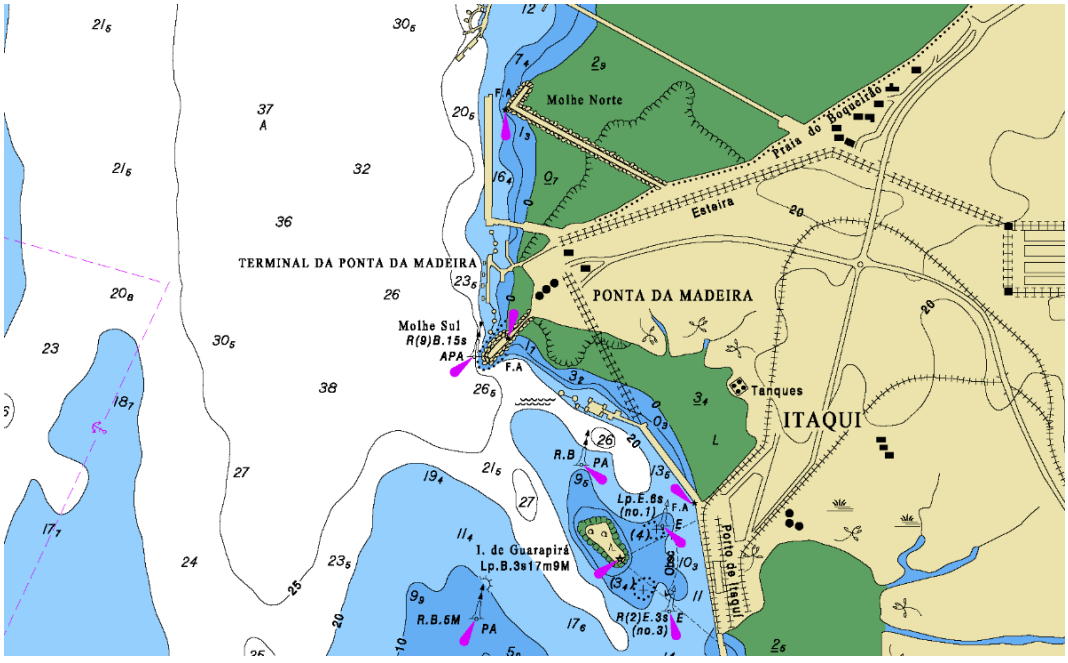


Figura 22-Porto de Itaqui (Fonte: [14])

Figura 23-Porto de Itaqui (Fonte: [30])

5.3. Identificar as condições meteorológicas características do porto

Diversos e diferentes fenômenos naturais podem ocorrer nos portos brasileiros, dentre eles nevoeiro, correntes, formação de ondas e processos convectivos, ocasionando ventos de diferentes intensidades para possibilitar que a navegação seja realizada com segurança, é importante entender a influência desses fenômenos na navegação.

Esses fenômenos poderão ocorrer simultaneamente ou não, ter origem efetivamente no local ou nas suas proximidades e, dependendo da direção de sua ocorrência e da sua intensidade, poderão ainda influenciar ou não na navegação. A análise qualitativa dos dados referentes à ocorrência desses fenômenos no porto possibilita a realização de estudos técnicos que podem ser utilizados para constatar a viabilidade técnica de a embarcação prosseguir ou não sua singradura.

Além dos aspectos físicos do porto e do canal de acesso, é importante observar as características e condições meteoceanográficas (ondas, correntes, marés, ventos) que poderão ocorrer no porto (dados climatológicos) para serem escolhidas, adequadamente, as variáveis de entrada no simulador.

5.4. Obter os dados das condições meteorológicas

É importante obter banco de dados de uma fonte confiável, preferencialmente junto a instituições que têm como atividade fim essa análise. As informações

climatológicas devem conter informações relativas quanto ao período considerado das medições realizadas, as direções de ocorrência de vento com as respectivas velocidades médias e frequência de ocorrências e ao número de medições realizadas**.**

No caso de informações relativas à ocorrência de ventos, poderá ser consultada a publicação “Atlas de Carta Piloto”, da DHN, por exemplo.

5.5. Tratar os dados meteorológicos

Para tratar os dados meteorológicos, podemos recorrer ao uso da análise estatística dos dados disponíveis, sendo utilizada uma função de distribuição, como a de Weibull por exemplo.

5.6. Procurar outros parâmetros que poderão influenciar na operação de entrada e saída do canal

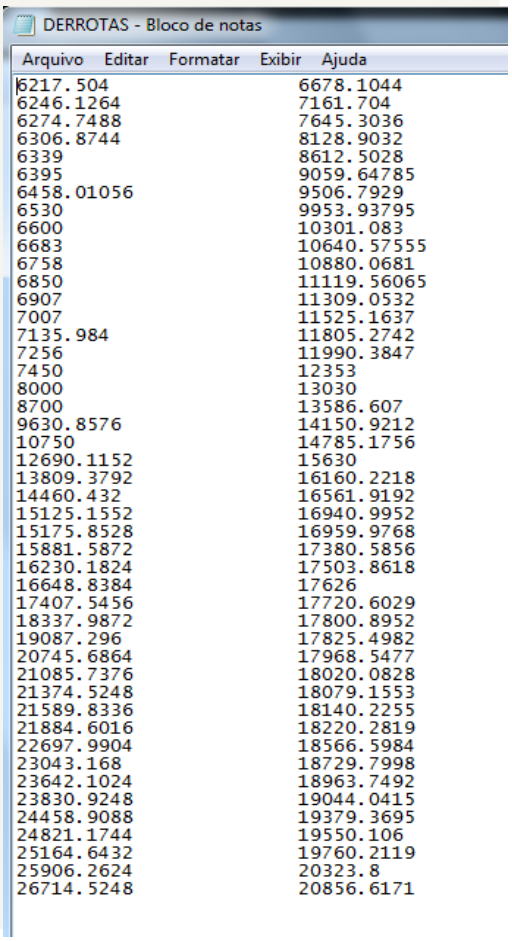
Deve ser avaliado, minuciosamente, se todos os parâmetros necessários foram considerados para a simulação. O principal parâmetro identificado que será fundamental na navegação para acesso a qualquer porto é o fator humano.

O fator humano e a ação do homem estão relacionados com as forças de governo e propulsão (ordens de leme e de máquina), mediante a avaliação da posição da embarcação, seu aproamento, velocidade desenvolvida e condições físicas e geográficas do ambiente. Como a geração de inúmeras manobras sob o comando de um ser humano torna a presente proposta inviável de ser concretizada, utilizaremos um piloto automático para representar as ações do ser humano.

Por outro lado, introduzir no piloto automático a capacidade de reagir como um ser humano, ou melhor, como diferentes seres humanos, está longe de fazer parte da presente proposta. Assim, parar aprimorar os resultados das simulações introduziu-se um tempo de retardo, variável, nas ações do piloto automático, buscando representar a reação de diferentes seres humanos.

5.7. Usar um simulador do tipo *fast time* e o método de Monte Carlo

Cabe ressaltar que, é importante considerar que a navegação será realizada em um canal de navegação, sendo pré determinada a derrota a ser realizada pelo piloto automático (com tempo de retardo)(Figura 24) e, principalmente, qual deve ser o limite de afastamento lateral para que a embarcação (alguma parte dela) seja considerada como “fora do canal de navegação”.



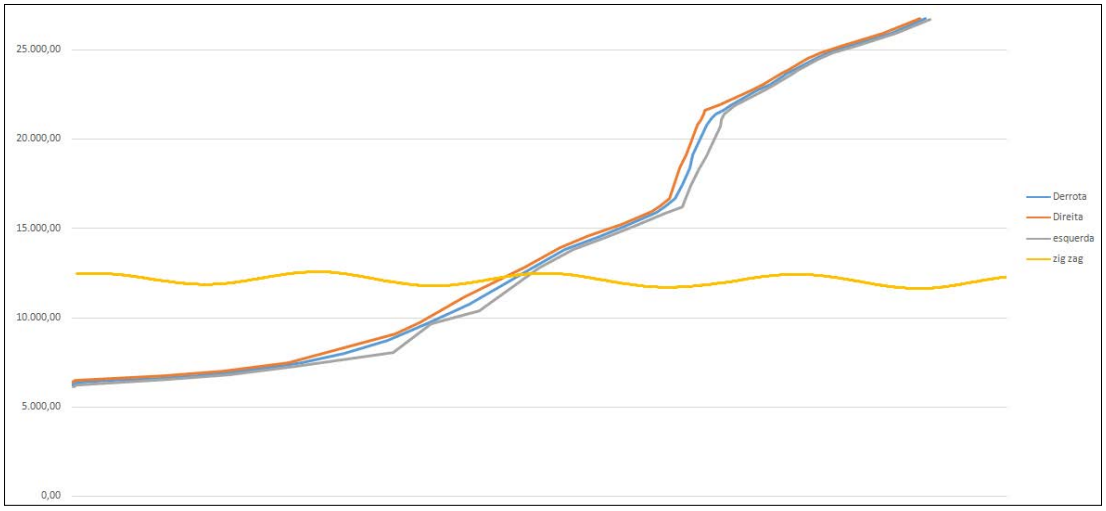


Figura 24- Plotagem do canal em estudo no simulador com a derrota que deverá ser realizada pelo piloto automático (Fonte: Adriana Pina).

5.8. Obter os valores estimados das probabilidades de a embarcação sair do canal para cada tempo de retardo pré-determinado

Após a realização das simulações em *fast time*, devem ser obtidos os gráficos com os resultados obtidos referentes aos valores das probabilidades estimadas da embarcação sair do canal.

5.9. Analisar os resultados

O procedimento permite realizar a primeira avaliação técnica quanto à navegação em qualquer canal de acesso. É importante que sejam observadas as informações dos valores obtidos nos gráficos gerados, além da compreensão dos fatores que foram considerados na simulação.

Os valores da probabilidade de a embarcação sair do canal, na situação real, normalmente aumentam à medida que o tempo de retardo também aumenta. Caso o gráfico apresente oscilação dos valores de probabilidade obtidas em um intervalo referente ao tempo de retardo, deve-se aumentar o número de simulações para corrigir essa discrepância.

As condições ambientais inseridas no simulador e o tempo de atraso nas manobras (retardo) também são fatores que irão influenciar nos resultados obtidos.

A viabilidade técnica da navegação pretendia será avaliada considerando a probabilidade de a embarcação sair do canal e a experiência de quem conduzirá a embarcação, em função dos tempos de retardos utilizados nas simulações.

6. Aplicação do procedimento para avaliação da viabilidade técnica quanto à navegação no canal de acesso ao porto de Sepetiba

Para a aplicação do procedimento proposto, inicialmente, foi realizada uma minuciosa busca em diversos Centros de simulação por um simulador de manobras do tipo *fast time* que possibilitasse considerar o fator humano nas simulações.

Todos os aspectos técnicos necessários foram atendidos pelo simulador existente do Centro de Análise de Sistemas Navais (CASNAV), que, após a realização das simulações, produzia gráficos de a probabilidade da embarcação modelada sair do canal em função do tempo de retardo.

Foram utilizadas as informações constantes do banco de dados do simulador do CASNAV, que possui o modelo hidrodinâmico das embarcações da *Ship Analytics International*, utilizado há mais de 20 anos no simulador de passadiço do CIAGA e validado por especialistas ao longo desse período.

As condições ambientais utilizadas nas simulações foram obtidas pelo CASNAV em estudos anteriormente realizados para o porto de Sepetiba, porém também será apresentada na aplicação do procedimento a maneira pela qual pode ser feito o tratamento de dados ambientais por meio de uma função de distribuição.

6.1. Obter os dados táticos do navio e modelagem hidrodinâmica da embarcação.

Foram utilizados dois modelos hidrodinâmicos de embarcações do tipo porta-contêiner com as seguintes características:

Embarcação A – Porta-Contêiner de 210.54m de comprimento e 29.88m de largura e com capacidade máxima de 2478 TEU.

Embarcação B – Porta-Contêiner de 228.08m de comprimento e 37m de largura e com capacidade máxima de 3800 TEU.

6.2. Pesquisar as características do porto ou canal de acesso da área de estudo

As características do canal de acesso foram obtidas da carta náutica e representadas no simulador.

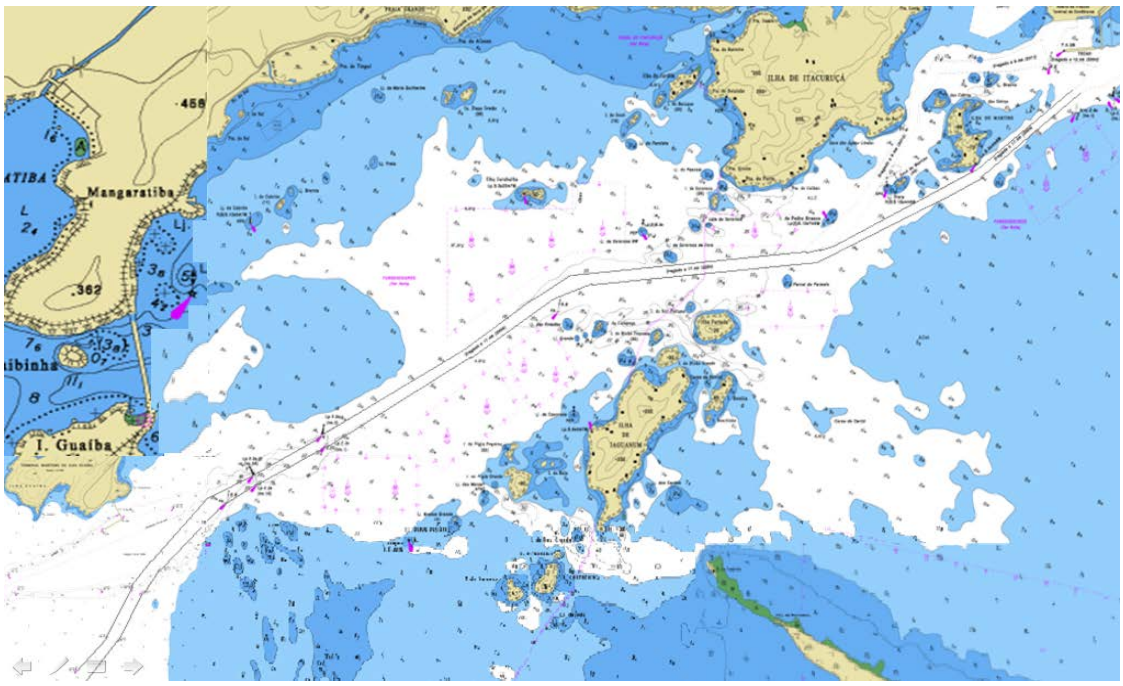


Figura 25-Canal de acesso na baía de Sepetiba ((Fonte: [14]))

Figura 26-Representação no simulador do canal de acesso (Fonte: Adriana Pina)

6.3. Identificar as condições meteorológicas características do porto

Estudos realizados para outras simulações já realizadas no CASNAV indicaram a importância da influência de corrente e de vento na região. A ação de onda, no entanto, pôde ser desprezada devido se tratar de área abrigada.

6.4. Obter os dados das condições meteorológicas

As informações de corrente foram estimadas por simulação de um modelo de marés e, as de vento, foram obtidas de um banco de dados do CHM (Figura 27)

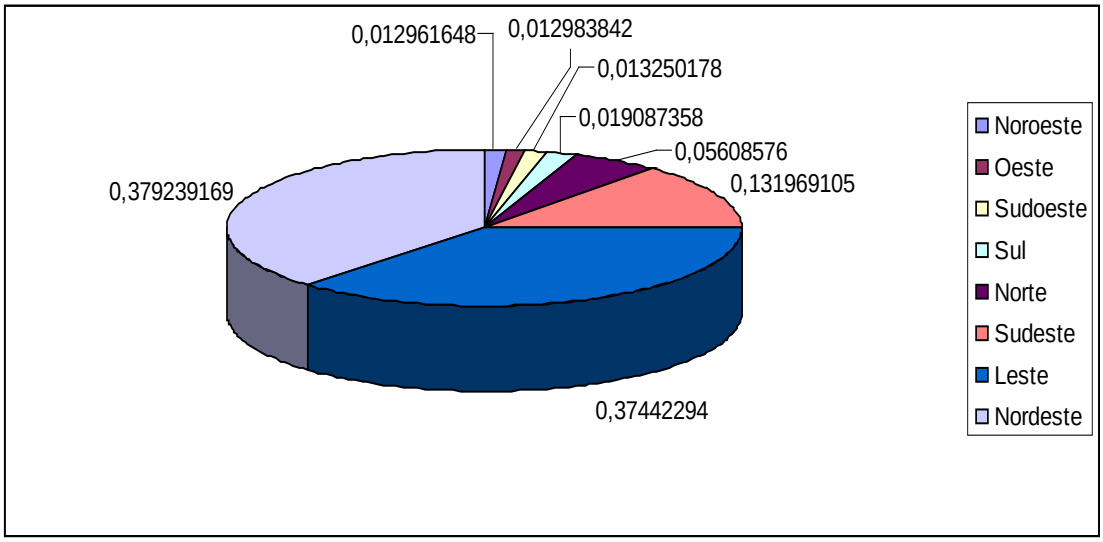


Figura 27- Distribuição de vento estatística para a baía de Sepetiba. (Fonte: [31])

Os parâmetros de maior interesse na hora de estudar o vento são suas velocidades e direções de incidência sobre o navio, e essas informações devem ser consideradas na simulação

Os dados para o analise estatístico necessário para a simulação podem ser extraídos das publicações de auxílio a navegação, e no caso de vento foi consultado o Atlas de Cartas Piloto (Figura 28 e Figura 29), e os dados das forças de vento obtidos da Carta Piloto podem ser consultados no Anexo A

Depois os dados das forças serão relacionados com as velocidades de vento usando a escala Beaufort como foi mencionado no ponto 4.1.1.2

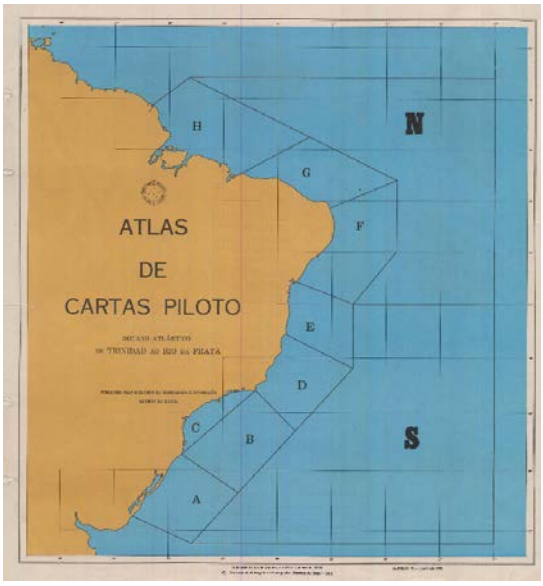


Figura 28- Atlas de cartas piloto (Fonte: [14])

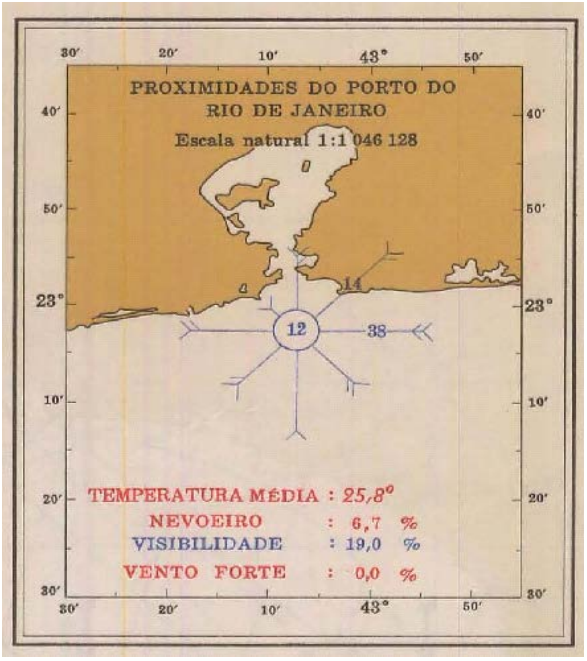


Figura 29-Carta piloto da entrada a baía de Guanabara (Fonte: [14])

6.5. Tratamento dos dados meteorológicos

Importante ressaltar que as informações sobre as condições ambientais do porto são de suma importância para a acurácia dos resultados. Pode ocorrer do simulador não possuir em seu banco de dados informações para um determinado porto das condições meteorológicas e, por essa razão, será apresentado neste item

como poderá ser feito o tratamento de dados ambientais para serem utilizados no simulador.

É importante que a classificação dos dados da força obtidos no ponto anterior, seja feita de acordo com as direções de incidência da força sobre o navio, tendo em vista que a direção poderá influenciar na manobra da embarcação. Então, para cada direção do vento deve haver uma classificação de dados de força média e frequência e frequência relativa, que pode ser calculado como

$$F = \frac{freq\ddot{u}\hat{e}ncia}{n\acute{u}mero\ total\ de\ dados}$$

No Anexo B, se encontram os valores das forças do vento na escala Beaufort para todas as direções.

Tabela 7- Organização da força dos ventos na direção 315 (Fonte: Adriana Pina)

DIREÇÃO	MÊS	FORÇA	FREQUÊNCIA (n medições)	FREQUÊNCIA RELATIVA (F/n) (%)		
315	janeiro	8	1	6,67		
315	fevereiro	7	1	6,67		
315	março	8	1	6,67		
315	abril	9	1	6,67		
315	maio	7	2	13,33		
315	junho	10	1	6,67		
315	julho	9	1	6,67		
315	agosto	11	1	6,67		
315	setembro	9	1	6,67		
315	outubro	10	1	6,67		
315	novembro	10	1	6,67		
315	dezembro	10	3	20,00	Total Medições 315º	15

Será obtida a velocidade do vento a partir da força media utilizando a escala Beaufort (Tabela 8).

Tabela 8-Correspondência da Força do vento com o seu intervalo de velocidade na escala Beaufort (Fonte: Adriana Pina)

Força Beaufort	Inicio do intervalo de velocidade (nós)	Final do intervalo de velocidade (nós)	V média (m/s)
0	0	0,514	0,26
1	0,514	1,542	1,03
2	2,056	3,084	2,57
3	3,598	5,14	4,37
4	5,654	8,224	6,94
5	8,738	10,794	9,77
6	11,308	13,878	12,59
7	9,252	16,962	13,11
8	17,476	20,56	19,02
9	21,074	24,158	22,62
10	24,672	28,27	26,47
11	28,784	32,382	30,58

Como a velocidade do vento e uma variável quantitativa continua, deve-se classificar os dados por intervalos. Segundo isso, haverá uma nova organização dos dados. Para cada direção existe um grupo de intervalos de velocidade com as suas frequências relativas

$$F = \frac{freq\ddot{u}\hat{e}ncia}{n\acute{u}mero\ total\ de\ dados}$$

E frequência acumulada

$$P_i = \sum_{1}^{i} F_{ri}$$

Uma vez obtidos os dados da carta piloto segundo as suas direções e calculadas as frequências relativas e acumuladas, quer-se saber qual será a possibilidade de ocorrência de uma determinada velocidade de vento no nosso canal, devido à característica de continuidade da nossa variável. Precisamos usar uma distribuição de probabilidade continua, e no nosso caso foi escolhida a distribuição de Weibull como modelo estatístico para representar a distribuição de frequência de ocorrência da velocidade do vento de forma mais eficiente possível.

Para calcular a distribuição de Weibull vamos calcular primeiro os seus dois parâmetros *k* e *c*. Como os valores iniciais que conseguimos das cartas piloto são o

intervalo de velocidades e a frequência para cada um desses intervalos, serão calculados o *k* e o *c* de Weibull usando o procedimento do ajuste de mínimos quadrados para distribuição observada.

Se os dados de velocidade de vento estiverem divididos em *n* intervalos (0-V_1, V_1-V_2, ... , V_{n-1} -V_n, com as informações de frequência de ocorrência f_1, f_2, f_3, ..., f_n, e as frequências acumuladas p_1=f_1; p_2= f_1 + f_2, ..., p_n= p $_{n-1}$ + f_n,, então a função de probabilidade acumulada é:

$P(v \leq vx) = \int_0^{Vx} p(v)Dv = 1 - exp\left[-\left(\frac{vx}{c}\right)k\right]$, que se transforma para a forma linear em:

$$y = a + b * x$$

pelas relações :

$$x_i = \ln(v_i)$$

$$y_i = ln[-\ln(1 - p_i)]$$

O melhor ajuste linear para os valores dos coeficientes *a* e *b* podem ser encontrados por ponderação ou pelo processo de ajuste de mínimos quadrados para a distribuição de frequência de ocorrência (Tabela 9).

Tabela 9-Cálculo dos valores de x e y para a direção de vento de 315º segundo o procedimento de ajuste de mínimos (Fonte: Adriana Pina)

Forcas (escala Beaufort)	valor do intervalo (vi) (m/s)	Frequência relativa de ocorrência da forca (%)	Frequência acumulada (p_i)	x	y
1	Não ocorreu	0,00	0,000		
2	Não ocorreu	0,00	0,000		
3	5,14	38,67	0,387	1,64	-0,72
4	8,22	32,95	0,716	2,11	0,23
5	10,79	28,38	0,999	2,38	1,93
6	Não ocorreu	0,00	0,999		
7	Não ocorreu	0,00	0,999		
8	Não ocorreu	0,00	0,999		
9	Não ocorreu	0,00	0,999		
10	Não ocorreu	0,00	0,999		
11	Não ocorreu	0,00	0,999		
12	Não ocorreu	0,00	0,999		

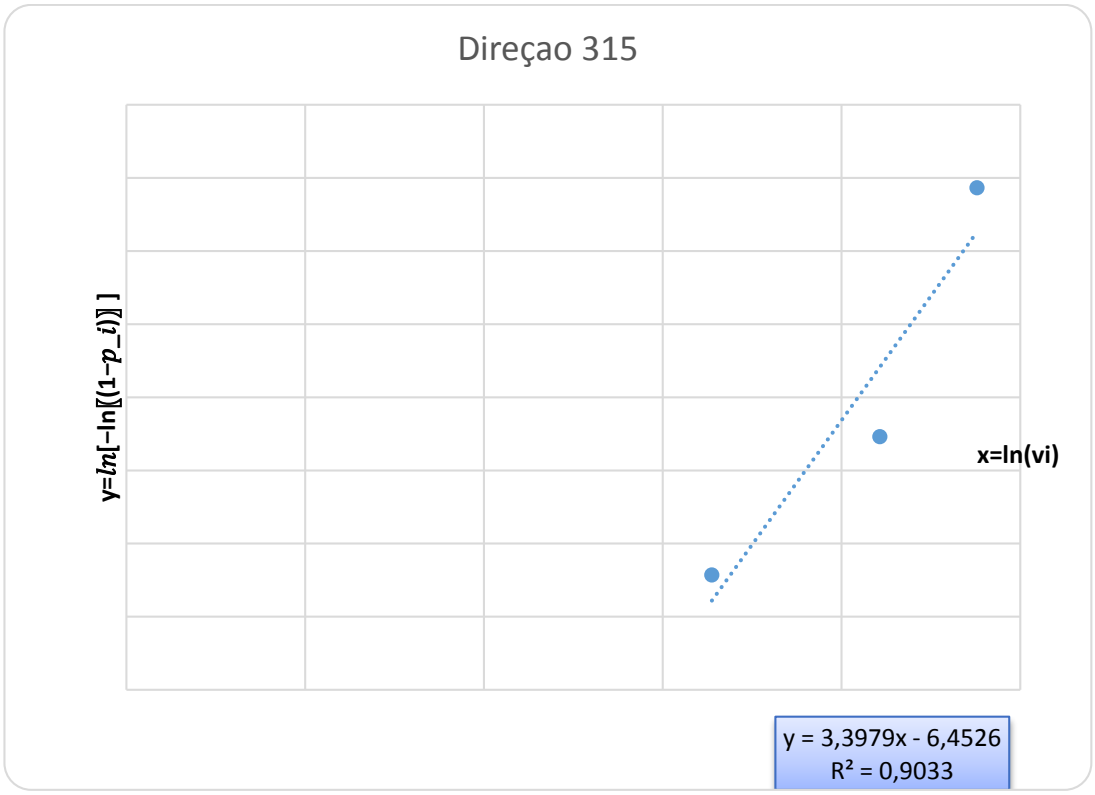


Figura 30- Reta para cálculo dos parâmetros *c* e *k* da distribuição de Weibull na direção de 315º (Fonte: Adriana Pina)

Assim, os parâmetros de distribuição de Weibull c e k estão relacionados aos coeficientes *a* e *b* por:

$$k = b$$

$$c = exp\left(-\frac{a}{b}\right) \qquad [m/s]$$

No caso da direção de 315º, como pode ser ver na Figura 30, os valores de *c* e *k* seriam:

$$k = b = 3.40$$

$$c = \exp\left(-\frac{a}{b}\right) = \exp\left(-\frac{-6.45}{3.40}\right) = 6.68\ m/s$$

No Anexo C, podemos observar os cálculo de frequência relativa e acumulada além dos valores de c e k de Weibull para todas as direções de vento.

Uma vez obtidos os valores de *c* e *k*, vamos calcular a distribuição de probabilidade de Weibull para obter a probabilidade de ocorrência de uma velocidade v_i qualquer;

$$p(v_i) = \left(\frac{k}{c}\right) * \left(\frac{v_i}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v_i}{c}\right)^k}$$

Um exemplo de distribuição de Weibull para a direção de incidência do vento de 315º pode ser visto na Figura 31. No anexo D, são mostradas as distribuições de Weibull calculadas para o resto de direções.

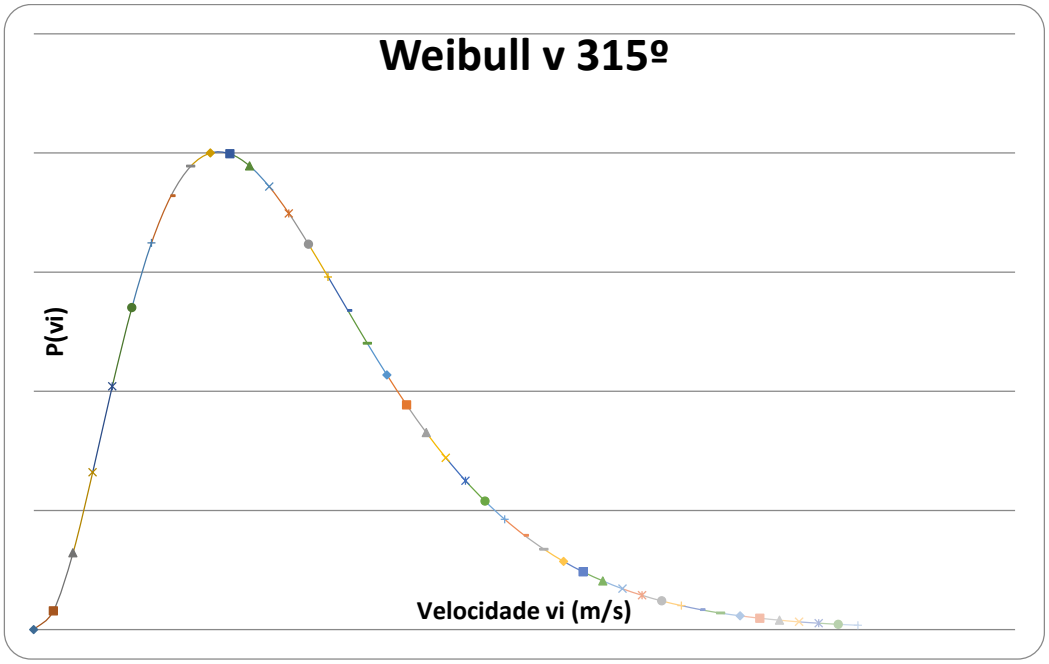


Figura 31-Distribuição de Weibull para a direção de incidência do vento de 315º (Fonte: Adriana Pina)

Depois vamos calcular a função de probabilidade acumulada para velocidade do vento para determinação da probabilidade de ocorrência de velocidades menores ou iguais a uma velocidade de referencia $\boldsymbol{vx}$.

$$\boldsymbol{P(v \leq vx) = \int_0^{Vx} p(v)Dv = 1 - exp\left[-\left(\frac{vx}{c}\right)\right]^k}$$

E Função de probabilidade de excedência para determinação da probabilidade de ocorrência de velocidades maiores ou iguais a uma velocidade de referencia $\boldsymbol{vx}$.

$$\boldsymbol{P(v \geq vx) = \int_0^{Vx} p(v)Dv = 1 - exp\left[-\left(\frac{vx}{c}\right)\right]^k}$$

Os cálculos dessas probabilidades podem ser vistos no ANEXO D

Os dados estatísticos obtidos pela distribuição de Weibull são fundamentais para a simulação, uma vez que serão inseridos no simulador para possibilitar a realização

das manobras considerando as condições características do porto, e assim, verificar a probabilidade da embarcação sair ou não do canal.

6.6. Procurar outros parâmetros que poderão influenciar na operação de entrada e saída do canal

Foi estabelecido um intervalo referente ao tempo de retardo, de modo que os resultados considerem os diferentes tempos de reações do ser humano.

6.7. Usar um simulador do tipo *fast time* e o método de Monte Carlo

O simulador utilizado será um simulador fast time, com um software desenvolvido e utilizado no CASNAV, que utiliza o seguinte modelo para as simulações:

1) Os componentes aleatórios são as direções e intensidades das correntes, determinadas em função da direção e velocidade e dos ventos, sorteados como variáveis pseudo-aleatória.
2) Para evitar que uma mesma mecânica de orientação do navio (estratégia de governo e contrabalanceamento de correntes viesse a se repetir sempre que as correntes fossem iguais, o ponto de partida teve suas coordenadas sorteadas através de variáveis pseudo-aleatória uniformemente distribuídas, e assim não há duas corridas iguais no processo de simulação.
3) As variáveis que não mudam, e são consideradas variáveis de controle, como ação do Comandante, operação do timoneiro e tempo de retardo, são mantidas em valores pré-estabelecidos para que apenas a ação da corrente e do retardo, estas, sim aleatórias, sejam avaliadas.
4) A rotina para geração de variáveis aleatórias é a rotina congruencial com parâmetros ótimos de Moore, que garantem mais de 2 bilhões de variáveis diferentes. [32]
5) A Lógica utilizada permite simular a entrada do canal com maré vazante em condição controlada de governo do navio para estimação da probabilidade média mínima do navio sair do canal com tempo de retardo na manobra determinado
6) Os ventos são sorteados de acordo com a função probabilidade acumulada fornecida

7) O ajuste da velocidade da corrente é realizado em função do vento

8) São sorteadas as coordenadas do ponto inicial

9) É avaliado se alguma parte do navio estiver fora da derrota (canal de navegação pré definido por coordenadas)

10) O simulador é um estimador do limite inferior da probabilidade do navio sair do canal. Pressupões-se que exceto a resposta do navio e o retardo, todas as manobras serão executadas com perfeição (piloto automático).

6.8. Obter os valores estimados das probabilidades de a embarcação sair do canal para cada tempo de retardo pré-determinado

Após a realização de 2.000 simulações em *fast time*, para cada tempo de retardo estabelecido, foram obtidos os seguintes resultados (Figura 32 e Figura 33):

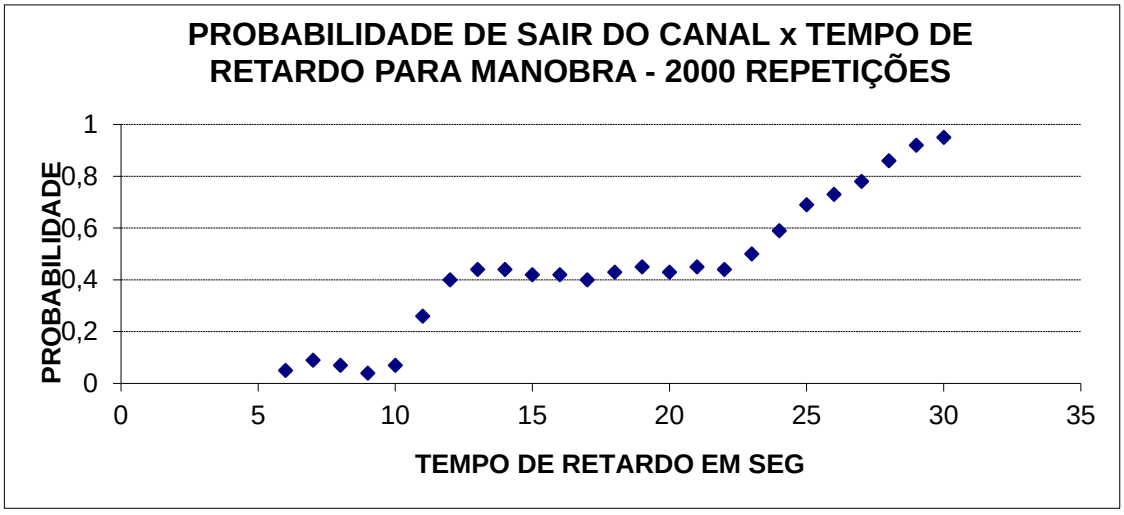


Figura 32-Embarcação A – Porta-Contêiner de 210.54m de comprimento e 29.88m de largura e com capacidade máxima de 2478 TEU.(Fonte: [31])

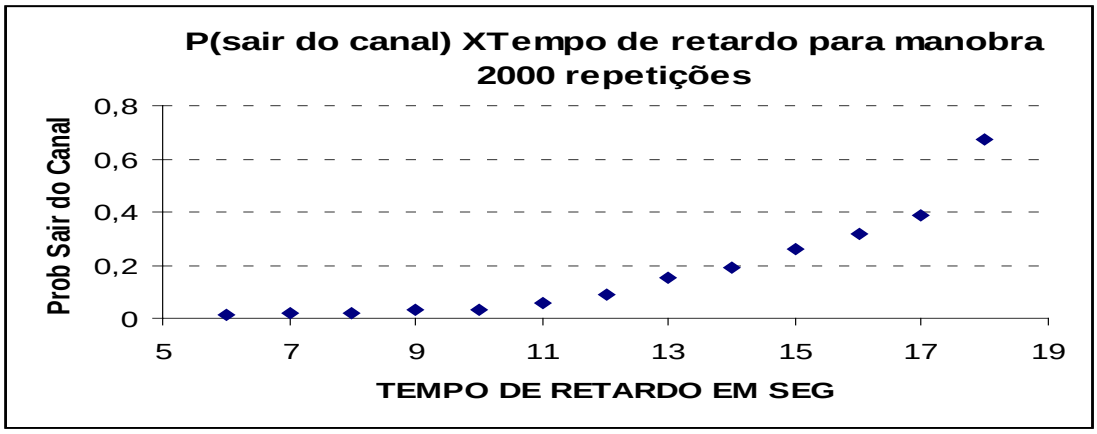


Figura 33-Embarcação B – Porta-Contêiner de 228.08m de comprimento e 37m de largura e com capacidade máxima de 3800 TEU (Fonte : [31])

6.9. Análise dos resultados

Os resultados demonstram que para a navegação no canal de acesso ao porto de Sepetiba, ambas as embarcações apresentaram valores significativos referentes à probabilidade de sair do canal, porém, para valores de tempo de retardo diferentes. Para um retardo correspondente a 15s nas manobras realizadas pela embarcação A, o valor obtido foi 0.4. A embarcação B obteve 0.25, aproximadamente, para o mesmo tempo considerado, podendo ser inferido então, que possui melhores condições de manobrabilidade.

É possível concluir observando os gráficos que somente com tempo de retardo muito inferior a esse valor (15 segundos), o valor da probabilidade irá diminuir.

Sendo observadas as características do canal de acesso constantes da carta náutica do porto, é possível observar que fora do canal de navegação, ainda existem áreas com valores de profundidades próximas às do canal, e, por essa razão, a princípio, o fato de a embarcação sair do canal pode não culminar com a ocorrência de um acidente.

Por fim, pode-se concluir que as informações obtidas podem ser utilizadas para subsidiar a avaliação quanto a viabilidade técnica de a embarcação acessar o porto, bastando apenas ser avaliada a experiência de quem realizará a navegação (obtenção do tempo de retardo) e o nível de probabilidade aceitável considerando as características do canal estudado.

7. Conclusões

Pesquisas relacionadas à navegação e ao uso de novas tecnologias disponíveis são fundamentais para a salvaguarda da vida humana no mar e nas hidrovias interiores, a segurança da navegação, a prevenção da poluição hídrica causada por embarcações, e ainda, para o desenvolvimento econômico do país.

Pode-se concluir que o uso de um modelo probabilístico na simulação marítima permite avaliar as condições de navegabilidade existentes em um determinado canal de acesso portuário e ao mesmo tempo identificar a probabilidade de saída do canal de acordo com o tempo de retardo, considerando a realização da manobra no trecho em estudo.

Os gráficos obtidos com o uso do procedimento possuem informações relevantes para subsidiar a avaliação da viabilidade técnica da navegação, porém, é necessário que seja definido para cada estudo realizado, em função do tipo de acesso portuário, e dos auxílios à navegação existentes, o nível da probabilidade "aceitável" para a embarcação sair do canal.

Como pôde ser observado nos gráficos obtidos na aplicação do procedimento, a experiência de quem irá conduzir a embarcação (tempo de retardo), nas manobras de entrada e saída do porto, será determinante para que possa ser considerado o nível de probabilidade que representará a situação real.

8. Discussão e contribuição esperada

Como foi apresentado no trabalho, a embarcação ao acessar um determinado porto, sofrerá os efeitos das forças externas (ação de ventos, ondas, correntes), e, portanto, é desejável conhecer o seu comportamento ao navegar sob a influência desses fatores, para avaliar a viabilidade de uma embarcação diferente do navio tipo para qual o porto foi projetado acessar o porto.

Diversos aspectos foram estudados para a elaboração do procedimento proposto, com o objetivo de reunir conhecimento da área de Ciências Náuticas, Engenharia Naval e Oceânica, Meteorologia, Estatística, Psicologia, além dos aspectos legais relacionados ao tema.

O trabalho, então, buscou apresentar os aspectos das diversas áreas de conhecimento que estão relacionados com o tema em lide. Ademais, utilizando essas

informações buscou apresentar um procedimento para a primeira avaliação técnica quanto à viabilidade de uma embarcação acessar um porto, considerando as condições ambientais reais observadas no porto e, principalmente, a influência do tempo de reação humana no comportamento da embarcação ao trafegar no canal de navegação.

Espera-se, então, que o procedimento contribua para a elaboração de estudos técnicos que são necessários para avaliar a viabilidade técnica da entrada de embarcações diferentes dos navios tipos que atualmente trafegam nos diversos portos internacionais e que tencionem operar nos portos brasileiros, ou ainda para a análise do dimensionamento necessário dos acessos portuários existentes que necessitam de obras de dragagem para reduzir a probabilidade de a embarcação sair do canal de navegação. Também se espera que contribua na área de logística das atividades da Marinha Mercante, uma vez que é possível identificar portos alternativos.

9. Trabalhos futuros

O presente trabalho teve uma abrangência normativa e técnico - cientifica) para apresentar um procedimento para a primeira avaliação técnica quanto à viabilidade de uma embarcação acessar um porto, utilizando um simulador do tipo *fast time* e o método de Monte Carlo. Espera-se então que sirva como suporte a novas pesquisas e trabalhos de dissertação sobre o tema estudado.

Os resultados das simulações apresentaram as probabilidades de a embarcação sair do canal, em função de um tempo de retardo pré-determinado para realização das simulações. Não foi possível, porém, definir o tempo de retardo que representa o tempo de reação de um ser humano ou diferentes seres humanos, ao manobrar a embarcação. Essa avaliação é complexa e requer um estudo especifico para que possa ser tratado com cautela. O estudo do fator humano deve considerar que, na navegação marítima ou fluvial, vários aspectos poderão influenciar no psíquico de quem “está com a manobra” (expressão utilizada para designar quem é o responsável para dar as ordens necessárias ao timoneiro).

O horário da realização da manobra, a visibilidade no canal, ruído e/ou vibração na embarcação, o idioma da tripulação, o descumprimento do período de descanso (fadiga), a densidade do tráfego do porto são alguns fatores que irão influenciar no tempo de reação de quem “está com a manobra”. Por essa razão, uma linha de pesquisa poderá ser realizada para a identificação do tempo de reação do ser humano nas diversas situações de navegação para a entrada e saída do porto.

Quanto ao nível de probabilidade aceitável para a operação da embarcação no porto, também se faz necessária a realização de um estudo específico, devido à complexidade do tema e as especificidades de cada porto brasileiro.

É importante ressaltar que a realização de novos estudos e pesquisas relacionadas a procedimentos técnicos para a avaliação da viabilidade técnica de uma embarcação acessar e operar em um porto nacional poderá contribui para o desenvolvimento do comércio marítimo no país e para o crescimento da economia brasileira.

10. Bibliografia

1. BRASIL. **Norma ABNT 13246- Planejamento Portuario**. [S.l.]. 28 Fevereiro de 1995.

2. IALA-GRUPO DE TRABALHO CONJUNTO PIANC-IAPH II-30 EM COLABORAÇÃO COM IMPA. **PTC-II-30-Approach Channels a Guide for Design**. PIANC. [S.l.]. 1997.

3. MARCOM WORKING GROUP 121. **Harbour Approach Channels-Design Guidelines**. PIANC. [S.l.]. January 2014.

4. BRASIL. Marinha do Brasil. Diretoria de Portos e Costas.Normas da Autoridade Marítima para obras, dragagens, pesquisa e lavra de minerais sob, sobre e às margens das águas jurisdicionais brasileiras., 2003.

5. BRASIL. **Lei nº12815 - Dispõe sobre a exploração direta e indireta pela União de portos e instalações portuárias e sobre as atividades**. Presidencia da Republica- Diario Oficial da União. [S.l.]. 5 de Junho 2013.

6. BRASIL. **Lei nº 8630-Dispõe sobre o regime jurídico da exploração dos portos organizados e das instalações portuárias e dá outras providências. (LEI DOS PORTOS)**. Presidencia da Republica-Diario Oficial da União. [S.l.]. 25 Fevereiro de 1993.

7. BRASIL. **Lei 9537/97/99 (LESTA)**. Presidencia da Republica. [S.l.]. 11 de Dezembro de 1997.

8. PEREIRA OLIVEIRA MATOS, P. Reunião funcional da marinha. [S.l.]: [s.n.].

9. G1-JORNAL O Globo , 25 de Maio de 2012. Disponivel em: <http://g1.globo.com/mundo/noticia/2012/05/cruzeiro-de-luxo-bate-em-ponte-na-china.html>. Acesso em: Fevereiro 2015.

10. BRASIL.MINISTERIO DA DEFESA. MARINHA DO BRASIL. **Portaria nº156/MB**. [S.l.]. 3 de Junho de 2004.

11. BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Presidência da República. [S.l.]. 1988.

12. LAURENTINO DE MESQUITA, P. Secretaria dos Portos. Presidéncia da República, 2015. Disponivel em: <http://www.portosdobrasil.gov.br/assuntos-1/sistema-portuario-nacional>. Acesso em: Maio 2015.

13. PIRENS MIGUENS, A. **Navegação a ciência e a arte:** navegação costeira, estimada e em aguas restritas. [S.l.]: Marinha do Brasil, v. I, 1995.

14. MARINHA, C.-C. D. H. D. Pagina oficial do CHM. Disponivel em: <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/>. Acesso em: 2014-2015.

15. BRASIL. **Marinha do Brasil. Diretoria de Hidrografia e navegação.Normas da Autoridade Marítima para auxilio a navegação. (NORMAM-17/DHN)**. [S.l.]: Marinha do Brasil, 2008.

16. BRASIL. **Marinha do Brasil. Diretoria de Portos e Costas.Normas da Autoridade Marítima para embarcações empregadas na navegação em mar aberto. (NORMAM 1/DPC)**. [S.l.]: Marinha do Brasil, 2005.

17. ALFREDINI, P. **Obra e Gestão de Portos**. 2a. ed. [S.l.]: Edgar Blucher, 2009.

18. VALGAS LOBO, P. R.; SOARES, C. A. **Meteorologia e oceanografia:** Usuario Navegante. 3a. ed. [S.l.]: [s.n.], 2007.

19. PEGDEN , C. D.; SADOWSKI, R. P.; SHANNON, R. P. **Introduction to Simulation Using Siman**. Bristol,UK: McGraw-Hill, 1991.

20. DE SA COUTINHO JUNIOR, E. **Modelação hidrodinamica de um navio em um simulador atraves de um modelo empirico**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil. Agosto 2014.

21. LI, Y. **The simulation of ship manuavering and course keeping with escort tug**. The University of British Columbia. Columbia, USA. 2004.

22. JOURNEE, J. M. J.; MASSIE, W. W. **Offshore Hydromechanics**. [S.l.]: Delft University of Technology, 2001.

23. MUNK, W. H. Origin and generation of waves, Long Beach, California., p. 1-4, 1950.

24. OCEANICA-UFRJ , 2006. Disponivel em: <http://www.oceanica.ufrj.br/deno/prod_academic/relatorios/2006-/GuilhermeL+Ursula/relat2/Relatorio01_arquivos/relat1.htm>.

25. MARINHA, C. D. H. D. Cartas de correntes de mare. **Publicações de Auxilio a navegação**, 2014. Disponivel em: <https://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-publicacoes/publicacoes/ccm/ccm.htm>. Acesso em: Setembro.

26. SEGEL. [S.l.]: [s.n.], 1960.

27. VANTORRE, M.; LAFORCE, E.; ELOOT, K. **Ship Motions in Shallow Water as the Base for a Probabilistic Approach Policy**. OMAE 2008. Estoril, Portugal. 2008.

28. SUL, E. D. R. G. D. Porto do Rio Grande. Disponivel em: <http://www.portoriogrande.com.br/site/index.php>. Acesso em: 2015.

29. ITAJAI, A. P. D. P. D. Porto de Itajai. Disponivel em: <http://www.portoitajai.com.br/novo/>.

30. MARANHÃO, G. D. Porto de Itaqui. Disponivel em: <http://www.portodoitaqui.ma.gov.br/>.

31. CASNAV. **Analise de riscos sobre o pilot exemption certificate**. CASNAV-Centro de Analises de sistemas navais. [S.l.]. 2015.

32. DIAS FERREIRA, J. **Algoritmos para geração de valores aleatórios e pseudoaleatórios e suas utilizações práticas**. Universidade Federal Fluminense. Niteroi, RJ, Brasil. 2008.

33. MÉTODO de Monte Carlo. **Wikipedia**, Curitiba, Paraná, Brasil, 2016. Disponivel em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9todo_de_Monte_Carlo>.

11. Anexos

12. Anexo A- Dados de vento para baía de Guanabara obtidos das cartas piloto

DIREÇÃO	JANEIRO		FEVEREIRO		MARÇO		ABRIL		MAIO		JUNHO	
	FORÇA MÉDIA	FREQUÊNCIA RELATIVA (%)	FORÇA MÉDIA	FREQUÊNCIA RELATIVA (%)	FORÇA MÉDIA	FREQUÊNCIA RELATIVA (%)	FORÇA MÉDIA	FREQUÊNCIA RELATIVA (%)	FORÇA MÉDIA	FREQUÊNCIA RELATIVA (%)	FORÇA MÉDIA	FREQUÊNCIA RELATIVA (%)
0	3	6	**2**	**5**	1	9	2	11	3	17	2	16
45	3	14	**2**	**16**	1	18	4	16	3	12	3	18
90	4	38	**3**	**37**	3	33	3	35	3	27	4	28
135	3	6	**2**	**8**	2	8	2	9	1	7	1	4
180	2	9	**1**	**9**	3	11	3	11	3	9	3	6
225	3	6	**3**	**7**	3	8	5	5	4	12	4	12
270	3	8	**2**	**6**	3	7	4	9	3	11	3	6
315	8	1	**7**	**1**	8	1	9	1	7	2	10	1
Calmaria	0	12	**0**	**11**	0	5	0	3	0	3	0	9

DIREÇÃO	JULHO		AGOSTO		SETEMBRO		OUTUBRO		NOVEMBRO		DEZEMBRO	
	FORÇA MÉDIA	FREQUÊNCIA RELATIVA (%)	FORÇA MÉDIA	FREQUÊNCIA RELATIVA (%)	FORÇA MÉDIA	FREQUÊNCIA RELATIVA (%)	FORÇA MÉDIA	FREQUÊNCIA RELATIVA (%)	FORÇA MÉDIA	FREQUÊNCIA RELATIVA (%)	FORÇA MÉDIA	FREQUÊNCIA RELATIVA (%)
0	2	14	**4**	**5**	3	3	1	3	2	2	2	2
45	2	14	**2**	**18**	1	14	2	7	1	7	1	10
90	4	36	**5**	**39**	3	37	5	46	5	39	4	42
135	3	3	**4**	**3**	3	6	3	6	2	9	3	8
180	3	6	**5**	**7**	3	9	3	11	3	11	2	9
225	5	11	**2**	**15**	3	15	2	16	3	12	1	15
270	4	7	**4**	**8**	4	9	4	7	3	11	3	1
315	9	1	**11**	**1**	9	1	10	1	10	1	10	3
Calmaria	0	8	**0**	**4**	0	6	0	3	0	8	0	10

13. Anexo B- Dados de vento da carta piloto segundo as direções de incidência do vento.

DIREÇÃO	MÊS	FORÇA	FREQUÊNCIA (n medições)	FREQUENCIA RELATIVA (F/n) (%)		
0	janeiro	3	6	6,45		
0	fevereiro	2	5	5,38		
0	março	1	9	9,68		
0	abril	2	11	11,83		
0	maio	3	17	18,28		
0	junho	2	16	17,20		
0	julho	2	14	15,05		
0	agosto	4	5	5,38		
0	setembro	3	3	3,23		
0	outubro	1	3	3,23		
0	novembro	2	2	2,15		
0	dezembro	2	2	2,15	Total Medições 0º	93
45	janeiro	3	14	8,54		
45	fevereiro	2	16	9,76		
45	março	1	18	10,98		
45	abril	4	16	9,76		
45	maio	3	12	7,32		
45	junho	3	18	10,98		
45	julho	2	14	8,54		
45	agosto	2	18	10,98		
45	setembro	1	14	8,54		
45	outubro	2	7	4,27		
45	novembro	1	7	4,27		
45	dezembro	1	10	6,10	Total Medições 45º	164
90	janeiro	4	38	8,70		
90	fevereiro	3	37	8,47		
90	março	3	33	7,55		
90	abril	3	35	8,01		
90	maio	3	27	6,18		
90	junho	4	28	6,41		
90	julho	4	36	8,24		
90	agosto	5	39	8,92		
90	setembro	3	37	8,47		
90	outubro	5	46	10,53		
90	novembro	5	39	8,92		
90	dezembro	4	42	9,61	Total Medições 90º	437

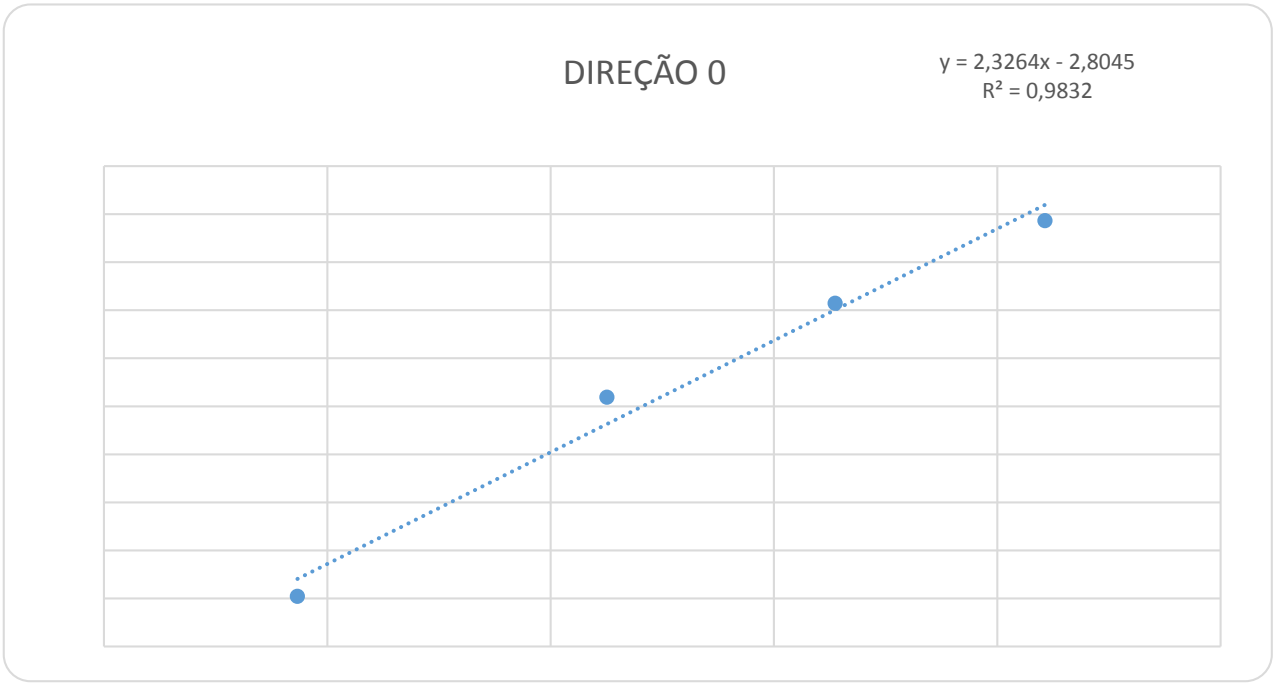
DIREÇÃO	MÊS	FORÇA	FREQUÊNCIA (n medições)	FREQUÊNCIA RELATIVA (F/n) (%)		
135	janeiro	3	6	7,79		
135	fevereiro	2	8	10,39		
135	março	2	8	10,39		
135	abril	2	9	11,69		
135	maio	1	7	9,09		
135	junho	1	4	5,19		
135	julho	3	3	3,90		
135	agosto	4	3	3,90		
135	setembro	3	6	7,79		
135	outubro	3	6	7,79		
135	novembro	2	9	11,69		
135	dezembro	3	8	10,39	Total Medições 135º	77
180	janeiro	2	9	8,33		
180	fevereiro	1	9	8,33		
180	março	3	11	10,19		
180	abril	3	11	10,19		
180	maio	3	9	8,33		
180	junho	3	6	5,56		
180	julho	3	6	5,56		
180	agosto	5	7	6,48		
180	setembro	3	9	8,33		
180	outubro	3	11	10,19		
180	novembro	3	11	10,19		
180	dezembro	2	9	8,33	Total Medições 180º	108
225	janeiro	3	6	4,48		
225	fevereiro	3	7	5,22		
225	março	3	8	5,97		
225	abril	5	5	3,73		
225	maio	4	12	8,96		
225	junho	4	12	8,96		
225	julho	5	11	8,21		
225	agosto	2	15	11,19		
225	setembro	3	15	11,19		
225	outubro	2	16	11,94		
225	novembro	3	12	8,96		
225	dezembro	1	15	11,19	Total Medições 225º	134

DIREÇÃO	MÊS	FORÇA (Beaufort)	FREQUÊNCIA (nº medições)	FREQUÊNCIA RELATIVA (F/n) (%)		
270	janeiro	3	8	8,89		
270	fevereiro	2	6	6,67		
270	março	3	7	7,78		
270	abril	4	9	10,00		
270	maio	3	11	12,22		
270	junho	3	6	6,67		
270	julho	4	7	7,78		
270	agosto	4	8	8,89		
270	setembro	4	9	10,00		
270	outubro	4	7	7,78		
270	novembro	3	11	12,22		
270	dezembro	3	1	1,11	Total Medições 270º	90
315	janeiro	8	1	6,67		
315	fevereiro	7	1	6,67		
315	março	8	1	6,67		
315	abril	9	1	6,67		
315	maio	7	2	13,33		
315	junho	10	1	6,67		
315	julho	9	1	6,67		
315	agosto	11	1	6,67		
315	setembro	9	1	6,67		
315	outubro	10	1	6,67		
315	novembro	10	1	6,67		
315	dezembro	10	3	20,00	Total Medições 315º	15

14. Anexo C- Frequências relativas e acumuladas, cálculo dos valores *c* e *k* de Weibull usando o método de ajuste de mínimos quadrados, para cada uma das direções de vento.

Direção 0

Forças (Beaufort)	valor do intervalo (m/s)	Frequência relativa de ocorrência da forca (%)	Frequência acumulada	x	y
1	1,54	12,90	0,13	0,43	-1,98
2	3,08	53,76	0,67	1,13	0,09
3	5,14	27,96	0,95	1,64	1,07
4	8,22	5,38	1,00	2,11	1,93
5	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
6	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
7	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
8	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
9	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
10	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
11	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
12	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D

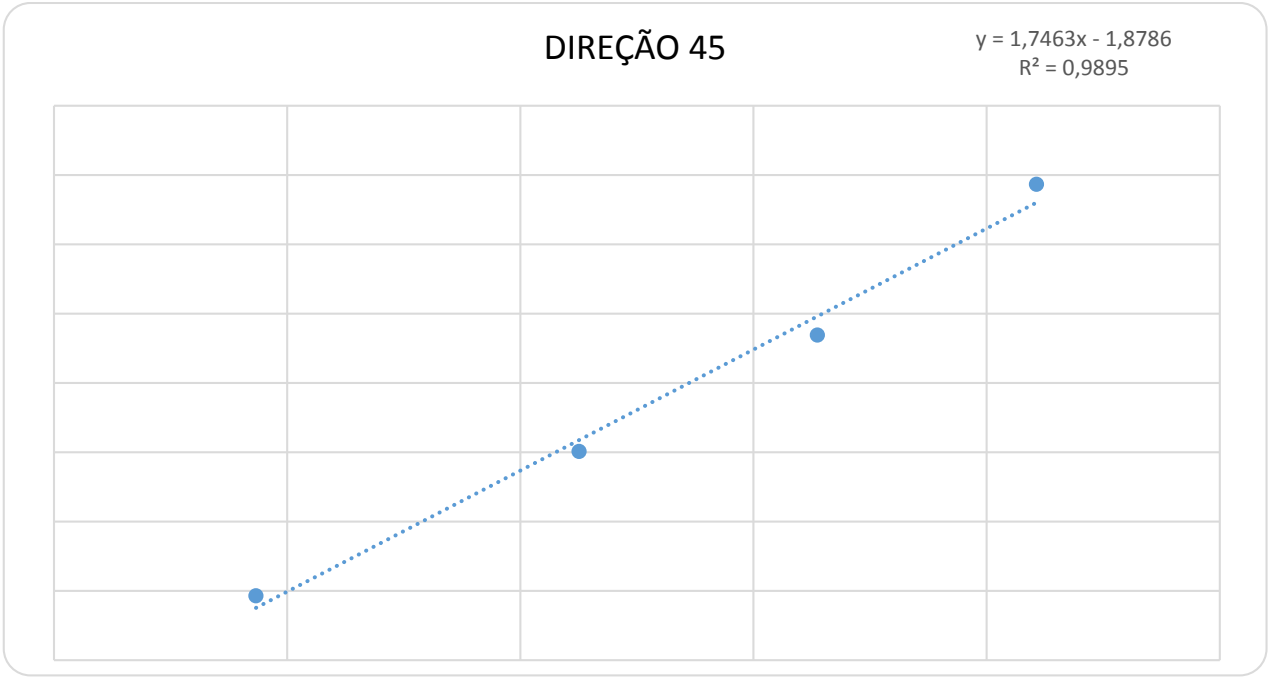


Parâmetros de Weibull

c 0 vento	3,34	m/s
k 0 vento	2,33	

Direção 45

Forças (Beaufort)	valor do intervalo (m/s)	Frequência relativa de ocorrência da forca (%)	Frequência acumulada	x	y
1	1,54	29,88	0,30	0,43	-1,04
2	3,08	33,54	0,63	1,13	0,01
3	5,14	26,83	0,90	1,64	0,84
4	8,22	9,76	1,00	2,11	1,93
5	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
6	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
7	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
8	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
9	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
10	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
11	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
12	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D

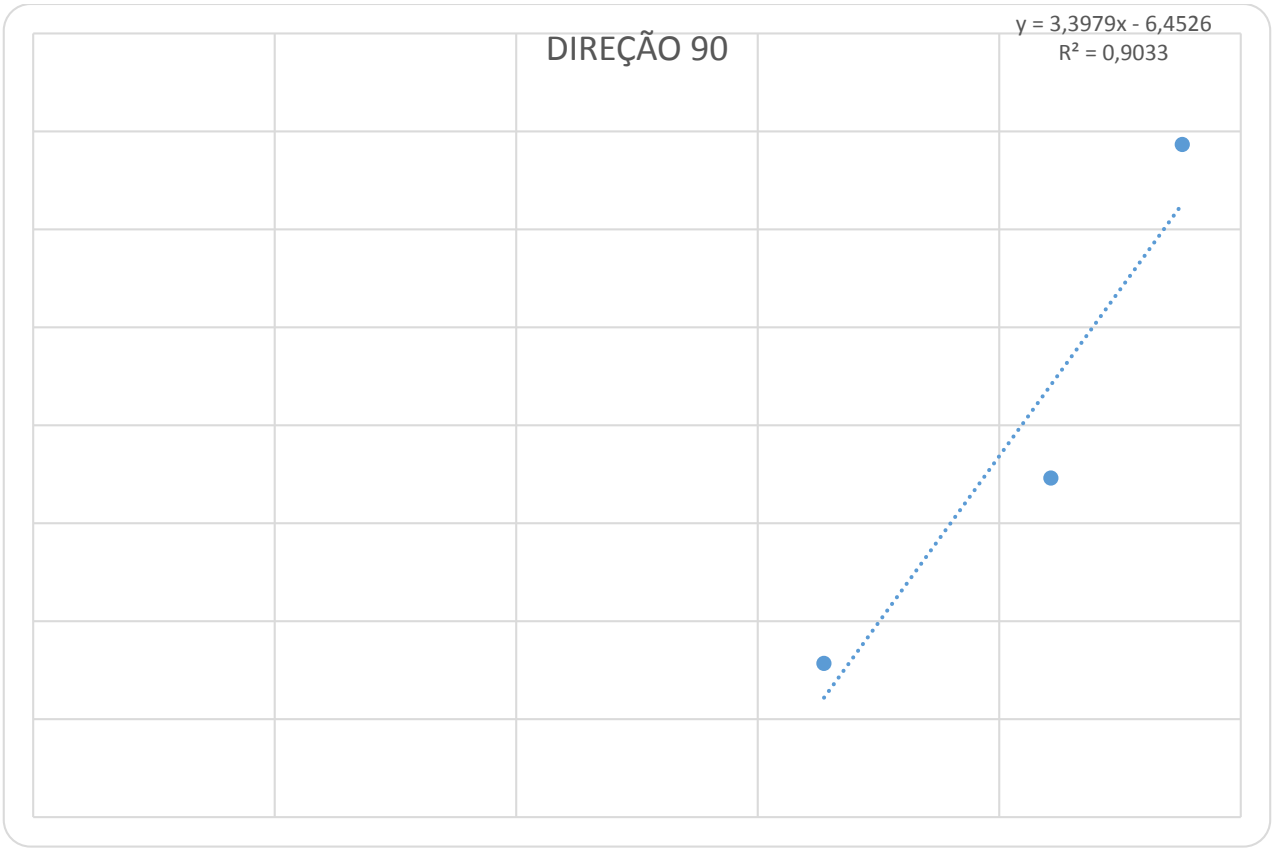


Parâmetros de Weibull

c 45 vento	2,93	m/s
k 45 vento	1,75	

Direção 90

Forças (Beaufort)	valor do intervalo (m/s)	Frequência relativa de ocorrência da forca (%)	Frequência acumulada	x	y
1	Não ocorreu	0,00	0,00	#N/D	#N/D
2	Não ocorreu	0,00	0,00	#N/D	#N/D
3	5,14	38,67	0,39	1,64	-0,72
4	8,22	32,95	0,72	2,11	0,23
5	10,79	28,38	1,00	2,38	1,93
6	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
7	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
8	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
9	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
10	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
11	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
12	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D

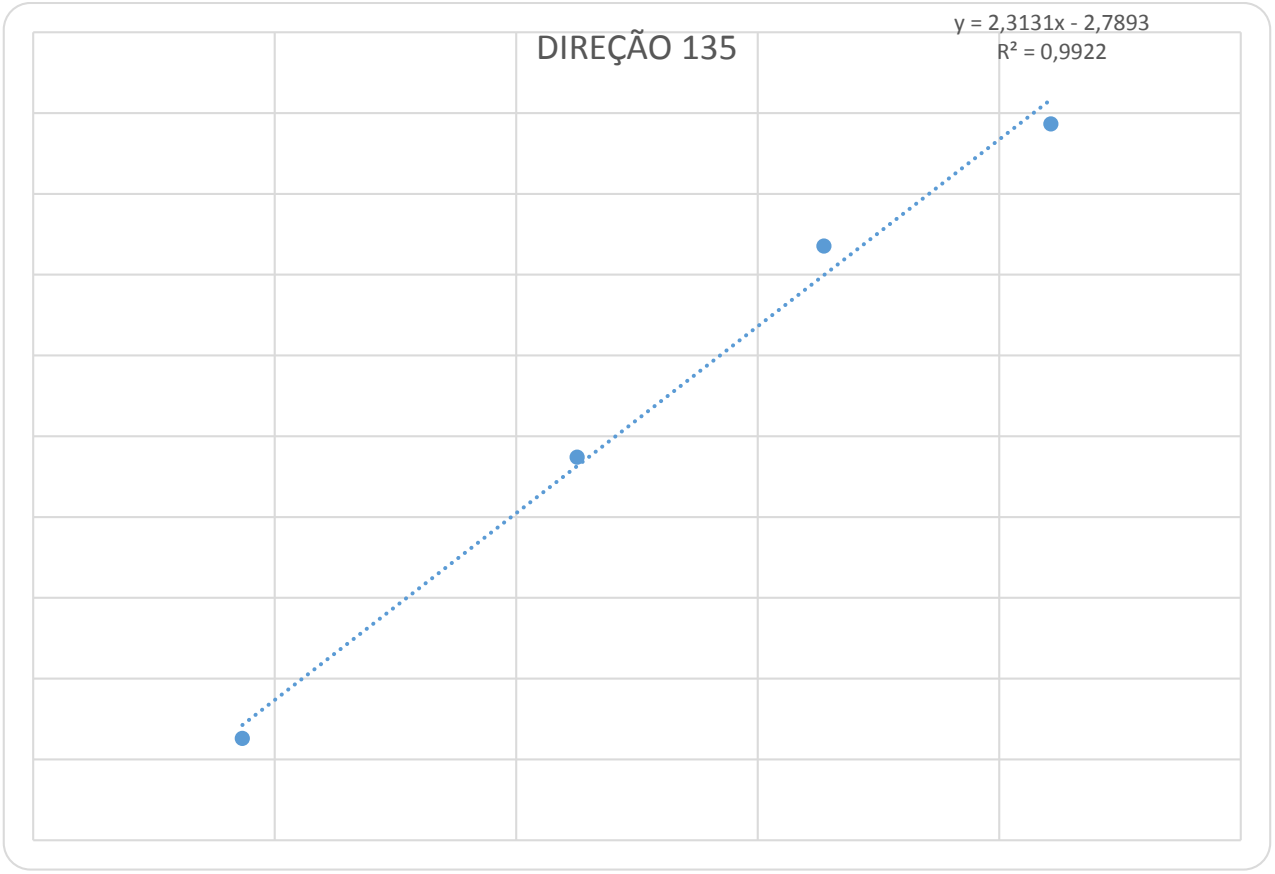


Parâmetros de Weibull

c 90 vento	6,68	m/s
k 90 vento	3,40	

Direção 135

Forças (Beaufort)	valor do intervalo (m/s)	Frequência relativa de ocorrência da forca (%)	Frequência acumulada	x	y
1	1,54	14,29	0,14	0,43	-1,87
2	3,08	44,16	0,58	1,13	-0,13
3	5,14	37,66	0,96	1,64	1,18
4	8,22	3,90	1,00	2,11	1,93
5	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
6	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
7	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
8	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
9	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
10	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
11	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
12	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D



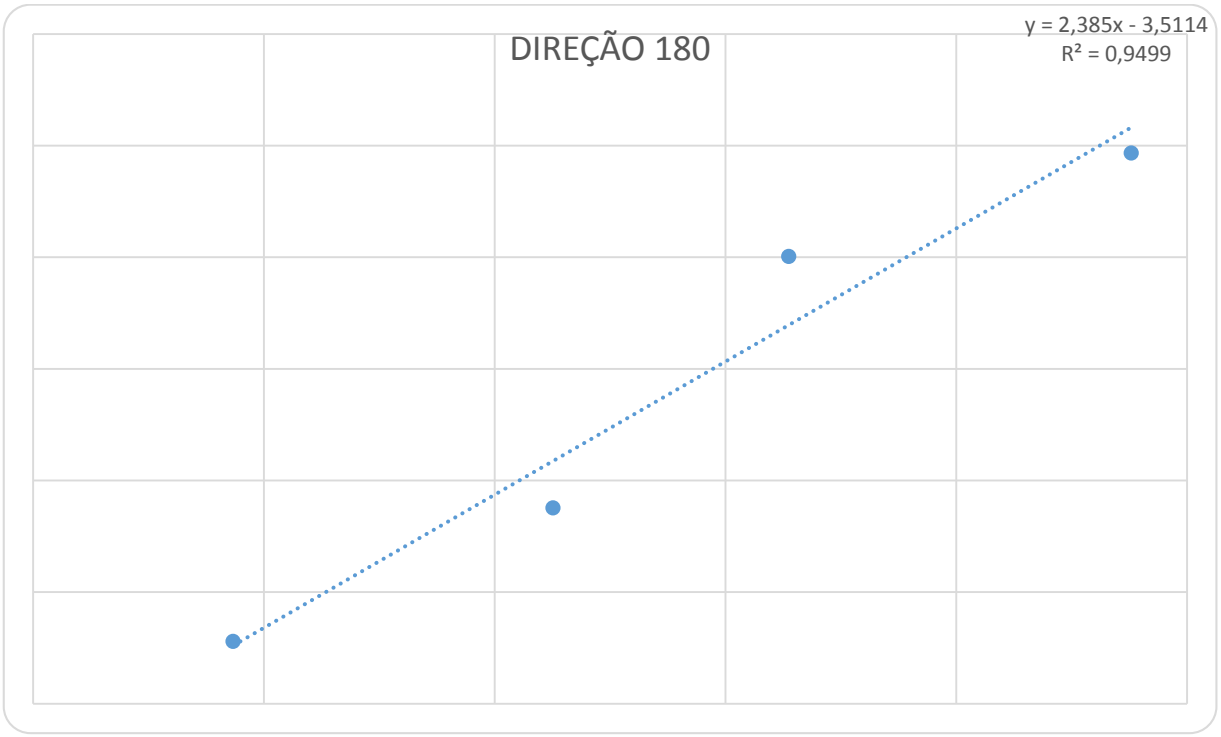
Parâmetros de Weibull

c 135 vento	3,34	m/s

k 135 vento	2,31

Direção 180

Forças (Beaufort)	valor do intervalo (m/s)	Frequência relativa de ocorrência da forca (%)	Frequência acumulada	x	y
1	1,54	8,33	0,08	0,43	-2,44
2	3,08	16,67	0,25	1,13	-1,25
3	5,14	68,52	0,94	1,64	1,01
4	Não ocorreu	0,00	0,94	#N/D	#N/D
5	10,79	6,48	1,00	2,38	1,93
6	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
7	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
8	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
9	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
10	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
11	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
12	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D

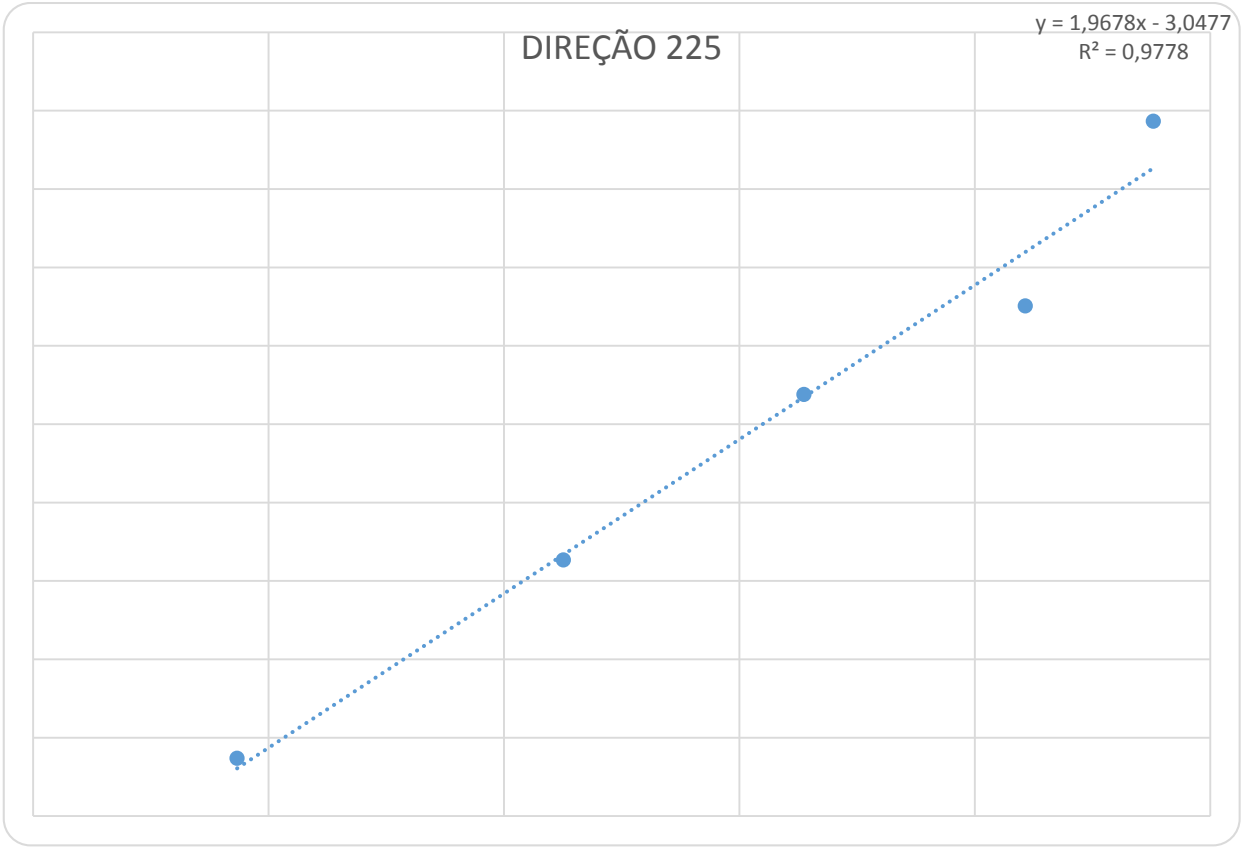


Parâmetros de Weibull

c 180 vento	4,36	m/s
k 180 vento	2,39	

Direção 225

Forças (Beaufort)	valor do intervalo (m/s)	Frequência relativa de ocorrência da forca (%)	Frequência acumulada	x	y
1	1,54	11,19	0,11	0,43	-2,13
2	3,08	23,13	0,34	1,13	-0,87
3	5,14	35,82	0,70	1,64	0,19
4	8,22	17,91	0,88	2,11	0,75
5	10,79	11,94	1,00	2,38	1,93
6	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
7	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
8	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
9	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
10	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
11	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
12	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D

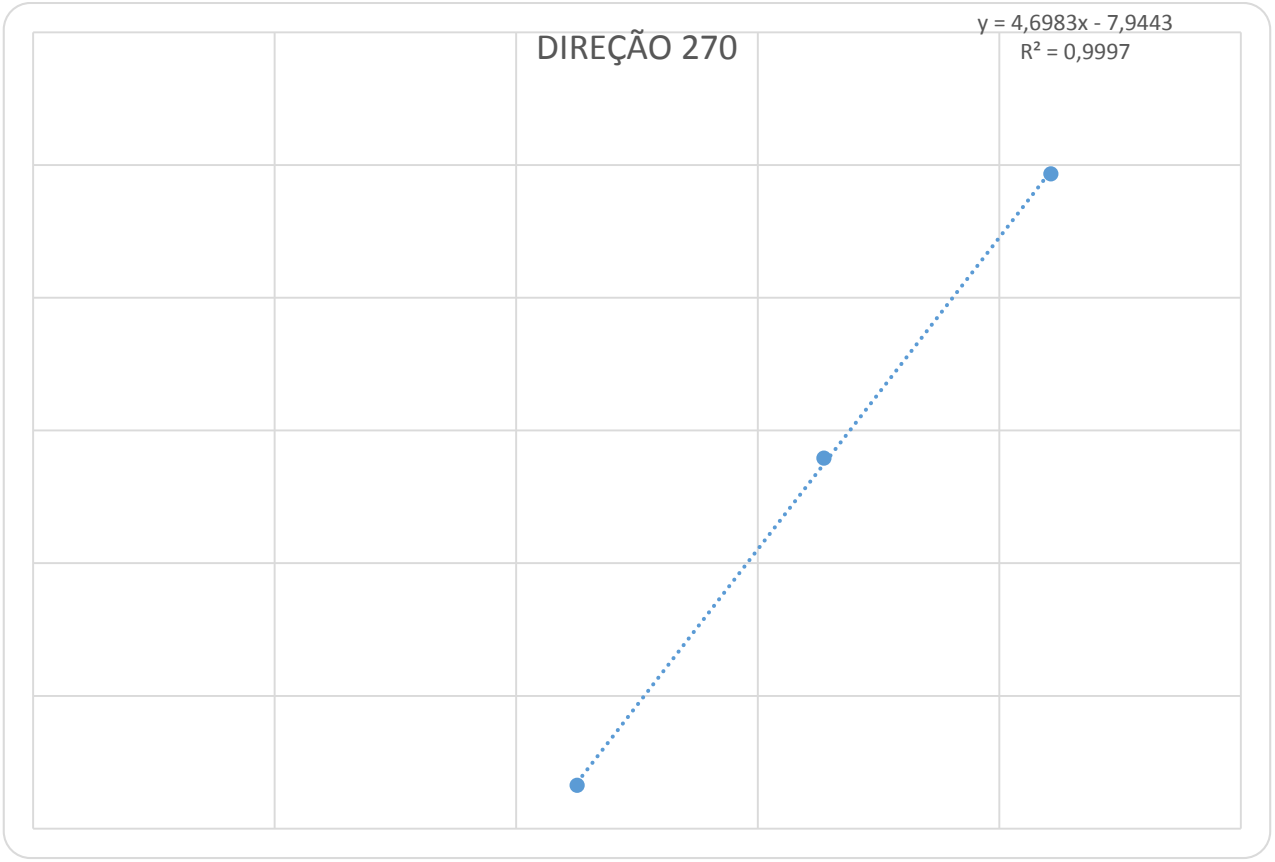


Parâmetros de Weibull

c 225 vento	4,71	m/s
k 225 vento	1,97	

Direção 270

Forças (Beaufort)	valor do intervalo (m/s)	Frequência relativa de ocorrência da forca (%)	Frequência acumulada	x	y
1	Não ocorreu	0,00	0,00	#N/D	#N/D
2	3,08	6,67	0,07	1,13	-2,67
3	5,14	48,89	0,56	1,64	-0,21
4	8,22	44,44	1,00	2,11	1,93
5	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
6	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
7	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
8	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
9	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
10	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
11	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D
12	Não ocorreu	0,00	1,00	#N/D	#N/D

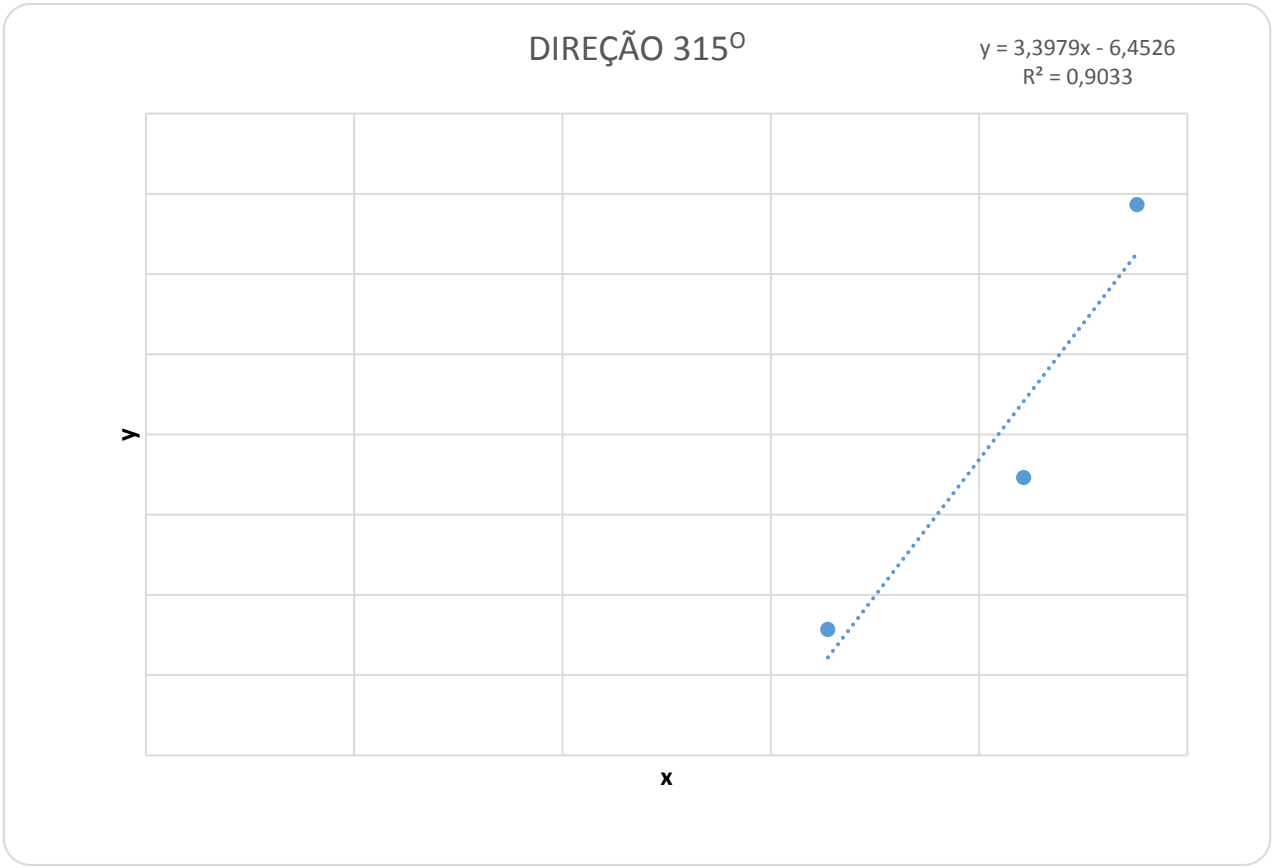


Parâmetros de Weibull

c 270 vento	5,42	m/s
k 270 vento	4,70	

Direção 315

Forças (Beaufort)	valor do intervalo (m/s)	Frequência relativa de ocorrência da forca (%)	Frequência acumulada	x	y
1	Não ocorreu	0,000	0,000	#N/D	#N/D
2	Não ocorreu	0,000	0,000	#N/D	#N/D
3	5,14	38,673	0,387	1,64	-0,72
4	8,22	32,952	0,716	2,11	0,23
5	10,79	28,375	0,999	2,38	1,93
6	Não ocorreu	0,000	0,999	#N/D	#N/D
7	Não ocorreu	0,000	0,999	#N/D	#N/D
8	Não ocorreu	0,000	0,999	#N/D	#N/D
9	Não ocorreu	0,000	0,999	#N/D	#N/D
10	Não ocorreu	0,000	0,999	#N/D	#N/D
11	Não ocorreu	0,000	0,999	#N/D	#N/D
12	Não ocorreu	0,000	0,999	#N/D	#N/D

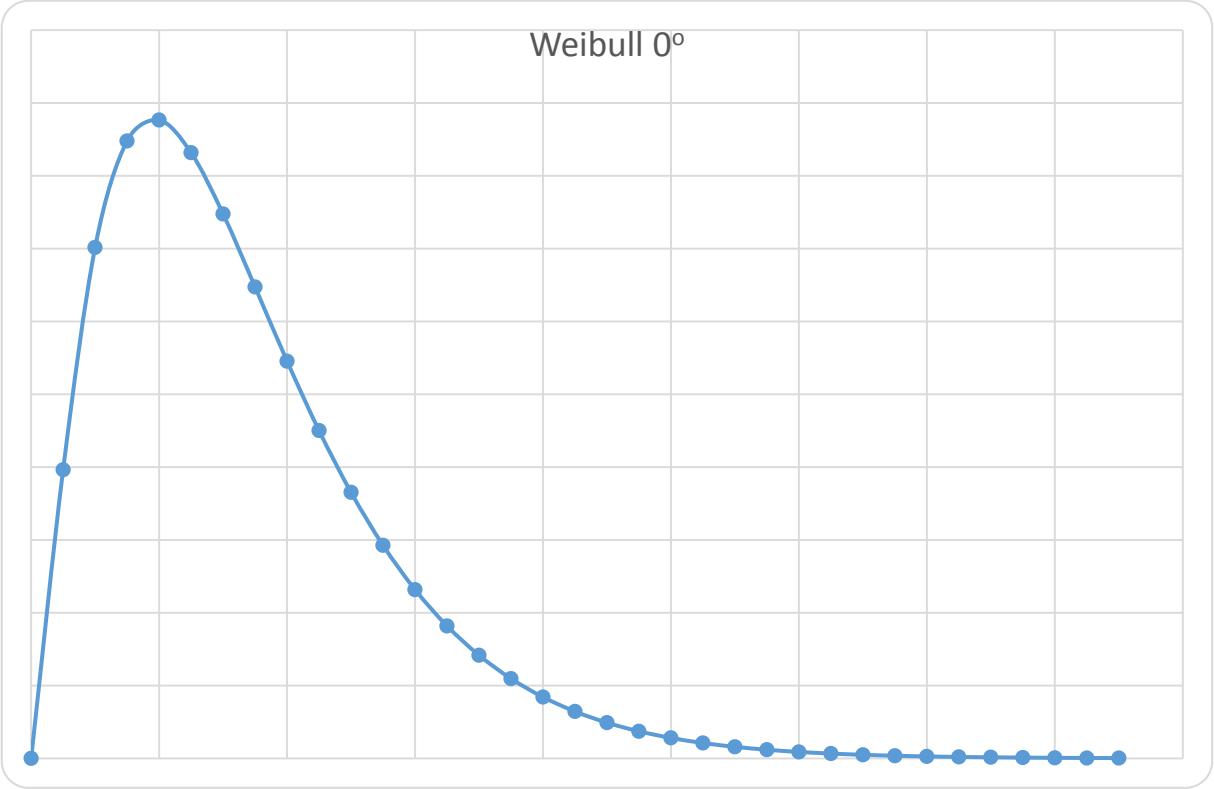


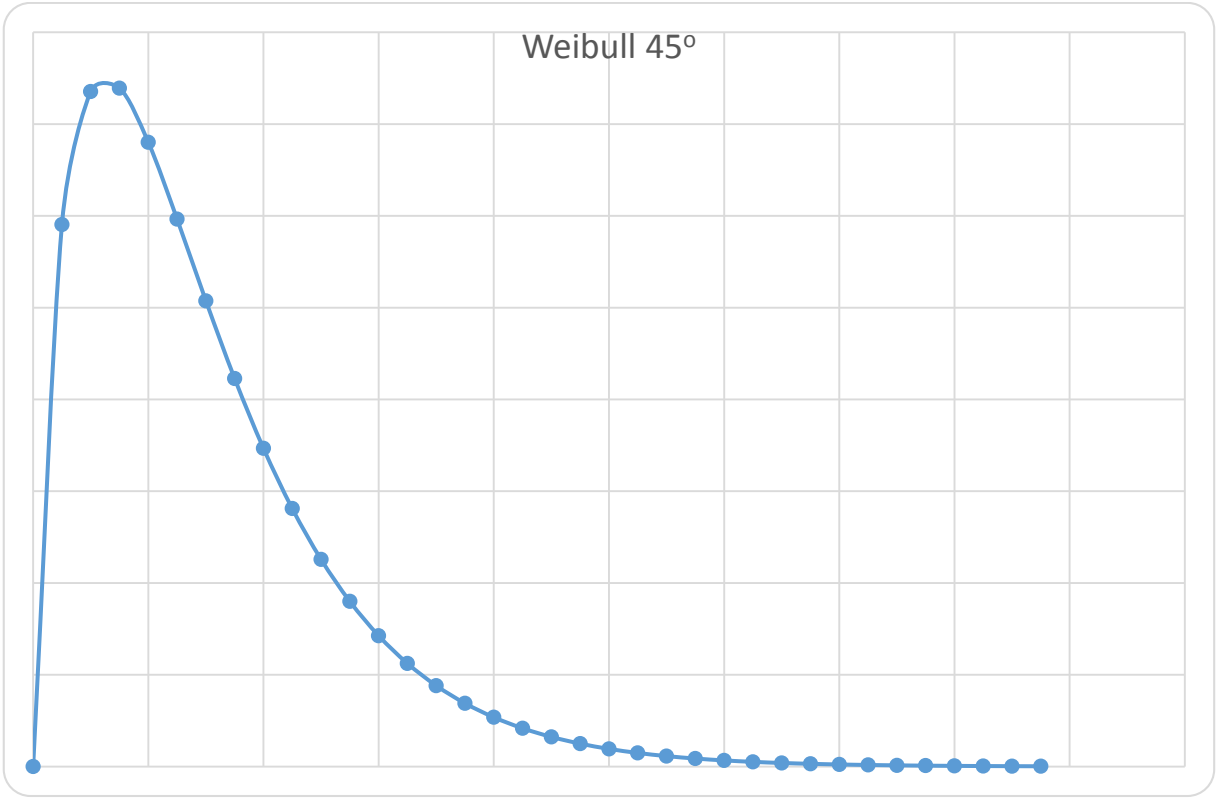
Parâmetros de Weibull

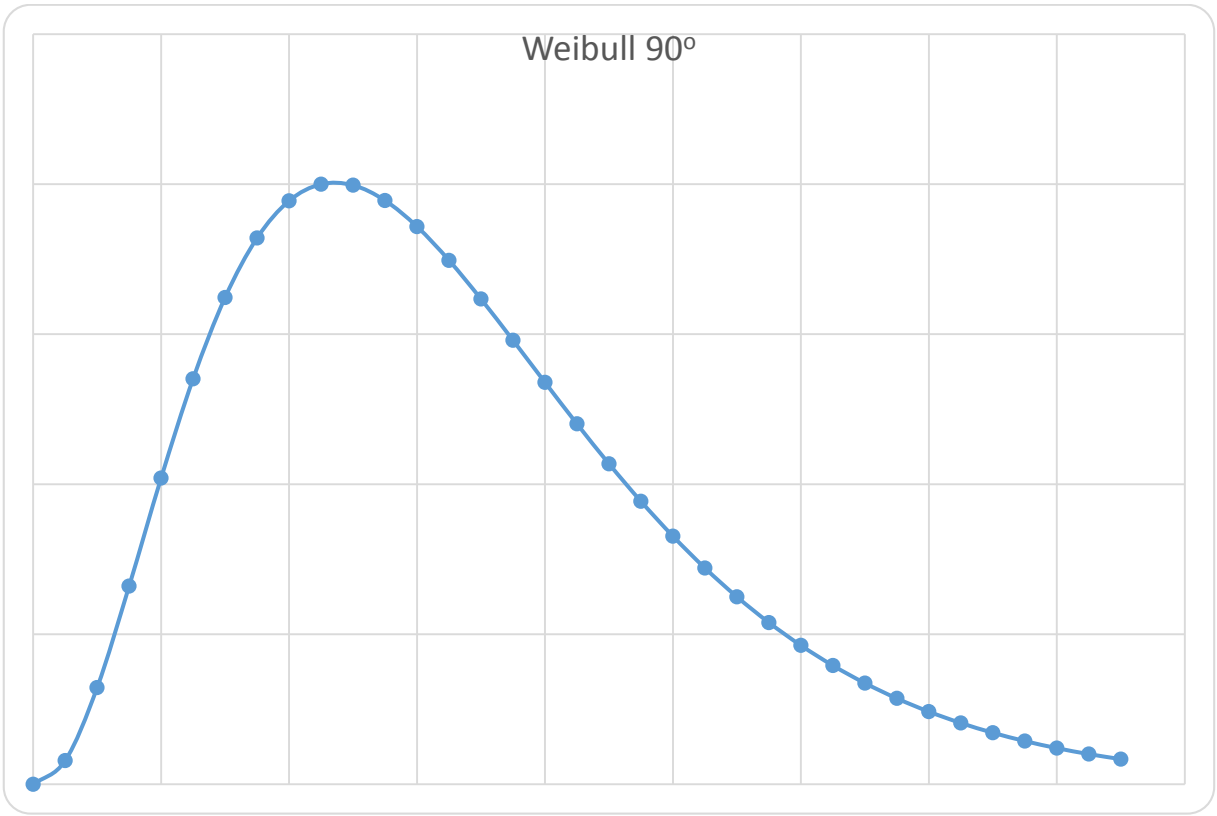
c 315 vento	6,68	m/s

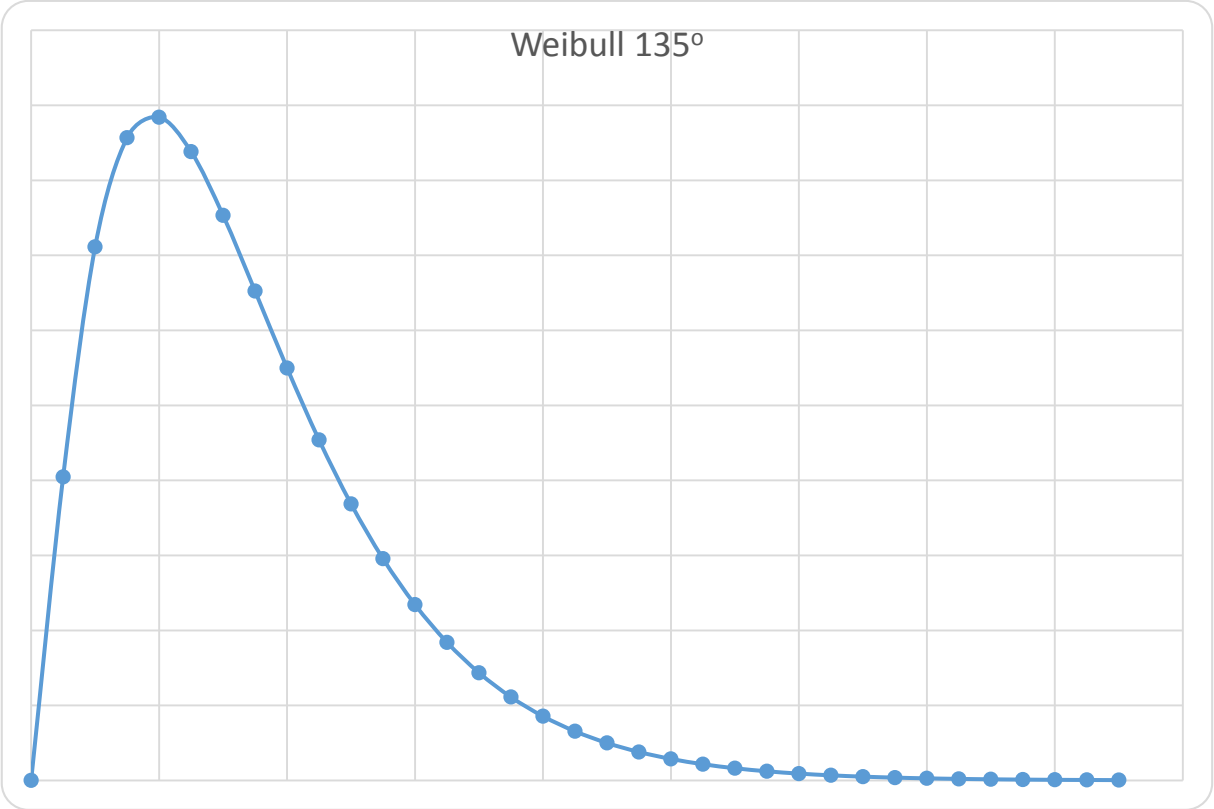
k 315 vento	3,40

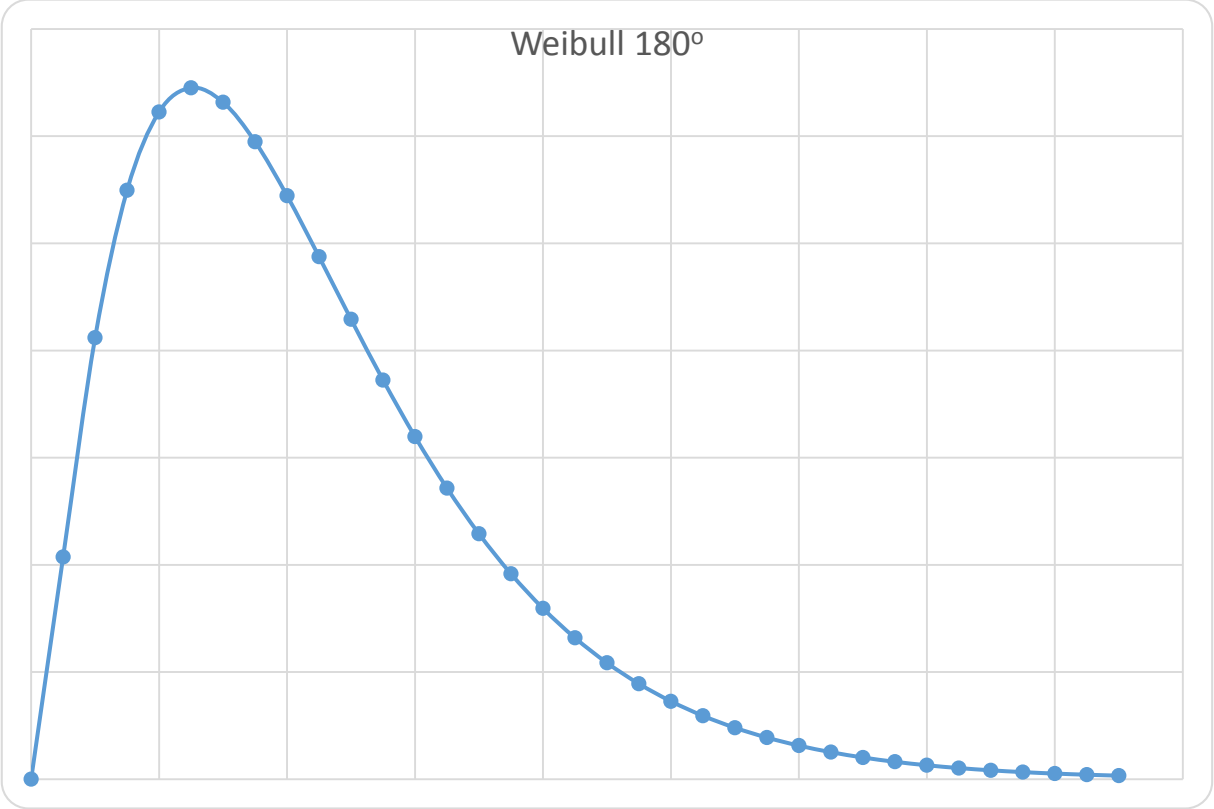
15. Anexo D- Distribuição de Weibull para todas as direções de incidência do vento.

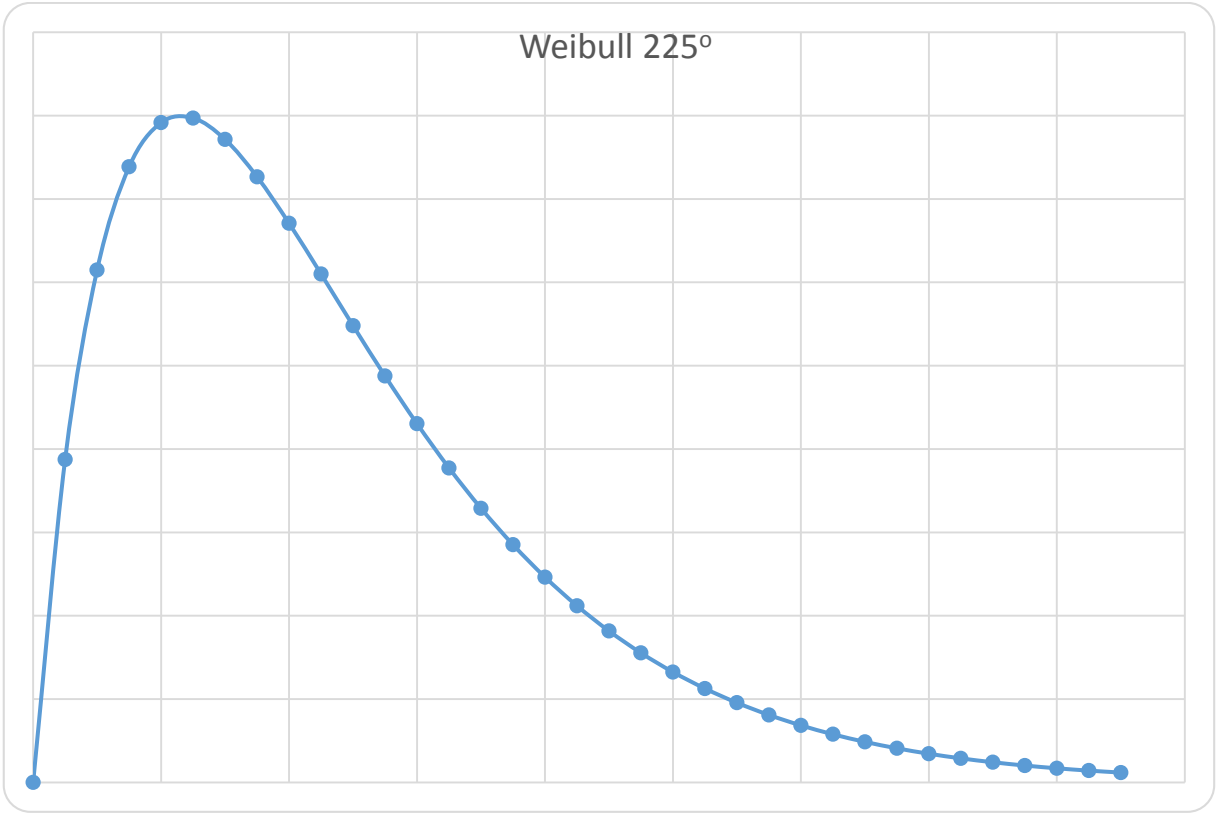


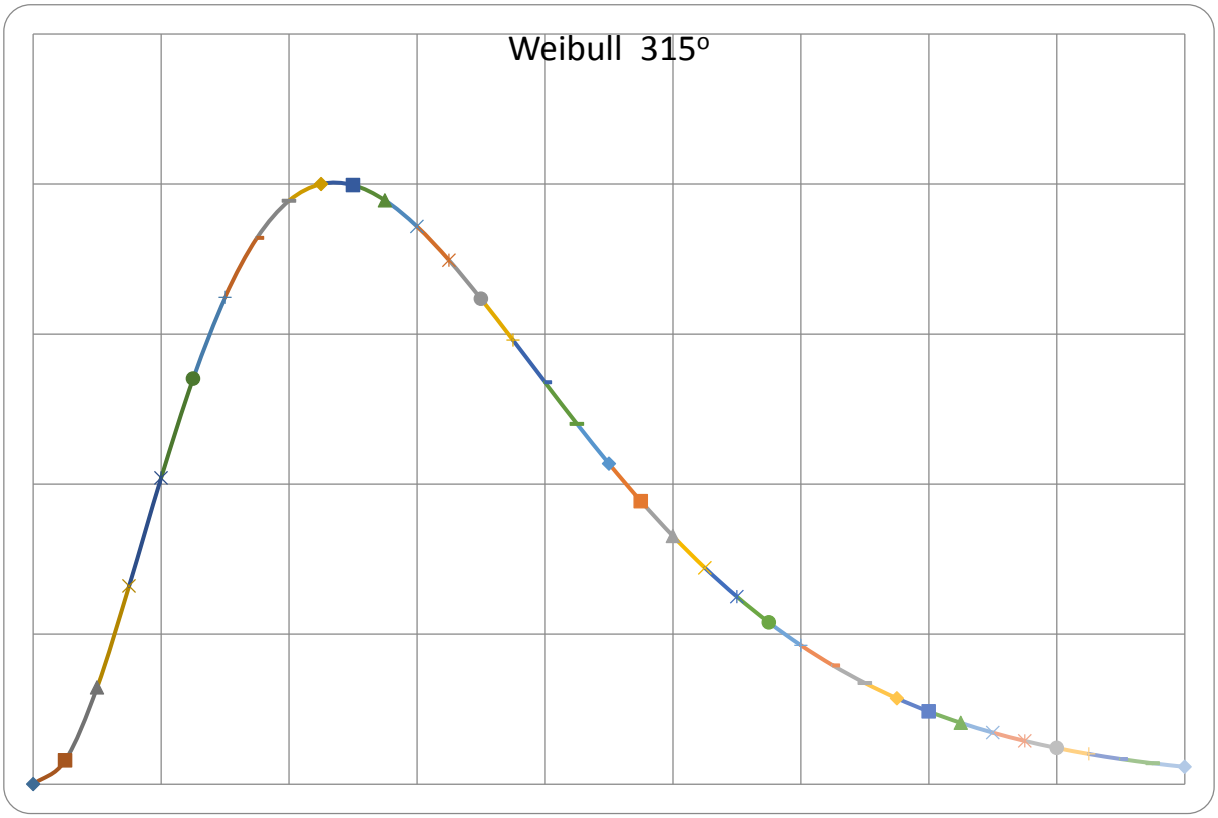

Weibull 45º


Weibull 90º


Weibull 135º


Weibull 180º


Weibull 225º


Weibull 315º