



ANÁLISE DO RISCO DE NAVEGAÇÃO AO LONGO DE UM CANAL DE ENTRADA A PARTIR DE SIMULAÇÕES PROBABILÍSTICAS

Autor: CC Marcos Antonio de Souza Silva¹

Co-autores: Susana Beatriz Vinzon²

Jean David Job Emmanuel Marie Caprace³

Josefa Varela Guerra⁴

RESUMO

Simulador de navegação é um sistema que reproduz em terra, sob determinadas condições pré-definidas, as atividades executadas a bordo de um navio. Algumas teorias são descritas na literatura para aplicação de simuladores na avaliação da segurança em canais de navegação. Este trabalho teve como objetivo desenvolver um método probabilístico para análise de segurança da navegação ao longo de um canal, utilizando simulador no modo *fast-time*, combinando dados de vento e corrente. Ao todo, 399 simulações foram realizadas no Centro de

Análise de Sistemas Navais (CASNAV), utilizando o canal de acesso ao terminal da Ilha Guaíba, no Rio de Janeiro. Após análise, as seções 96, 101 e 128 do canal apresentaram riscos relevantes, sobretudo nas combinações de dados ambientais de categorias severa e moderada. A metodologia utilizada demonstrou ser eficiente na análise de segurança da navegação de canais de entrada em simuladores no modo *fast-time*.

Palavras-chave:

Simulador de Navegação; Análise de Risco; Segurança da Navegação.

¹Assessor Técnico para Assuntos de Auxílios à Navegação. Graduado em Ciências Navais pela Escola Naval. Aperfeiçoado no Curso de Hidrografia para Oficiais (CAHO). Mestre pelo Programa de Engenharia Naval e Oceânica (PENO) do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (PENO), UFRJ.

²Professora Titular do Laboratório de Dinâmica e Sedimentos Coesivos (LDSC) da UFRJ. Mestre e Doutora em Engenharia Oceânica pela UFRJ. Doutorado em *Coastal and Oceanographic Engineering* pela Universidade da Flórida (UF), Estados Unidos. Pós-Doutora pela *Technincal University of Delft* (TUDELFT), Holanda.

³Coordenador do programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica (PenO). Especialista em Construção Naval pela Universidade de Liège (ULG) na Bélgica. Mestre em Engenharia Industrial pelo *Institut Supérieur Industriel de Bruxelles* (ISIB) na Bélgica. Doutor em Ciências Aplicadas Universidade de Liège (ULG) na Bélgica. Pós-Doutor pela Univeridade de Liège (ULG), na Bélgica.

⁴Professora Adjunta da UERJ. Graduada em Oceanologia, FURG. Mestre em Geografia, UFRJ. Doutora em Oceanografia pela *University of Washington*, nos Estados Unidos. Pós-Doutora pela UFF.



ABSTRACT

A navigation simulator is a system that reproduces on shore, under certain predefined conditions, the activities performed on board of a ship. Some theories are described in literature for application of simulators to assess safety in navigation channels. This work aims to develop a probabilistic method to analyze navigation safety along a channel, by using a simulator set at the *fast-time* mode, combining wind and current data. In total, 399 simulations were performed at the Brazilian Navy Systems Analysis Center (CASNAV), by using the access channel to the Guaíba Island Terminal in Rio de Janeiro. After the analysis, channel sections 96, 101 and 128 presented relevant risks, especially under the combination of environmental data of severe and moderate categories. The methodology used proved to be efficient in the safety analysis of navigation of entrance channels when using simulators in the *fast-time* mode.

Keywords:

Navigation Simulator; Risk Analysis; Navigation Safety.

1. INTRODUÇÃO

A simulação é definida como o ato de imitar um procedimento real em menor tempo e com menor custo, permitindo um estudo detalhado de acontecimentos passados, presentes e futuros (Bragança, 2017). O simulador de navegação é um dispositivo, programa de computador ou sistema que efetua a simulação, capaz de reproduzir, em terra e em condições controladas, algumas das atividades executadas a bordo (Ferreira, 2017). Pode ser utilizado para treinamento de manobras e para análise da segurança de um canal de navegação, em que um número determinado de simulações é realizado

para diferentes condições meteorológicas (Gucma *et al.*, 2018).

Há dois tipos de modelos de simulação de manobras do navio: simulação em tempo real e simulação em tempo rápido (*fast-time*) (PIANC, 2014). Os simuladores em tempo real são definidos como aqueles em que os instrumentos de manobra do navio são comandados por seres humanos, com o evento simulado tendo a mesma duração no mundo real. Já os simuladores tipo *fast-time* utilizam modelos de controle automático do navio e são executados em escala acelerada (PIANC, 2014; Lataire *et al.*, 2018).

As simulações do tipo *fast-time* apresentam como vantagens a possibilidade de obtenção de resultados rápidos iniciais de viabilidade, estudo de múltiplos cenários, possibilidade de análise das distribuições do trajeto do navio em curto espaço de tempo, facilidade de implementação na alteração de cenários e boa relação custo-benefício (IALA, 2011).

Entre os estudos que abordam o uso de simuladores para a análise do risco de navegação em canais de entrada, destacam-se os realizados por Gucoma (2000), Briggs *et al.* (2003), Quy *et al.* (2008), Gomes (2015), Gucoma *et al.* (2018) e Xu *et al.* (2019).

O estudo de Gucoma (2000) aplicou um método probabilístico de avaliação do risco de navegação para qualquer via navegável, utilizando uma função de distribuição de probabilidades do navio ultrapassar a margem de segurança do canal. Foi evidenciado que este método pode ser aplicado em situações práticas de engenharia, pois informa onde o nível de risco é excedido e que a probabilidade de exceder o risco admissível pode ser calculada a partir da distância do navio ao centro do canal de entrada, da frequência de ocorrência das condições ambientais nas simulações e do tráfego anual esperado para o navio.

Briggs *et al.* (2003) realizaram simulação em modelo de escala reduzida do canal de acesso ao Porto de Barbers Point,



no Havaí, Estados Unidos. Na simulação, foi considerada a combinação de dados ambientais de vento, onda e corrente. Esses dados foram classificados em categorias, as quais variavam de acordo com a intensidade. As probabilidades conjuntas dessas categorias foram calculadas e estimadas por meio de uma resolução de equação linear. As categorias ambientais foram combinadas entre si e aplicadas durante os testes de simulação. A análise de probabilidades foi realizada a partir da avaliação da trajetória do navio para cada uma das condições ambientais. A análise dos dados mostrou que a profundidade e a largura do canal, embora adequadas para o tráfego de navios naquele momento, comprometia a segurança para navios de maior porte, do tipo porta-contêiner C9.

Quy *et al.* (2008) analisaram os riscos de navegação ao longo do canal de entrada do porto de Cam Pha, no Vietnã, para o navio tipo *bulk carrier*. Para isso, utilizaram um modelo de simulação programado em Matlab, que calculava a cada trecho o movimento vertical do navio provocado pelas ondas e pelo *squat*. Com base no resultado das simulações, concluíram que a velocidade ideal do navio deveria ser de 7,5 nós com o canal configurado na profundidade de 12 m, considerando o tráfego anual de navios no porto maior que 10.

Gomes (2015) utilizou simulador de manobras no modo *fast-time* para comparar as atuações dos navegantes representados por tempos de retardos diferentes na ação de controle. Foram utilizadas duas embarcações do tipo porta-contêiner, sendo a embarcação "A" de 210,54 m de comprimento, 29,88 m de largura e capacidade máxima de 2.478 TEU; e a embarcação "B" de 228,08 m de comprimento, 37 m de largura e capacidade máxima de 3.800 TEU. A partir da combinação de valores de vento e corrente foram realizadas várias simulações.

Esse estudo concluiu que a probabilidade da embarcação "B" exceder o canal era maior do que a da embarcação "A", e esta probabilidade aumentaria conforme era aumentado o tempo de retardo setado no controle de máquinas e leme do navio.

Gucma *et al.* (2018) realizaram uma nova simulação, dessa vez, para análise da segurança do canal de entrada ao porto de Ystad, visando acomodar navios de até 240 m de comprimento. As simulações das manobras do navio foram realizadas em tempo real, sob diferentes condições ambientais e por navegantes experientes. Os resultados mostraram que a largura do canal de entrada deveria aumentar para 150 m ao longo de 500 m antes da entrada do porto, e 130 m no restante do canal, a fim de permitir a navegação com segurança para navios de 230 m de comprimento.

Xu *et al.* (2019) avaliaram a segurança da navegação no porto de Macun, localizado na cidade de Haikou, China, usando um simulador. O navio utilizado durante as simulações foi um porta-contêiner de 50.000 DWT. Os dados ambientais considerados foram: os ventos típicos da região de direções NE, E, SE e W; forças Beaufort de 6, 7 e 8; e corrente em direções de E e W. Após análise dos resultados, verificaram que a navegação do navio nas simulações foi segura nas seguintes condições: limitação da velocidade em 10 nós; redução da velocidade para entre 3 e 5 nós nas seções M1 e M2 do canal; vento máximo de 7 de força Beaufort; proibição de navegação de outros navios simultaneamente no canal; e não restrição de navegação em condições de restrições de visibilidade ou à noite.

Embora esses estudos tenham fornecido dados relevantes sobre aspectos relacionados à segurança de navegação envolvendo os canais de entrada de portos, eles não consideraram em suas análises um estudo estatístico que combinasse dados ambientais de



vento e corrente, a utilização de simuladores do tipo *fast-time* (que podem reduzir o tempo de cálculo e simular vários cenários) e cálculo da probabilidade de risco por seções ao longo do canal. Este cálculo pode permitir a verificação dos trechos críticos em função dos dados ambientais, apontar possíveis restrições de manobra ou necessidades de modernização de trechos do canal.

Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi desenvolver um método probabilístico para análise da segurança da navegação ao longo de um canal de entrada utilizando simulador no modo *fast-time*, combinando dados de vento e corrente.

2. MÉTODO

Para a construção do método probabilístico, envolvendo os riscos de navegação ao longo do canal de entrada de determinado porto, foram realizadas as seguintes etapas: combinação de referenciais teóricos de simulação de navegação em canais de entrada, escolha do cenário para as simulações, contato com o simulador e aprendizado sobre a linguagem de programação que este utiliza, seleção do navio a ser utilizado, análise e combinação dos dados ambientais para aplicação no simulador, realização das simulações e o processo de análise dos dados obtidos.

2.1 Referenciais Teóricos

Os referenciais teóricos aplicados no presente estudo foram os apresentados por Briggs *et al.* (2003), Gucma (2000) e Gucma *et al.* (2018). Para a análise dos dados ambientais e posterior construção da combinação dos cenários, foi utilizado o método desenvolvido por Briggs *et al.* (2003). Os estudos de Gucma (2000) e Gucma *et al.* (2018) foram empregados para a aplicação desses dados no simulador de navegação, visando obter a probabilidade de segurança ao longo das seções do canal de entrada.

2.2 Cenário

O cenário utilizado nas simulações foi o canal de entrada do Terminal da Ilha Guaíba (TIG), localizado a oeste da Baía de Sepetiba, no município de Mangaratiba (RJ). Inaugurado em 1973, o Terminal é composto por estrutura de concreto com 395 metros de comprimento e 21 metros de largura (Figura 1). É um Terminal de Uso Privado (TUP) administrado pela mineradora VALE, utilizado para a exportação de granéis sólidos (minério de ferro) explorados em Minas Gerais. O canal de acesso ao terminal situa-se nas proximidades de Ilha Grande, Ilha de Sepetiba e Ilha Guaíba. (Figura 2).





Figura 1 – Berços do Terminal da Ilha Guaíba. (Fonte: VALE, 2019)



Figura 2 – Extrato da Carta Náutica 1607 demonstrando o canal de entrada ao Terminal de Uso Privado (TUP) da Ilha Guaíba, o qual é delimitado, na imagem, com um círculo na cor vermelha. (Fonte: Diretoria de Hidrografia e Navegação, 2019)



2.3 O Simulador

O Simulador utilizado neste estudo pertence ao Centro de Análise de Sistemas Navais (CASNAV) e foi desenvolvido para o treinamento dos futuros Oficiais da Marinha Mercante no Centro de Instrução Almirante Graça Aranha (CIAGA). Este simulador é do tipo *full mission* (Classe A), ou seja, ele é capaz de simular uma operação completa da situação operacional do passadiço para manobras avançadas em águas restritas.

na implementação, em *software*, de uma série de equações diferenciais que modelam a resposta hidrodinâmica do navio, interagindo com fatores ambientais, ordens de leme, propulsão e forças externas induzidas pela amarra, cabos de reboque e espias, por exemplo.

O sistema é composto por módulos que trocam informações entre si, intermediadas por um Servidor de Rede (*Network Server*), que integra as funcionalidades do Simulador. O modelo hidrodinâmico calcula as acelerações, velocidades e a posição do navio.



Figura 3 – Treinamento com alunos do CIAGA simulando a navegação no canal de entrada do Rio de Janeiro, utilizando o simulador desenvolvido pelo CASNAV. Fonte: CASNAV.

O Simulador passou por recentes modernizações, apresentando o movimento do navio em seis graus de liberdade, proporcionando maior confiabilidade nos resultados. Apresenta visão panorâmica externa, radar, ecobatímetro, anemômetro, carta náutica e GPS, além de comandos de propulsão e ângulo de leme, assim como seus indicadores (Figura 3). Tais características proporcionam uma experiência mais realista ao treinamento.

Em relação ao seu modelo matemático, ou modelo hidrodinâmico, este é baseado

Essas informações são repassadas aos instrumentos (leme, propulsão, piloto automático e alarmes), aos equipamentos de passadiço pela porta serial (GPS, AIS, ECDIS, GMDSS) e para visualização por peloros ou binóculos. O console do instrutor (módulo ICS) recebe e exibe os dados de navegação do navio na carta náutica, além de poder estabelecer as condições de ondas, vento e corrente. Os módulos que compõem esse sistema e o fluxo de informações são demonstrados na Figura 4.

As trocas de informações entre os módulos do Simulador ocorrem por meio de

protocolo de rede. A linguagem de programação utilizada é C, e o ambiente visual empregado é o Unit 3D.

O controle do navio no simulador é empregado por meio do leme e ordens de máquina de propulsão. Há um piloto automático, que mantém o navio em um rumo predeterminado, e é baseado no controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo). Este controlador é formado por uma equação com 3 componentes: um proporcional, um integral e um derivativo, que compõem um sistema de *loop* fechado. Este sistema

visa alterar o rumo atual do navio (ψ) para o rumo demandado pelo navegante (ψ_d). A partir da diferença entre esses rumos, o piloto automático calcula o ângulo de leme necessário para a manobra (δ_c), encaminhando um sinal para a máquina do leme, que então atua sobre o navio (δ) e o faz girar na direção do novo rumo desejado (alterando para um novo ψ). Nesse processo, as ondas, os ventos e as correntes influenciam na manobra, e o sistema atua até que o navio alcance o rumo desejado conforme descrito na Figura 5 (Fossen *et al.*, 1994).

DIAGRAMA DE BLOCOS DO SIMPASS

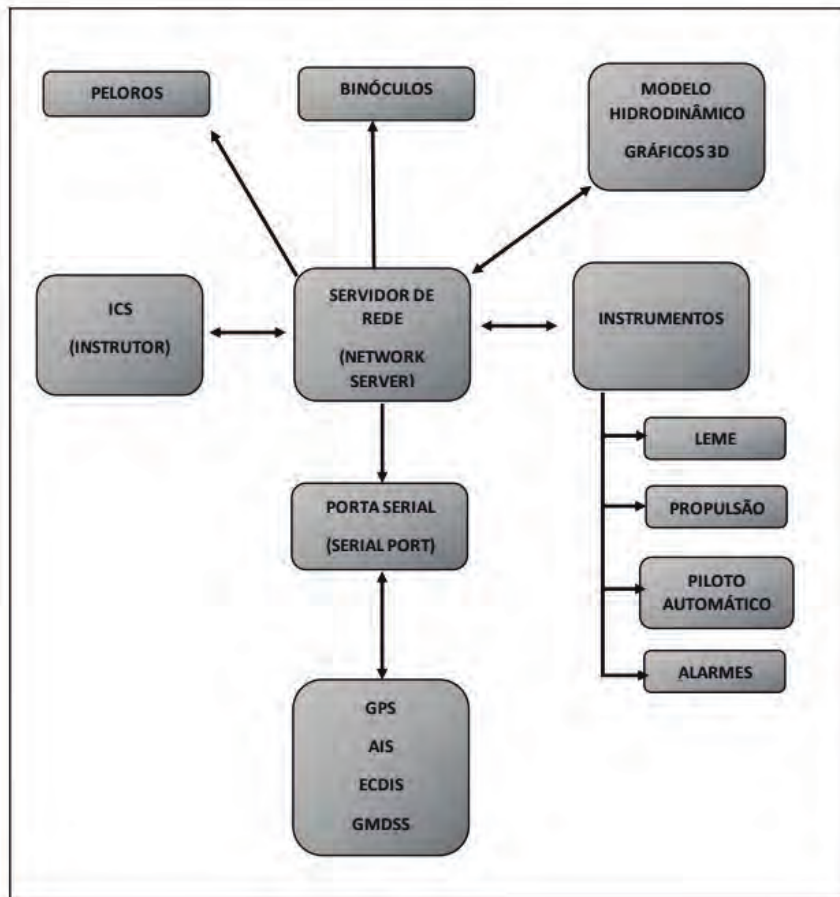


Figura 4 – Diagrama de blocos com os módulos do Simulador de Navegação e o fluxo de informações. (Fonte: CASNAV, 2019)

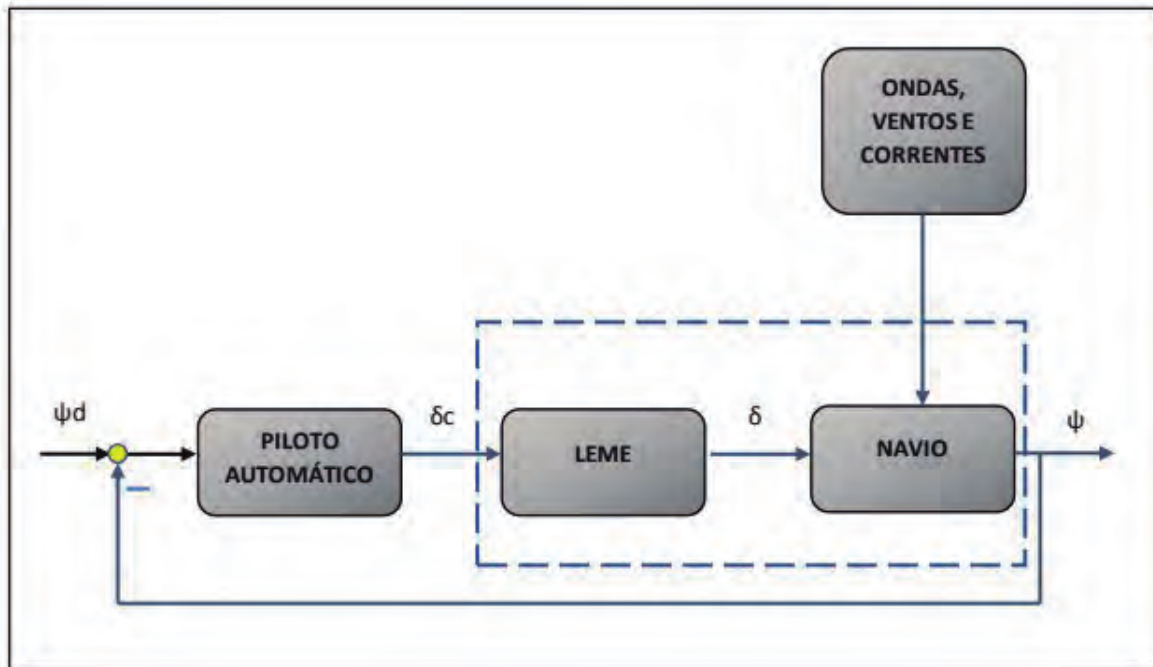


Figura 5 – Representação do sistema de loop fechado do simulador, composto por piloto automático, máquina do leme e navio. Note-se que há a influência de ondas, ventos e corrente no navio. Fonte: Fossen et al. (1994).

2.4 Dados Ambientais

Os dados ambientais utilizados para as simulações deste estudo foram os de correntes e ventos localizados em pontos próximos do canal de entrada da Baía de Sepetiba, correspondentes ao ano de 2009.

Os dados de intensidade e direção da corrente foram obtidos do modelo hidrodinâmico da Baía, utilizando o programa Delft3D. Esses dados referiam-se ao ponto intermediário do canal de entrada, na Latitude 23,0722° S e Longitude 44,0839° W.

Foram selecionados os dados de corrente obtidos em intervalos de 3 em 3 horas, nos horários de 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 e 21 horas de cada dia do referido ano (2009), que permitiram, então, o cálculo da distribuição da intensidade e direção da corrente,

utilizando o programa Matlab, conforme representado na Tabela 1.

As informações de vento foram obtidas no banco de dados da agência americana *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), em intervalos de 6 em 6 horas, considerando o ponto mais próximo da entrada do canal na Latitude 23,261° e Longitude 43,77° W.

Para que os registros de ventos fossem obtidos na frequência de 3 em 3 horas, de forma a coincidir com os dados de corrente, estes foram interpolados em intensidade e direção. A partir desses registros, foi realizado o cálculo da distribuição da intensidade e direção do vento, utilizando o programa Matlab, conforme consta na Tabela 2.

Os maiores valores de cada categoria de intensidade de corrente e vento foram



Tabela 1 – Distribuição da frequência conjunta (%) de intensidade (m/s) e direção média (graus) da corrente.

Distribuição de frequências das Intensidades e Direções de Corrente (%)								
Direção Média (graus)	Intensidades (m/s)							TOTAL (%)
	(0, 0,1)	[0,1, 0,2)	[0,2, 0,3)	[0,3, 0,4)	[0,4, 0,5)	[0,5, 0,6)	[0,6, Inf)	
0	6,19	8,93	5,81	0,98	0,06	0,00	0,00	21,97
45	3,79	1,75	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	5,63
90	3,67	2,19	0,70	0,27	0,18	0,01	0,00	7,03
135	6,67	8,33	3,03	0,71	0,31	0,08	0,00	19,14
180	7,70	9,35	0,68	0,01	0,00	0,00	0,00	17,74
225	4,91	1,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,11
270	4,29	1,40	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	5,76
315	5,59	7,26	3,12	0,61	0,05	0,00	0,00	16,62
TOTAL	42,82	40,40	13,51	2,59	0,60	0,09	0,00	100,00
CLASSIFICAÇÃO	FRACO	FRACO	MODERADO	MODERADO	SEVERO	SEVERO	SEVERO	

Tabela 2 – Distribuição da frequência conjunta (%) de intensidade (m/s) e direção média (graus) do vento.

Distribuição de frequências das Intensidades e Direções de Vento (%)									
Direção Média (graus)	Intensidades (m/s)								TOTAL (%)
	(0, 2)	[2, 4)	[4, 6)	[6, 8)	[8, 10)	[10,12)	[12, 14)	[14, Inf)	
0	0,22	2,68	4,69	3,74	0,54	0,01	0,00	0,00	11,88
45	0,71	3,95	4,67	1,27	0,01	0,01	0,00	0,00	10,62
90	0,81	4,96	5,30	1,19	0,02	0,00	0,00	0,00	12,28
135	0,99	4,84	4,73	0,99	0,07	0,01	0,00	0,00	11,64
180	0,86	5,53	5,44	1,83	0,19	0,06	0,01	0,00	13,91
225	0,75	5,60	6,10	3,11	1,29	0,24	0,00	0,00	17,09
270	0,78	4,45	3,70	1,11	0,07	0,00	0,00	0,00	10,11
315	0,57	4,84	5,38	1,59	0,09	0,00	0,00	0,00	12,47
TOTAL	5,69	36,86	40,01	14,81	2,28	0,33	0,01	0,00	100
CLASSIFICAÇÃO	FRACO	FRACO	FRACO	MODERADO	MODERADO	SEVERO	SEVERO	SEVERO	

selecionados para sua posterior aplicação no Simulador. Os seguintes valores (m/s) de corrente foram considerados para as respectivas categorias: categoria severa (0,6), moderada (0,4) e fraca (0,2), conforme pode

ser visto na Tabela 3. Em relação aos dados de vento, foram considerados os seguintes valores (m/s) para as respectivas categorias: categoria severa (14), moderada (10) e fraca (6), conforme consta na Tabela 4.



Tabela 3 – Distribuição de frequências das intensidades máximas consideradas de acordo com a categoria e por direções de corrente. A combinação de direção e intensidade das correntes descartadas encontra-se com valor nulo, destacado na cor vermelha.

Distribuição de frequências das Intensidades máximas por categoria e Direções de Corrente				
Direção Média (graus)	Intensidades (m/s)			TOTAL (%)
	0,2	0,4	0,6	
0	15,12	6,80	0,06	21,97
45	5,54	0,09	0,00	5,63
90	5,86	0,97	0,19	7,03
135	15,01	3,74	0,39	19,14
180	17,05	0,69	0,00	17,74
225	6,11	0,00	0,00	6,11
270	5,69	0,07	0,00	5,76
315	12,84	3,73	0,05	16,62
TOTAL	83,22	16,09	0,69	100,00
CLASSIFICAÇÃO	FRACO	MODERADO	SEVERO	

Tabela 4 – Distribuição de frequências das intensidades máximas consideradas de acordo com a categoria e por direções de vento. A combinação de direção e intensidade das correntes descartadas encontra-se com valor nulo, destacado na cor vermelha.

Distribuição de frequências das Intensidades máximas por categoria e Direções de Vento				
Direção Média (graus)	Intensidades (m/s)			TOTAL (%)
	6	10	14	
0	7,60	4,27	0,01	11,88
45	9,33	1,28	0,01	10,62
90	11,07	1,21	0,00	12,28
135	10,57	1,06	0,01	11,64
180	11,82	2,02	0,07	13,91
225	12,45	4,40	0,24	17,09
270	8,93	1,18	0,00	10,11
315	10,79	1,68	0,00	12,47
TOTAL	82,56	17,10	0,34	100,00
CLASSIFICAÇÃO	FRACO	MODERADO	SEVERO	



Após a obtenção dos cenários de corrente e vento isoladamente, de acordo com intensidade e direção, foi realizada a combinação das categorias desses dados ambientais.

Essa combinação foi determinada pelo sistema linear de equações proposto por *Briggs et al.* (2003), aplicado para os dados ambientais de corrente e vento (Equação 1).

O sistema de equações lineares está representado a seguir:

$$\begin{aligned} P_{AA} + P_{AB} + P_{AC} &= P_{c1} \\ P_{BA} + P_{BB} + P_{BC} &= P_{c2} \\ P_{CA} + P_{CB} + P_{CC} &= P_{c3} \\ P_{AA} + P_{BA} + P_{CA} &= P_{v1} \\ P_{AB} + P_{BB} + P_{CB} &= P_{v2} \\ P_{AC} + P_{BC} + P_{CC} &= P_{v3} \\ P_{AA} + P_{AB} + P_{AC} + P_{BA} + P_{BB} + P_{BC} + P_{CA} + P_{CB} + P_{CC} &= 1 \end{aligned} \quad \text{(Equação 1)}$$

As probabilidades das combinações são representadas da seguinte forma:

- P_{AA} – Corrente Severa (A) com Vento Severo (A)
- P_{AB} – Corrente Severa (A) com Vento Moderado (B)
- P_{AC} – Corrente Severa (A) com Vento Fraco (C)
- P_{BA} – Corrente Moderada (B) com Vento Severo (A)
- P_{BB} – Corrente Moderada (B) com Vento Moderado (B)
- P_{BC} – Corrente Moderada (B) com Vento Fraco (C)
- P_{CA} – Corrente Fraca (C) com Vento Severo (A)
- P_{CB} – Corrente Fraca (C) com Vento Moderado (B)
- P_{CC} – Corrente Fraca (C) com Vento Fraco (C)



E as probabilidades obtidas pela análise dos dados ambientais são representados por:

P_{C1} - Probabilidade de ocorrência de Corrente Severa (C1)

P_{C2} - Probabilidade de ocorrência de Corrente Moderada (C2)

P_{C3} - Probabilidade de ocorrência de Corrente Fraca (C3)

P_{V1} - Probabilidade de ocorrência de Vento Severo (V1)

P_{V2} - Probabilidade de ocorrência de Vento Moderado (V2)

P_{V3} - Probabilidade de ocorrência de Vento Fraco (V3)

A partir dos dados das probabilidades conjuntas das categorias de corrente e vento obtidas com a metodologia utilizada por Briggs *et al.* (2003), foram determinadas 399 combinações de cenários (19 cenários de vento X 21 cenários de corrente), os quais foram utilizados nas simulações, como pode ser evidenciado na Tabela 5. Nessa tabela, os dados foram agrupados com base nas combinações das categorias. Assim, a

partir da quantidade de cenários estabelecidos para cada categoria de corrente e vento, e da respectiva probabilidade conjunta, foi calculada a probabilidade de o navio sair dos limites do canal de entrada em questão no estudo utilizando o Simulador. Essa probabilidade foi calculada considerando a teoria de *Bernoulli-Poisson*, conforme descrito no estudo de Guçma (2000) e Guçma *et al.* (2018).

Tabela 5 – Total de cenários obtidos a partir da combinação das categorias de corrente e vento, que compõem a amostra a ser aplicada nas simulações.

Categoria	Corrente		Vento		Quant. Combinações	Probabilidade
	Categoria	Quant. Cenários	Categoria	Quant. Cenários		
Severa	Severa	4	Severo	5	20	0,0013
	Severa	4	Moderado	8	32	0,0025
	Severa	4	Fraco	8	32	0,0032
Moderada	Moderada	7	Severo	5	35	0,0004
	Moderada	7	Moderado	8	56	0,1595
	Moderada	7	Fraco	8	56	0
Fraca	Fraca	8	Severo	5	40	0,0023
	Fraca	8	Moderado	8	64	0,0079
	Fraca	8	Fraco	8	64	0,8227
TOTAL: 399						

O fluxo realizado para a análise dos dados de vento e corrente deste estudo foi resumido, sendo representado no fluxograma abaixo (Figura 6).



Figura 6 – Fluxograma indicando as etapas realizadas para obtenção da combinação de cenários de corrente e vento, e as respectivas probabilidades a serem utilizadas no simulador.

A partir dos resultados obtidos por meio das análises dos dados ambientais com a obtenção dos diferentes cenários, foram iniciadas as simulações.

2.5 As Simulações

Para as simulações, foi utilizado o método empregado por Guçma (2000) e Guçma *et al.* (2018). No entanto, o simulador necessitou ser adaptado para realizar simulações no modo *fast-time*.

As simulações foram realizadas no período de janeiro a abril de 2018, com apoio do pessoal técnico do CASNAV. Os módulos necessários para a realização das simulações foram instalados em um *notebook* com os arquivos das combinações ambientais pronto para carregamento durante os testes. Para facilitar o registro da posição do navio

nas simulações, o canal de entrada para o Terminal da Ilha Guaíba foi dividido em 185 seções com uma distância de 100 metros entre si (seção 0 à 184).

O controle do navio foi implementado utilizando o piloto automático do Simulador, do tipo controlador PID. Neste tipo de controle, o rumo do navio é ordenado a reduzir a distância em relação ao centro do canal, com correções proporcionais ao afastamento do navio. Assim, conforme ocorre a redução dessa distância, o rumo determinado tende a se igualar ao rumo base do canal. As variações de rumo foram limitadas a 10° em relação ao rumo base.

O Navio utilizado foi o de carga geral, com calado de 5,04 m, comprimento de 150,42 m, boca de 26 m e com deslocamento de 14.359,28 toneladas (em lastro). O navio iniciava a navegação a uma distância de aproximadamente 1.000 metros do canal, nas



proximidades do ponto de espera do prático, e acelerava até atingir e manter 8 nós de velocidade. A distância perpendicular ao centro do canal era registrada durante a navegação conforme o navio passava pelas seções. Quando o navio chegava ao final da trajetória, ele retornava à posição inicial e uma nova simulação era iniciada com outra combinação de dados ambientais de vento e corrente.

As combinações de vento e corrente foram carregadas no módulo ICS (módulo do instrutor) por meio de um arquivo de dados com posição de carregamento (latitude e longitude), direção e velocidade em nós. Ao iniciar a simulação, um desses arquivos era inserido na plataforma do ICS e, então, os dados de corrente e vento eram carregados ao longo do canal e o navio iniciava a navegação. Ao final da simulação, os registros da distância do navio ao centro do canal eram salvos por seção, e uma nova simulação era iniciada com o próximo arquivo de dados ambientais de corrente e vento.

A partir desses registros, foi estimada a função de distribuição normal de probabilidade da posição do navio (Equação 2) para cada combinação de condição ambiental.

A análise probabilística da segurança foi realizada utilizando a Equação 3 (Teoria de *Bernoulli-Poisson*) para calcular a probabilidade de ocorrência de um ou mais acidentes ao longo da vida útil do canal (Equação 4). Essa equação considera o número de passagens do navio em determinada condição ambiental (multiplicação do número de passagens total pela probabilidade conjunta da condição ambiental) e a probabilidade de exceder os limites do canal, ao navegar em determinada condição ambiental. A probabilidade de o navio exceder esses limites foi representada pela área em amarelo sob a distribuição normal da posição do navio conforme a Figura 7.

A Figura 8 representa, em forma de diagrama de blocos, parte das etapas realizadas no estudo para que as simulações

forneçassem os dados necessários para a análise probabilística da segurança da navegação no canal

$$X : N(m, \sigma) \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

X – Variável aleatória da distância do navio ao centro do canal em determinada seção.

m – Média das distâncias do navio ao centro do canal em determinada seção.

σ – Desvio-padrão das distâncias do navio ao centro do canal em determinada seção.

$$P_n = \frac{(NP)^n e^{-NP}}{n!} \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo:

P_n – Probabilidade de n acidentes ocorrerem em N passagens.

P – Nível de risco em uma travessia individual.

N – Número de passagens por ano.

$$R = 1 - e^{-NP} \quad (\text{Equação 4})$$

Em que:

R – Probabilidade de ocorrência de 1 ou mais acidentes ao longo da vida útil do canal.

N – Número de passagens por ano.

P – Nível de risco em uma travessia individual.

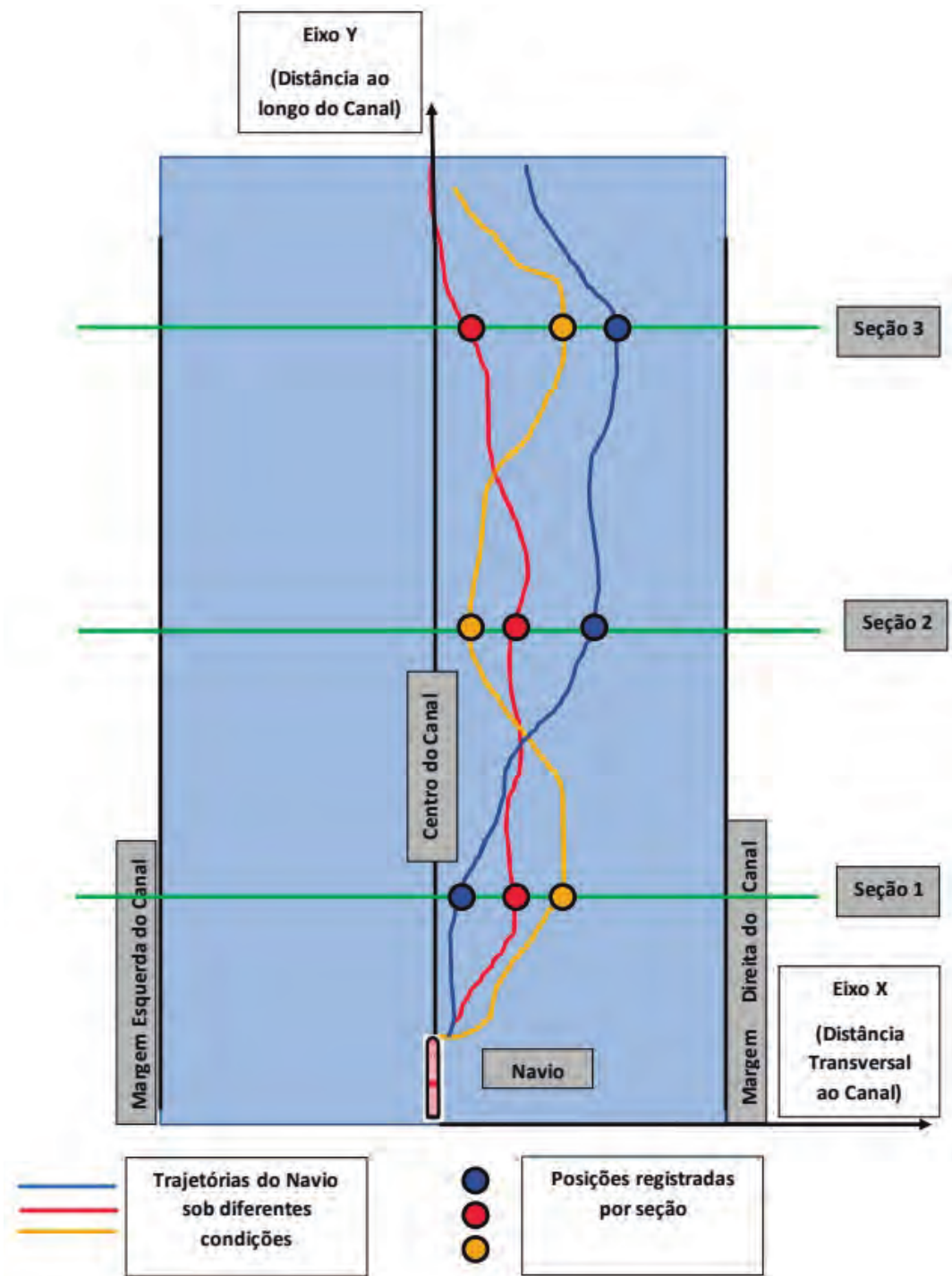


Figura 7 – Distribuição de Probabilidade da posição do navio ao longo das seções representada pela curva em vermelho. Os círculos nas cores azul, vermelho e laranja representam as posições do navio ao passar pelas seções. A área amarela abaixo da curva e fora dos limites do canal representa a probabilidade de o navio exceder o respectivo limite na seção. Fonte: Adaptado de Gucma (2000) e Gucma et al. (2018).

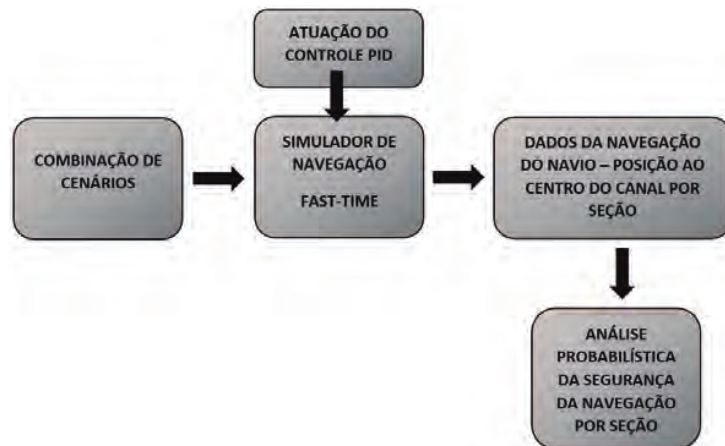


Figura 8 – Fluxograma indicando as etapas realizadas para obtenção da combinação de cenários de corrente e vento e as respectivas probabilidades a serem utilizadas no simulador.

Todas as etapas metodológicas percorridas durante a realização deste estudo estão esquematizadas na Figura 9, a seguir.

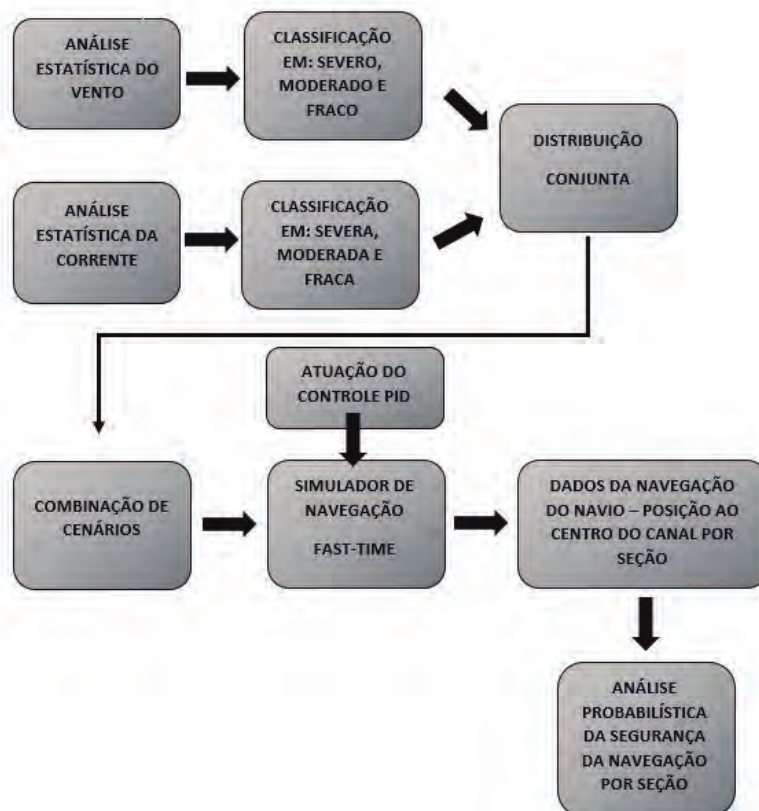


Figura 9 – Fluxograma contendo todas as etapas metodológicas percorridas no estudo visando à realização da análise probabilística da segurança da navegação.

3. RESULTADOS

As simulações geraram dados de deslocamento do navio ao longo do canal de entrada ao Terminal da Ilha Guaíba. Para a análise de cada cenário, foram gerados 3 gráficos no Programa Matlab: um representando a média do deslocamento horizontal do navio em relação ao centro do canal, que será referido como deslocamento do navio; um de desvio-padrão do deslocamento do navio; e um representando o risco de o navio ultrapassar os limites do canal. Nos gráficos referentes ao deslocamento do navio, foram incluídas as marcações do centro e dos limites laterais do canal, sendo que os valores negativos simbolizaram a margem lateral esquerda, e os positivos, a margem lateral direita do respectivo canal. Os valores

de desvio-padrão foram elaborados para a visualização da dispersão dos dados em cada parte do canal representada. As margens do canal não foram representadas no gráfico do desvio-padrão, pois sua inclusão prejudicaria a visualização da imagem. Em todos os gráficos, foram representadas as partes do canal conforme a Figura 10 (primeira parte reta, segunda parte curva e terceira parte reta), divididas por linhas verticais. Os gráficos descritos podem ser vistos para o cenário de combinação de Corrente severa com Vento severo nas Figuras 11, 12 e 13. Ao final, foi realizada comparação dos riscos, considerando como critério, para cada tipo de cenário, a condição de que a probabilidade de ocorrência de um acidente grave ao longo da vida útil do canal de entrada deve ser menor que 10% (Savenije,1996).

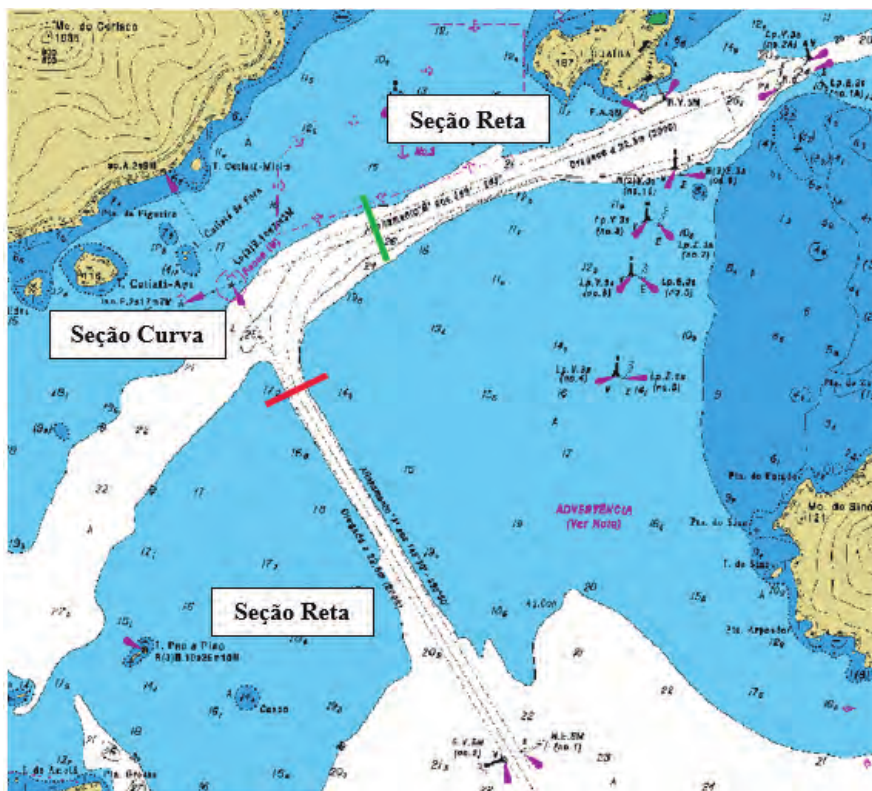


Figura 10 – Canal de entrada ao Terminal da Ilha Guaíba separado em três partes, compreendidas pela primeira parte reta da entrada até o início da curva no traço vermelho, pela segunda parte curva, compreendida entre o traço vermelho e verde, e a terceira parte reta do traço verde até o fim do canal.

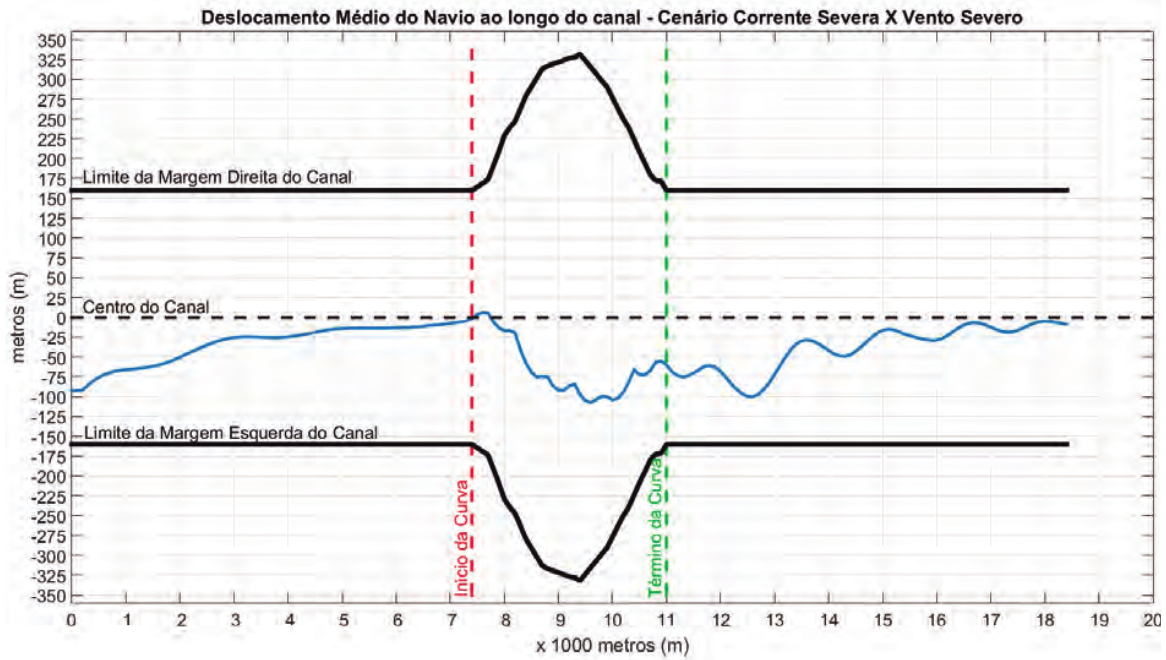


Figura 11 – Média do Deslocamento Horizontal do Navio ao longo do canal no cenário Corrente Severa X Vento Severo.

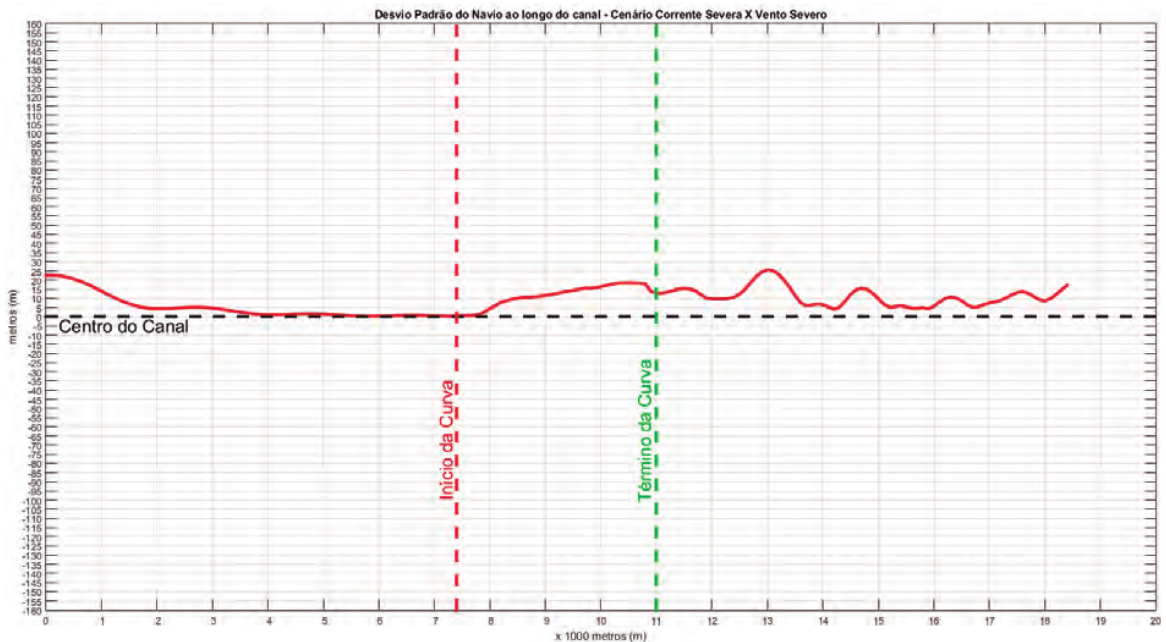


Figura 12 – Desvio-Padrão do Deslocamento Horizontal do Navio ao longo do canal no cenário Corrente Severa X Vento Severo.

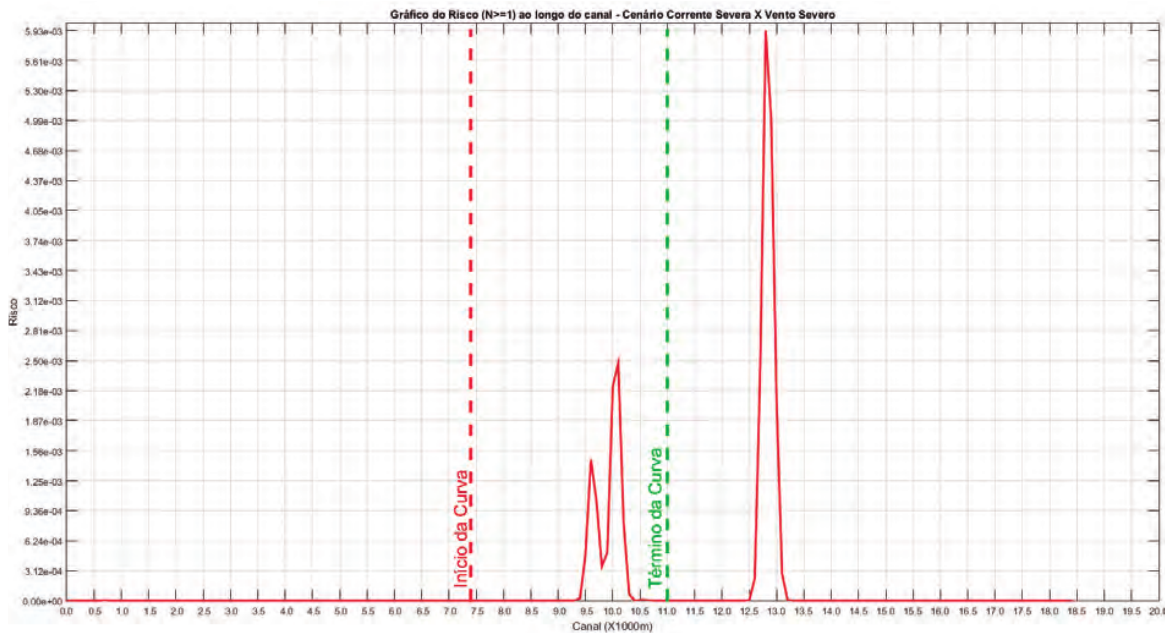


Figura 13 – Gráfico do Risco ao longo do canal no cenário Corrente Severa X Vento Severo.

Em termos comparativos, as curvas das médias e dos desvios-padrões dos deslocamentos resultantes da simulação do navio estão muito próximas entre os diferentes tipos de cenários. Isto se deve à pequena diferença entre os valores de corrente (valores de 0,6; 0,4 e 0,2 nós) e vento (valores de 6; 10 e 14 nós), em que sua pequena variabilidade impacta em menor proporção do desvio do deslocamento do navio. O maior impacto foi observado nas curvas de risco em que as frequências de cada condição ambiental representadas são incluídas. A análise de risco aplicada ao método destaca-se por combinar o deslocamento horizontal do navio, obtido do resultado da simulação com a frequência da condição ambiental na área do canal de entrada.

Foi observado na seção 0 (entrada do canal) que todas as corridas com o navio no simulador mostraram um impacto significativo com um desvio para a direita do canal. Isto se deveu a uma tendência do navio para a direita em sua corrida inicial de aceleração da inércia até atingir a velocidade definida de 8 nós. Navios possuem diversos tipos de tendência em ocasiões específicas de manobra. Esta tendência específica foi observada e a referida seção foi descartada da análise, a fim de demonstrar o risco ao longo do canal sem esta interferência.

A partir dos resultados, foi possível verificar que os trechos mais críticos identificados foram os relativos às seções 96, 101 e 128, constantes da Figura 14 (representando as distâncias de 9.600, 10.100 e 12.800 metros, respectivamente).

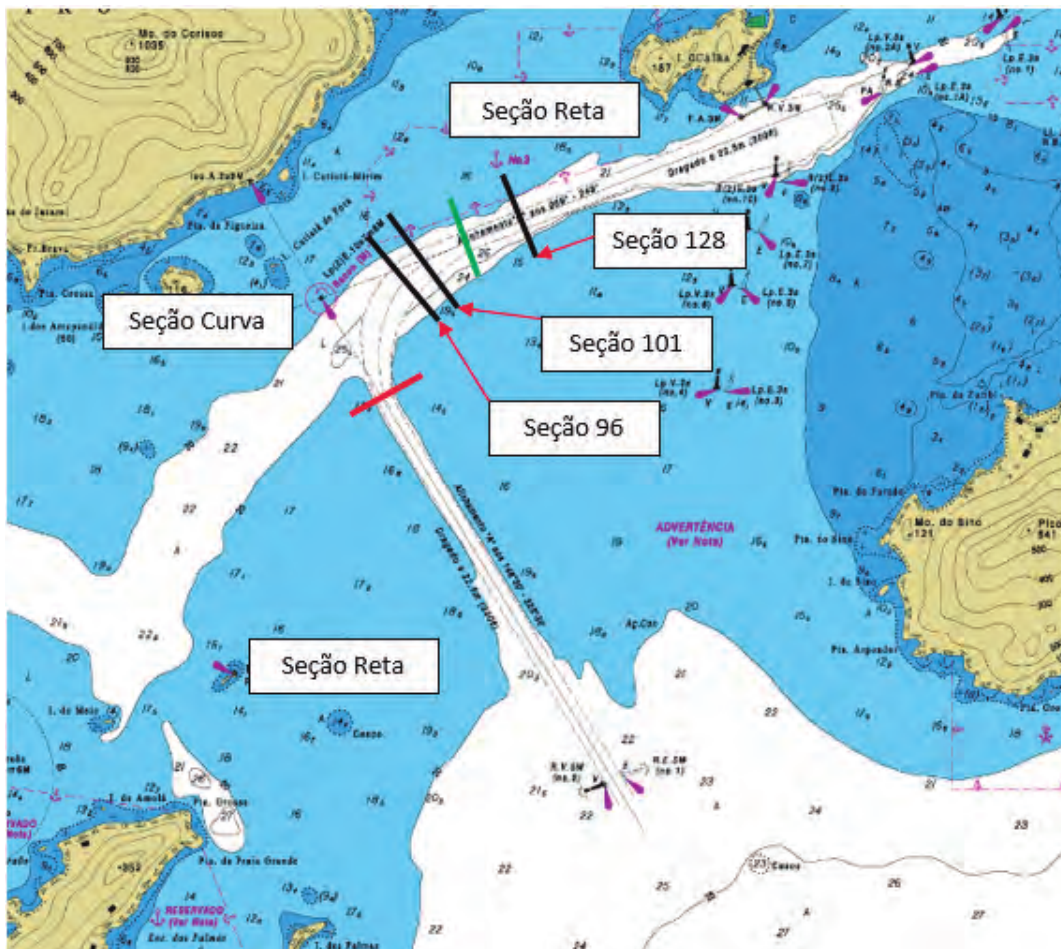


Figura 14 – Canal de entrada ao Terminal da Ilha Guaíba com as seções críticas 96, 101 e 128 e suas posições identificadas. As seções em vermelho e preto compreendem a seção curva do canal.

Para estas seções, são exibidos os resultados dos riscos calculados de ocorrência de um ou mais acidentes no canal de entrada para o tempo considerado de 25 anos para cada combinação de condição ambiental na Tabela 6, e os riscos de maior relevância, organizados em ordem na Tabela 7.

Tabela 6 – Riscos associados às Seções Críticas ao longo do canal, excluindo-se a Seção.

Seção (X 100 m)	AA	AB	AC	BA	BB	BC	CA	CB	CC
96	$1,47 \times 10^{-03}$	$2,97 \times 10^{-05}$	$2,47 \times 10^{-10}$	$6,91 \times 10^{-05}$	$4,62 \times 10^{-05}$	0	$3,41 \times 10^{-05}$	$2,24 \times 10^{-06}$	$2,30 \times 10^{-09}$
101	$2,47 \times 10^{-03}$	$3,68 \times 10^{-06}$	$1,40 \times 10^{-14}$	$8,13 \times 10^{-05}$	$5,82 \times 10^{-06}$	0	$6,38 \times 10^{-04}$	$1,20 \times 10^{-06}$	$2,73 \times 10^{-11}$
128	$5,93 \times 10^{-03}$	$5,57 \times 10^{-04}$	$2,94 \times 10^{-05}$	$1,17 \times 10^{-03}$	$1,16 \times 10^{-02}$	0	$5,12 \times 10^{-04}$	$2,81 \times 10^{-03}$	$1,98 \times 10^{-03}$



Tabela 7 – Classificação em função do risco obtido nas Seções 96, 101 e 128.

Classificação	Grau de Risco	Seção	Categoria Ambiental
1	$1,16 \times 10^{-02}$	128	BB
2	$5,93 \times 10^{-03}$	128	AA
3	$2,81 \times 10^{-03}$	128	CB
4	$2,47 \times 10^{-03}$	101	AA
5	$1,98 \times 10^{-03}$	128	CC
6	$1,47 \times 10^{-03}$	96	AA
7	$6,38 \times 10^{-04}$	101	CA
8	$5,57 \times 10^{-04}$	128	AB
9	$5,12 \times 10^{-04}$	128	CA
10	$8,13 \times 10^{-05}$	101	BA

4. CONCLUSÃO

Através da metodologia aplicada, foi possível verificar, por trecho do canal, o impacto das condições ambientais e a segurança da navegação ao longo de um período estimado de duração do projeto. Desta forma, ela apresentou uma sequência de informações a serem obtidas e procedimentos considerados na elaboração de testes de segurança de navegação

utilizando simuladores, a fim de possibilitar uma análise mais abrangente, proporcionando economia de recursos, tempo e a possibilidade de avaliação a cada trecho do canal de navegação.

A metodologia, desta forma, contribuiu para a segurança marítima dos canais de navegação ao permitir uma análise probabilística a partir da combinação dos fatores ambientais empregando simuladores no modo *fast-time*.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAGANÇA, G. D. L. *Desenvolvimento de simuladores nacionais de navegação marítima: uma questão de autonomia tecnológica e de Defesa Nacional*. Rio de Janeiro: EGN, 2017.

BRIGGS, M. J.; BORGMAN, L. E.; BRATTELAND, E. *Probability assessment for deep-draft navigation channel design*. *Coastal engineering*, v. 48, n. 1, pp. 29-50, 2003.

FERREIRA, A. P. P. L. *Utilização do Simulador de Navegação na formação acadêmica e profissional*. Rio de Janeiro: Escola Naval, 2017.

FOSSEN, T. I *et al*. *Guidance and control of ocean vehicles*, v. 199. New York (USA): Wiley, 1994.

GOMES, A. P. S. S. *Um procedimento para avaliação da viabilidade técnica quanto à navegação em canais de acesso aos portos brasileiros*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2015.



GUCMA, L. *The method of average navigation risk assessment with consideration of inequality of ship's accident probability along the waterway.* *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, v. 45, 2000.

GUCMA, L.; GRALAK, R.; ARTYSZUK, J. *et al.* *Applying simulation studies to define further development of the approach channel to Ystad.* *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, 2018.

IALA. *Guideline 1058 - The use of simulation as a tool for waterway design and Aton planning.* 2011. Disponível em: <<https://www.iala-aism.org/>>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2018.

LATAIRE, E.; VANTORRE, M.; CANDRIES, M. *et al.* *Systematic techniques for fairway evaluation based on ship maneuvering simulations.* *InC World Congress*, pp. 1-13, 2018.: 34th PIAN

PIANC Report No. 121 – 2014. *Harbour Approach Channels - Design Guidelines.* ISBN: 978-2-87223-210-9.

QUY, N.; VRIJLING, J.; VAN GELDER, P. Risk- and Simulation-Based Optimization of Channel Depths: Entrance Channel of Cam Pha Coal Port. *Simulation*, v. 84, n. 1, pp. 41-55, 2008.

SAVENIJE, R. Probabilistic admittance policy deep draught vessels. *Permanent International Association of Navigation Congresses Bulletin*, pp. 25-38, Brussels (Belgium), 1996.

THE UNITED STATES OF AMERICA. *National Centers for Environmental Prediction (NCEP).* Disponível em: <<https://www.weather.gov/ncep/>>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2018.

XU, J.; ZHAO, J.; ZHANG, L. *et al.* *Safety Assessment of Navigation Based on Ship Handling Simulator.* *In: 2019. 5th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*, pp. 92-98. IEEE, 2019.

