



OTIMIZAÇÃO DE CUSTOS DE VIAGEM MEDIANTE A REDUÇÃO DE VELOCIDADE PARA APROXIMAÇÃO DE UM NAVIO A PORTO DE MARÉ

Tarik Osiris Angelino Pérez

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: Paulo Cesar Colonna Rosman

Rio de Janeiro
Dezembro de 2017

OTIMIZAÇÃO DE CUSTOS DE VIAGEM MEDIANTE A REDUÇÃO DE
VELOCIDADE PARA APROXIMAÇÃO DE UM NAVIO A PORTO DE MARÉ

Tarik Osiris Angelino Pérez

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.º Paulo Cesar Colonna Rosman, Ph. D.

Prof.ª Raad Yahya Qassim, Ph. D.

Prof.º Fernando Pereira Duda, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2017

Angelino Pérez, Tarik Osiris

Otimização de custos de viagem mediante a redução de velocidade para aproximação de um navio a porto de maré/
Tarik Osiris Angelino Pérez. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XIV, 71 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 65-67.

1. Slow steaming. 2. Portos de maré. 3. Restrição de calado. 4. Modelo matemático de otimização. I. Rosman, Paulo Cesar Colonna II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço a minha família. A meus pais por acreditarem em mim, por me ensinar que as coisas na vida se conseguem a base de esforço e disciplina. A meus irmãos e minha noiva pelo apoio incondicional em todo momento.

A meu orientador Paulo Cesar Colonna Rosman, e coorientadores: Raad Yahya Qassim e Teodósio das Neves Milisse Nzualo, pelo apoio, incentivo e amizade durante este tempo de desenvolvimento de mestrado.

Agradeço à Marise, pelo apoio incondicional desde o primeiro dia na sala C-209, e por ser uma mãe e conselheira para mim, que estou longe de meu país.

Agradecer a meus companheiros da área, que se tornaram parte de minha família nestes anos longe da minha, com papos de todo calibre na sala, bandeirão, mangue, Gremio, etc. Agradecer a Anton Rosenhagen, Rodrigo Peixoto, Mônica Young e Teodósio Nzualo que me ajudaram diretamente no desenvolvimento de meu trabalho. Também agradecer aos amigos como Laura Aguilera, Ana Ligia, Rodrigo Amado, Jeane Fachi, Lidiane Lima, Felipe Amorim, Cristina Escaloni, Daniel Runkel, Victor Daher, Gregorio Teixeira, Maria Clara Albuquerque e, é claro, sem esquecer ao Tales e Júlia pelos bons papos nas caronas na volta à Ilha.

A professores como Geraldo Wilson, Marcos Gallo, e Luiz Vaz pelo apoio e amizade brindada.

À PRH/Anp 03 pelo apoio financeiro.

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

OTIMIZAÇÃO DE CUSTOS DE VIAGEM MEDIANTE A REDUÇÃO DE VELOCIDADE PARA APROXIMAÇÃO DE UM NAVIO A PORTO DE MARÉ

Tarik Osiris Angelino Pérez

Dezembro/2017

Orientador: Paulo Cesar Colonna Rosman

Programa: Engenharia Oceânica

A redução deliberada da velocidade dos navios de carga é conhecida como *Slow Steaming*, e entre seus principais benefícios estão a redução de consumo de combustível e por consequência das emissões de gases de efeito estufa. Por outro lado, o conhecimento das marés em regiões costeiras é muito importante para a navegação, especialmente em áreas onde a diferença entre maré alta e baixa é substancial como acontecem nos portos de maré.

A presente dissertação apresenta uma estratégia para a otimização do consumo de combustível e redução do tempo de espera para ingresso do navio no porto, pela restrição de calado. Dessa forma, foi adotada a otimização matemática com restrições, para identificar a configuração ótima. Os resultados do exemplo de aplicação na Baía de São Marcos, mostram mediante uma ferramenta de otimização, a combinação de velocidades para minimizar custos energéticos, e calcula-se os intervalos de tempo no qual o navio ingressa no porto pela elevação requerida. De acordo com os resultados chegou-se à conclusão que existe uma redução dos custos de viagem, quando o navio está operando com uma ou mais das suas unidades de propulsão na condição de *Slow Steaming*.

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

OPTIMISATION OF TRAVEL COSTS BY SLOW STEAMING IN SHIP
APPROACHING TO A TIDAL PORT

Tarik Osiris Angelino Pérez

December/2017

Advisor: Paulo Cesar Colonna Rosman

Department: Ocean Engineering

Slow steaming in the approach of a ship to a tidal port taking into account tides results in ship fuel consumption and waiting cost reduction and a concomitant decrease in greenhouse gas emissions. In this dissertation, a mathematical optimisation model is developed for the formulation of this problem. The aforesaid model is computationally implemented employing optimisation and computational fluid dynamics program. The model is applied to a hypothetical example and a real life case study based on São Marcos Bay, Maranhão, Brazil.

CONTEÚDO

AGRADECIMENTOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xi
NOMENCLATURA.....	xii
1. Introdução.....	1
1.1. Redução da velocidade de navegação (<i>Slow Steaming</i>)	2
1.1.1. Variação dos custos de transporte marítimo.....	6
1.2. Motivação	7
1.3. Objetivo Geral.....	8
1.3.1. Objetivos Específicos	8
1.4. Estrutura do trabalho.....	9
2. Revisão bibliográfica.....	11
2.1. Teoria básica de marés.....	14
3. Metodologia	19
3.1. Definição do Problema	19
3.1.1. Enunciado do problema	20
3.2. Modelo Matemático	20
3.2.1. Formulação do modelo matemático	21
3.2.2. Considerações sobre a formulação do modelo	21
3.3. Implementação computacional	22
3.3.1. Programa Lingo	22
3.3.2. Sistema de modelagem SisBaHiA	23
3.4. Caso hipotético.....	24
3.4.1. Resultados.....	26
3.4.2. Conclusões.....	27
4. Caso de estudo.....	28
4.1. Navio utilizado.....	28
4.2. Trajetória desde mar aberto	29
4.3. Ingresso à Baía de São Marcos	36
4.3.1. Elevação requerida para ingresso ao porto	39
4.3.2. Instante inicial da elevação requerida na enchente.....	42
4.3.3. Instante final da elevação requerida na vazante	43
5. Resultados	45
5.1. Combinação das velocidades	45
5.2. Instantes de tempo para ingresso seguro ao porto	49

5.2.1. Elevação requerida para ingresso ao porto.....	50
5.2.2. Intervalos de tempo para ingresso ao porto.....	50
5.3. Custo de viagem sem tempo de espera.....	51
5.4. Custo de viagem com tempo de espera.....	53
6. Conclusões.....	62
7. Recomendações.....	64
8. Referências bibliográficas.....	65
Apêndice – A: Modelo Lingo.....	68
Apêndice – B: Planilha de Excel.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Ganhos de exportação da China de 1995 a 2016, tendo desde inícios do ano 2000 um incremento acelerado. Fonte: Adaptado de <i>The Observatory of Economic Complexity</i> , 2017.	3
Figura 2 - Gráfico evolutivo do preço do petróleo Brent. Fonte: Adaptado de <i>Trading Economics</i> , 2017.	4
Figura 3 - Gráfico evolutivo da média das taxas de fretamento da década passada. Fonte: Adaptado de UNCTAD, 2010.	6
Figura 4 - Gráfico representativo das marés de sizígia e de quadratura.	15
Figura 5 - Exemplos selecionados de curvas de maré de diferentes locais geográficos que ilustram os principais tipos de maré. Fonte: Adaptado de DIETRICH <i>et al.</i> , 1975 (a) maré semidiurna (e.g., Immingham, Grã-Bretanha; (b) maré mista, predominantemente semidiurna (e.g., São Francisco, USA); (c) maré mista, predominantemente diurna (e.g., Manila, Filipinas); (d) maré diurna (e.g., Do-Son, Vietnã).	18
Figura 6 - (a) Relação do tamanho do navio e a profundidade requerida, (b) o ciclo de maré assumido. Fonte: Ilustração retirada de (NONNEMAN, 1981).	26
Figura 7 - Navio de minério Aframax MINERVA ALEXANDRA.	28
Figura 8 - Ilustração do deslocamento do navio nas 2000 mn de trajetória desde mar aberto até o Porto de Itaqui na Baía de São Marcos. Fonte: Google Maps 10/2017.	29
Figura 9 - Ilustração da relação entre o consumo específico de combustível para cada velocidade. Fonte: Adaptado de BROWN <i>et al.</i> , 2007.	31
Figura 10 - Ilustração do consumo específico de combustível para cada velocidade na viagem.	34
Figura 11 - Ilustração do tempo de viagem para cada velocidade.	35
Figura 12 - Ilustração do consumo de combustível para cada velocidade.	35
Figura 13 - Ilustração do consumo de combustível para cada tempo utilizado na viagem a velocidade constante.	36
Figura 14 - Mapa da Baía de São Marcos com discretização em malhas de elementos finitos, e isolinhas de batimetria mostrando o trajeto do navio no canal de acesso no ingresso ao porto e duas estações usadas para o análise hidrodinâmico: Estação Entrada da Baía e Estação Porto. Fonte: Adaptado de ROSMAN <i>et al.</i> , 2016.	37
Figura 15 - Ilustração das elevações de maré nas estações Entrada da Baía e Porto. Fonte: Adaptado de ROSMAN <i>et al.</i> , 2016.	38
Figura 16 - Ilustração das diferenças de fase e amplitudes de onda de maré das estações Entrada da Baía e Porto no sétimo dia. Fonte: Adaptado de ROSMAN <i>et al.</i> , 2016.	39
Figura 17 - Ilustração da série temporal de níveis de maré na Estação Porto. Fonte: Adaptado de ROSMAN <i>et al.</i> , 2016.	40
Figura 18 - Ilustração generalizada de duas baixa-mares consecutivas para assim obter o tempo inicial e final do ingresso seguro do navio ao porto.	41
Figura 19 - Ilustração generalizada de uma maré de enchente.	42

Figura 20 - Ilustração generalizada de uma maré de vazante.....	43
Figura 21 - Ilustração do ótimo consumo de combustível no tempo de viagem de 2000 mn.	49
Figura 22 - Ilustração das elevações de maré na Estação Porto.....	50
Figura 23 - Ilustração de custo de viagem em relação ao tempo empregado, exibindo em círculo vermelho os intervalos onde acontecem picos que elevam ligeiramente o custo.....	56
Figura 24 - Ilustração onde os custos de viagem são maiores ao custo no instante da primeira vazante, limite da elevação requerida.	57
Figura 25 - Ilustração onde os custos de viagem são maiores ao custo no instante da segunda vazante, limite da elevação requerida.....	57
Figura 26 - Ilustração onde os custos de viagem são maiores ao custo no instante da terceira vazante, limite da elevação requerida.	58
Figura 27 - Ilustração onde os custos de viagem são maiores ao custo no instante da quarta vazante, limite da elevação requerida.	58
Figura 28 - Ilustração onde os custos de viagem são maiores ao custo no instante da quinta vazante, limite da elevação requerida.	59
Figura 29 - Ilustração onde os custos de viagem são maiores ao custo no instante da sexta vazante, limite da elevação requerida.	60
Figura 30 - Ilustração onde os custos de viagem são maiores ao custo no instante da sétima vazante, limite da elevação requerida.....	60
Figura 31 - Ilustração onde os custos de viagem são maiores ao custo no instante da oitava vazante, limite da elevação requerida.	61

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da maré segundo o Número de Forma, F.....	17
Tabela 2 - Intervalos de tempo que o navio de 100000 DWT pode ingressar ao porto.	27
Tabela 3 - Características principais do navio Mineiro Aframax Minerva Alexandra. Fonte: www.minervamarine.com, 10/2017.....	29
Tabela 4 - Características do navio.....	30
Tabela 5 - Modos de operação do navio que são utilizados em cada intervalo de velocidade para otimizar o consumo de combustível na viagem. Fonte: Adaptado de BROWN <i>et al.</i> , 2007.....	32
Tabela 6 - Consumo de combustível em galões e custo de combustível em US\$ na viagem. Fonte: Adaptado de BROWN <i>et al.</i> , 2007.....	33
Tabela 7 - Menor consumo de combustível e custo total de combustível para determinados tempos de viagem otimizando as combinações de velocidades nos diferentes modos de operação.....	46
Tabela 8 - Intervalo de tempo para a viagem de 2000 mn usando as combinações de velocidade para otimizar o consumo de combustível.	48
Tabela 9 - Intervalos de tempo no qual o navio poderá ingressar ao porto pela elevação requerida.....	51
Tabela 10 - Consumo de combustível e custo total de combustível para os instantes da elevação mínima requerida.....	52
Tabela 11 - Poupança no consumo de combustível e nos custos de combustível em cada intervalo.....	52
Tabela 12 - Poupança no consumo de combustível e nos custos de combustível em cada intervalo.....	53
Tabela 13 - Custo de viagem, detalhando o custo de combustível e da espera no trajeto de 2000 mn.....	54

NOMENCLATURA

$A_j(\phi, \lambda)$ = amplitude teórica da maré.

anchorcost = custo de espera por unidade de tempo na entrada do porto.

B = boca do navio, m.

c_e, c_v = translação vertical sobre o nível médio da série temporal.

d = distância, m.

distance = distância total na viagem, mn.

d_t = profundidade requerida para ingresso seguro ao porto.

e_{b1} = elevação na primeira baixa-mar ao início da enchente, m.

e_{b2} = elevação na segunda baixa-mar ao final da vazante, m.

e_p = elevação na preamar, m.

e_r = elevação requerida, m.

F = número de forma.

F_a = força de atração, N.

FUELCONS = consumo total de combustível do navío na viagem.

FUELCOST = custo total de combustível do navío na viagem.

$frate_s$ = consumo específico de combustível para cada velocidade do navio.

fuelcap = capacidade do tanque de combustível do navio.

fuelcost = custo de combustível por unidade de volume.

G = constante de gravitação universal com valor: $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$.

$G_j(\phi, \lambda)$ = fase de Greenwich, rad.

GPH = galões por hora.

h° = profundidade media.

HOURS_s = tempo gasto na velocidade s.

h_t = profundidade disponível no instante t.

K_1 = amplitude da componente lunar/solar diurnal.

L_{OA} = comprimento total do navio, m.

m = massa, kg.

mn = milhas náuticas, com equivalência (1 mn = 1852 m).

M_2 = amplitude da componente principal semi-diurnal.

O_1 = amplitude da componente principal lunar diurnal.

r = amplitude da maré.

$reserve_fuel$ = capacidade do tanque de combustível de reserva do navio.

s = índice do trecho percorrido pelo navio; $s \in S$.

$speed_s$ = velocidade da embarcação no trecho s .

S_t = porte bruto do navio, milhares dwt.

S_2 = amplitude da componente principal solar semi-diurnal.

t = tempo, s.

T = calado do navio, m.

t_e = instante inicial da elevação requerida, h.

t_{e_n} = instante inicial da elevação requerida num ciclo de maré.

$t_{e_{n+1}}$ = instante inicial da elevação requerida no seguinte ciclo de maré.

t_n = instante de tempo da preamar, h.

t_{n-1} = instante de tempo de início da enchente, h.

t_{n+1} = instante de tempo no final da vazante, h.

t_v = instante final da elevação requerida, h.

t_{v_n} = instante final da elevação requerida num ciclo de maré.

$WAITCOST$ = custo da espera.

$WAITTIME$ = tempo de espera na entrada do porto.

ζ = nível do mar.

Φ = instante de tempo desde o qual o navio tem restrição de calado.

ω_e, ω_v = frequência angular.

ω_j = frequência da onda de maré, Hz.

1. Introdução

Nos últimos 30 anos, o efeito estufa na atmosfera incrementou-se por causa das emissões de gases tóxicos na Terra, atingindo níveis críticos desde a era pré-industrial. Em 1997, foi criado no Japão um tratado internacional com acordos mais estritos para a redução da emissão dos gases que aumentam o efeito estufa e aliviam os impactos causados pelo aquecimento global, o Protocolo de Kyoto. Uma ideia que começou no Canadá em 1988 na *Toronto Conference on the Changing Atmosphere* e desde então evoluiu em outras conferências sobre o Clima e Meio Ambiente

Uma das consequências do aquecimento global é o derretimento das calotas polares que induzirá o aumento dos níveis do oceano e resultará na perda de regiões e cidades costeiras, com prejuízo para o turismo, agricultura, etc. A biodiversidade será afetada na medida em que as espécies terão que se adaptar a novos regimes climáticos, espécies que usarão da migração para buscar locais mais adequados ou se extinguirão. A agricultura sofrerá impactos com a mudança do regime de chuvas e modificações nos solos, com consequente perda de produtividade, prejuízos à segurança alimentar e causando migrações e conflitos (CONRADO *et al.*, 2004).

O uso de combustíveis fósseis acaba liberando gases poluentes para a atmosfera, pondo em risco não só as gerações futuras, como também a natureza e os animais. Um destes gases de efeito estufa é CO₂. Em 2014, a IMO¹ publicou o terceiro estudo referente às emissões de gases de efeito estufa, considerando dados desde 2007 até 2012 da frota de transporte marítimo internacional que, em 2007 emitiu 1100 toneladas de CO₂, o que corresponde a 3,5% de toda emissão de CO₂ no mundo, até o 2012 que emitiu

¹ IMO – (International Maritime Organization), é uma agência especializada das Nações Unidas responsável por regulamentar o transporte marítimo internacional, proteção e segurança da navegação e a prevenção da poluição marinha.

938 toneladas de CO₂, o que corresponde a 2,6% de toda emissão de CO₂ no mundo (IMO, 2014).

As emissões, especialmente de CO₂, são diretamente proporcionais ao consumo de combustível, que por sua vez é proporcional à velocidade do navio. Portanto, se reduzirmos a velocidade do navio, diminuirão as emissões de gases de efeito estufa.

Os princípios da arquitetura naval caracterizam as necessidades da energia de propulsão como função cúbica da velocidade (MANNING,1956; AVI-ITZHAK, 1974; ARTZ JUN, 1975), isso significa que para duplicar a velocidade do navio é necessária uma potência, pelo menos oito vezes maior. Dessa forma, se reduzirmos a velocidade em 10%, pode haver uma redução de até 27% no consumo de combustível numa determinada condição de navegação. Por consequência, a velocidade é fator determinante do consumo de combustível.

1.1.Redução da velocidade de navegação (*Slow Steaming*)

Slow Steaming consiste em reduzir a velocidade de cruzeiro de um navio operando dentro de uma rota regular, para reduzir o consumo de combustível e como consequência as emissões de carbono, além de colocar novamente em movimentação navios sem operar por falta de carga (WIESMANN, 2009).

O *Slow Steaming* é, por conseguinte, uma tática cujo propósito principal está focado na redução de custos de viagem. Atualmente é um pratica habitual, no entanto, na década dos anos 70 considerou-se pela primeira vez a necessidade de reduzir a velocidade de navegação com o intuito de reduzir o consumo.

Por esse motivo, durante a segunda crise do petróleo em 1979 a frota mundial adequou sua velocidade em conformidade com as circunstâncias do mercado e pelo preço do petróleo. Foi adotada uma redução geral das velocidades de cruzeiro e, uma vez estabilizada a situação restaurou-se novamente.

E não foi até a época de 2000 a 2005, quando a ideia de reduzir a velocidade começou a ser considerado mais a sério, e coincide com o auge comercial chinês em que o país asiático se tornou uma potência, que mudou o paradigma do comércio internacional.

Pode ser visto na Figura 1, que as exportações da China apresentavam, até o fim dos anos 1990 uma tendência quase linear e, ao início dos anos 2000, experimentaram um crescimento exponencial que a indústria do transporte marítimo não conseguiu cobrir inicialmente.

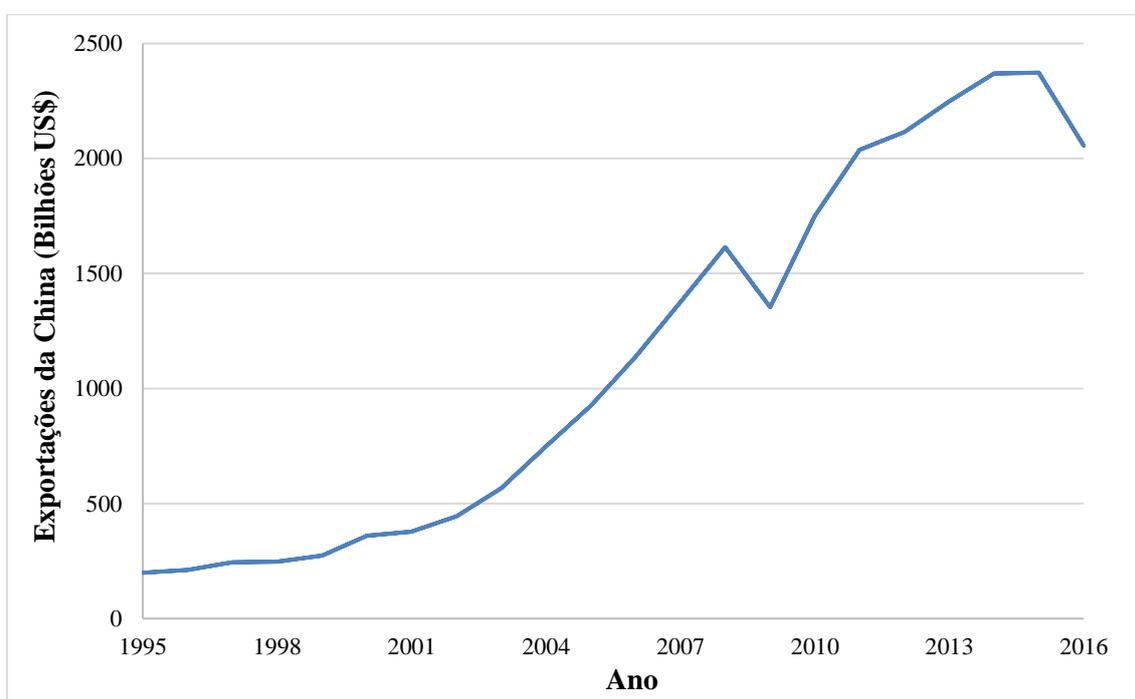


Figura 1 - Ganhos de exportação da China de 1995 a 2016, tendo desde inícios do ano 2000 um incremento acelerado. **Fonte:** Adaptado de *The Observatory of Economic Complexity*, 2017.

A resposta para atender a essa crescente escassez de transporte foi redirecionar a capacidade de carga desde outras linhas marítimas para centralizar os esforços nessa nova necessidade. No entanto, visto que a excessiva desigualdade entre a demanda e a capacidade de transporte estava aumentando constantemente, as companhias de navegação aceleraram a construção de novos navios para expandir a capacidade da frota e reduzir esse desfasamento. Além disso, o preço do combustível, sofreu uma subida peculiar que acabaria por desvincular-se em 2008 como se mostra na Figura 2.



Figura 2 - Gráfico evolutivo do preço do petróleo Brent. **Fonte:** Adaptado de *Trading Economics*, 2017.

Ao início do 2005, a *Germanischer Lloyd*² preveniu às companhias de transporte marítimo para tomar uma posição e considerar uma redução de velocidade para assim conservar a lucratividade. Devido ao surgimento da crise financeira global, assim como o aumento do preço do combustível, se intensificou a complicação pela queda das exportações em 2007, que conjuntamente aconteceu com a numerosa entrega de navios que tinham sido encomendados no decorrer dos anos do *boom* econômico.

A redução da velocidade veio pela primeira vez quando a situação se tornou totalmente insustentável em 2008. A *Maersk*³ anunciou que tinha que reduzir a velocidade de cruzeiro de uma parte de sua frota abaixo de 40% para reduzir o consumo de combustível e conter os custos operacionais (JORGENSEN, 2012). A reação do resto das companhias de navegação não demorou, e optando pela mesma solução que a Maersk, no final de 2010, havia mais de 100 navios porta-contêineres que operavam em baixas velocidades em todo o mundo.

² Germanischer Lloyd – Foi uma sociedade de classificação baseada na cidade de Hamburgo, na Alemanha. Ele deixou de existir como entidade independente em setembro de 2013 como resultado de sua fusão com a DNV da Noruega (Det Norske Veritas) para se tornar a atual DNV GL.

³ Maersk – Operadora logística dedicada à prestação de serviços de navegação marítima.

O impacto da desaceleração não só levou a uma redução considerável no consumo de combustível e gases de efeito estufa, como trouxe a possibilidade de recuperar a frota que permaneceu amarrada, com o intuito de manter no mesmo nível a capacidade de carga da linha marítima.

O ideal é o ponto de equilíbrio entre oferta e demanda, não obstante, a realidade é diferente, como por exemplo em 2012, a capacidade de transporte da frota de navios porta-contêineres aumentou em 7%. Isso é mais que a demanda, que aumentou em 1% em relação ao ano anterior, sendo que a metade desses novos navios têm um tamanho maior a 10000 TEU (REX *et al.*, 2012).

Apesar da inclusão de novos navios ter conseguido manter a capacidade de carga e as escalas semanais, a carga começou a chegar mais tarde ao seu destino, o que causou uma alteração significativa das cadeias logísticas de muitos afretadores.

Na tentativa de transferir os benefícios do *Slow Steaming* para os afretadores, as companhias de navegação foram obrigadas a compensá-los com uma redução nos preços das taxas de fretamento, como é exibida na Figura 3. No entanto, essas reduções não conseguiram se sustentar no tempo, devido à variação incessante dos preços do petróleo.

O incremento do tempo de transporte além de reduzir o consumo de combustível também reduz os custos de armazenamento dos receptores de carga. Mas existem sectores, tais como o transporte de alimentos frescos, para o qual a redução de velocidade é uma grave desvantagem para as suas exportações.

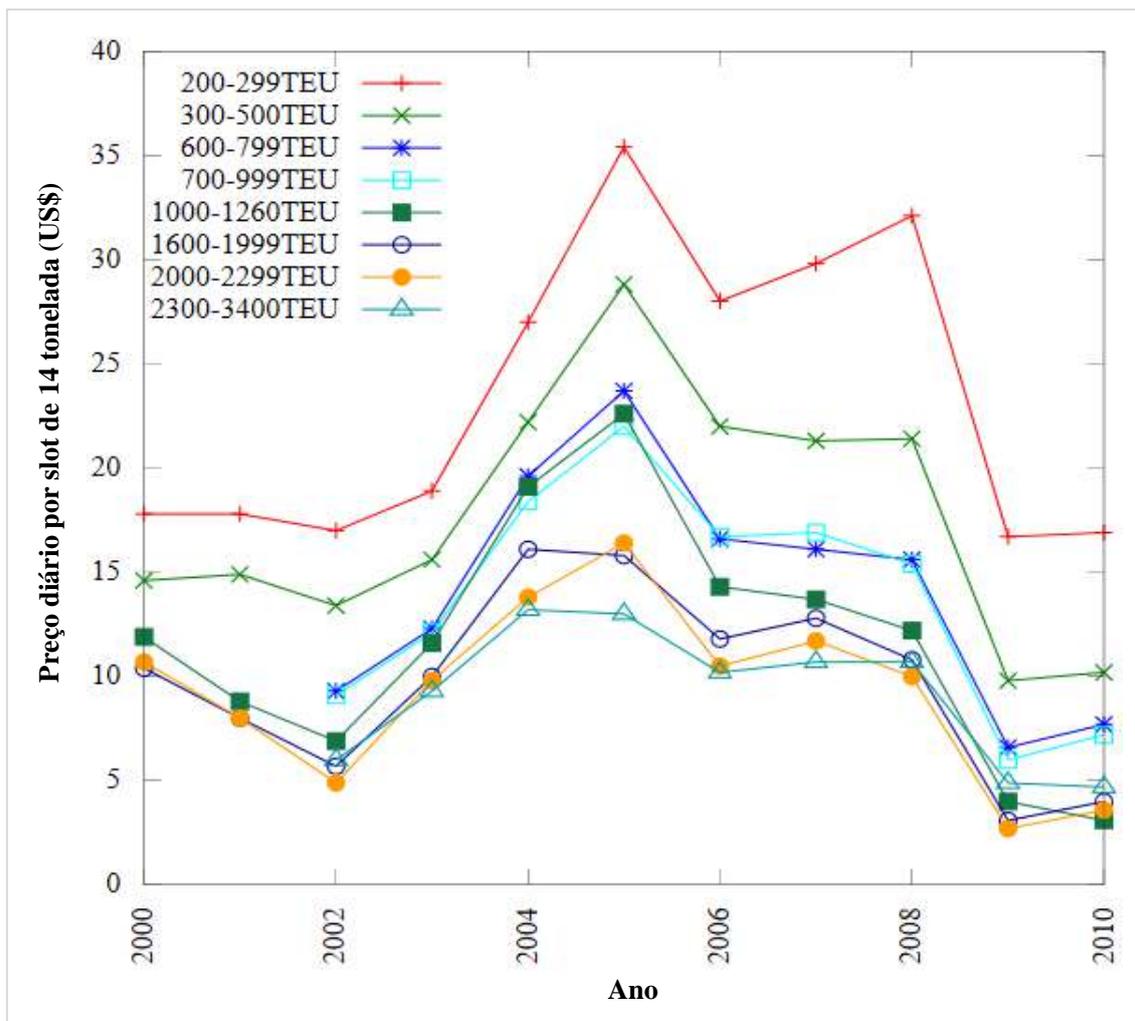


Figura 3 - Gráfico evolutivo da média das taxas de fretamento da década passada. **Fonte:** Adaptado de UNCTAD, 2010.

1.1.1. Variação dos custos de transporte marítimo

O custo do navio, quer dizer o custo do transporte marítimo é dividido em custos de capital, custos operacionais, custos de manutenção periódica, custos de movimentação de carga e custos de viagem (WHAL & KRISTOFFERSEN, 2012).

Os custos de capital abrangem os custos de aquisição do navio. Estes custos incluem pagamentos de dívida, empréstimos e os respectivos juros.

Os custos operacionais são custos intrínsecos no dia-a-dia, como manutenção, reparos, administração, salários e benefícios sindicais da tripulação, assim como o seguro do navio. Estes custos variam entre os navios, especialmente o custo de manutenção.

Os custos de manutenção periódica dependem do estado e da idade do navio e usualmente acontecem quando o navio necessita de grandes reparos em docas secas.

Os custos de movimentação de carga referem-se à operação no porto de carregamento e descarregamento do navio.

Finalmente, têm-se os custos de viagem, que dizem respeito a uma viagem em particular. Estes custos são divididos em custos de combustível, despesas portuárias e demais taxas para navegação em canais, rebocadores e pilotagem, sendo os custos de combustível os de maior repercussão. É necessária uma permanente comunicação entre o navio e o porto, dessa forma o capitão pode conduzir o navio combinando as velocidades em determinadas distâncias da rota, resultando na redução do consumo de combustível.

As companhias marítimas não estabelecem o preço de combustível, não obstante podem reduzir o consumo de sua frota regulando a velocidade operacional. O presente trabalho tem como foco analisar os custos de viagem, especialmente os custos de combustível.

Cada custo deve ser cuidadosamente analisado, dado que o armador procura o valor mínimo do custo de transporte ao buscar a velocidade ótima na viagem. Isto inclui um balanço entre a redução dos custos de viagem mediante *Slow Steaming* e o incremento dos custos operacionais como manutenções e perdas, com a redução do número de viagens.

1.2.Motivação

A motivação para a elaboração deste trabalho reside na necessidade teórica de uma melhor compreensão da tendência operacional conhecida como *Slow Steaming*, tal tendência que começou no mercado da navegação de porta-contentores há cerca de dez anos. Além disso, não existem muitos trabalhos onde se proponha minimizar os custos de viagem simultaneamente com o tempo de espera fazendo uma análise de navegação com uma combinação de velocidades em *Slow Steaming* até a entrada ao porto. Momen-

to no qual o navio ingressa tendo em consideração a possibilidade de fazê-lo quando as condições de calado e altura de maré seja permitido.

Uma contribuição mais recente e próxima a esta dissertação, fornece uma visão geral de melhorar a eficiência energética e diminuição de gases de efeito estufa, mediante redução de velocidade e comunicação eficiente entre o navio e o porto, para chegar a tempo, quando existe atraso conhecido no porto como congestão de navios ou falta de espaço para o manuseio da carga (JIA, *et al.*, 2017). Embora, o estudo não tem acesso a informação precisa para estimar o tempo de espera, nem condições climáticas e de maré.

Dessa forma, a principal contribuição desta pesquisa é a utilização do método de otimização para navegar, valendo-se da combinação de velocidades que diminuirá o consumo de combustível, tendo em consideração as elevações de maré para reduzir o tempo de espera.

1.3. Objetivo Geral

O objetivo da dissertação é o desenvolvimento de um modelo matemático para minimizar o tempo de espera e otimizar o consumo de combustível. Por conseguinte, reduzirá as emissões de gases de efeito estufa provenientes de navios em viagem marítima para seu porto de destino, no estado de navegação lenta, utilizando uma combinação adequada de velocidades, e tendo em conta a mudança de altura da maré ao longo do tempo.

1.3.1. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Apresentar combinações das velocidades que reduzirão o consumo de combustível nos diferentes modos de operação na viagem, utilizando uma implementação computacional do Programa Lingo 10 de otimização.

- Melhorar a formulação de profundidade disponível utilizada no caso hipotético no qual se utiliza uma maré sintética para o caso de estudo, onde se trabalha com uma maré real na qual as curvas de maré apresentam alturas que não são constantes ao longo do tempo.
- Aplicar a metodologia num exemplo de aplicação do modelo desenvolvido como ilustração de suas capacidades. O caso de estudo será desde o mar aberto até o porto.
 - O intuito do modelo desenvolvido é analisar as elevações de maré, do estudo hidrodinâmico, que gera tempos de espera para o ingresso no porto.

1.4. Estrutura do trabalho

O presente trabalho foi organizado da seguinte forma: A introdução, onde se menciona a redução de velocidade é exibida no capítulo 1. Uma revisão bibliográfica do contexto do presente trabalho, assim como uma breve teoria das marés são proporcionadas no capítulo 2. A metodologia é formulada no capítulo 3, onde se define o problema, e se apresenta o modelo matemático que será resolvido com ferramentas computacionais. Neste capítulo também é mostrado o caso hipotético de estudo realizado por NONNEMAN (1982). O estudo do caso na baía de São Marcos é exibido no capítulo 4. Em sequência são mostrados os resultados obtidos no capítulo 5. As conclusões e recomendações são exibidas nos capítulos 6 e 7 respectivamente. Nos apêndices são apresentados o código do programa Lingo de otimização, e uma planilha onde são inseridos os valores de entrada necessários para a compilação do programa de otimização.

O problema que se analisa é a redução de custos de viagem mediante *Slow Steaming* no ingresso ao porto de maré, no entanto esse problema faz parte de gestão de portos e é muito complexo. Tem-se vários aspectos como disponibilidade de berço, concorrência com outros navios, correntes de maré na baía, correntes oceânicas, tempestades, desastres naturais, etc.

Esta dissertação analisa só um navio e um porto, dado que no caso de estudo o navio desloca-se com uma trajetória definida até o porto, desse modo apresenta-se um

processo unitário. Um navio muitas vezes tem roteiros, ele passa por diferentes portos levando carregamentos para seus clientes. Dessa forma, esse processo unitário pode ser replicado nos diferentes portos.

O navio tem um berço disponível no porto a qualquer momento, assim como a trajetória não pode ser modificada e o navio não ficará parado se não é por restrição de profundidade. Neste trabalho pela complexidade do problema, não são analisadas as correntes oceânicas, correntes de maré na baía, limite de velocidade no canal de navegação, presença de outros navios, viagem a outros portos, custo da variação de velocidade do navio na combinação que otimiza o consumo de combustível, tempestades, desastres naturais.

O navio utilizado é um minério Aframax MINERVA ALEXANDRA, no entanto, as curvas de consumo de combustível que foram utilizadas para o estudo do caso, pertence ao estudo de BROWN *et al.*, (2007), dado que é de um navio real e o comportamento da curva é similar. Cabe ressaltar a liberdade que foi tomada ao utilizar aquelas curvas, as quais são aptas para apresentar a aplicação da metodologia no desenvolvimento da dissertação.

2. Revisão bibliográfica

As empresas de transporte marítimo têm-se centrado nas operações eficientes do navio, que se refere à eficiência energética no transporte e, em especial, operacionais, minimizando o consumo de combustível e por consequência, as emissões de gases de efeito estufa.

Além disso, o conhecimento das marés é muito importante para a navegação em regiões costeiras, principalmente em manobras no porto, porque ao ignorar as variações das marés, particularmente quando combinada com tempestades podem causar danos às estruturas, especialmente em áreas onde a diferença entre maré alta e baixa é substancial como são os portos de maré.

Alguns megaportos são portos de maré, por exemplo: o Porto de Shangai e o Porto de Hamburgo. No porto de Shangai, os grandes navios só podem navegar na maré alta, porque a profundidade da água no canal de entrada da área de Waigaoqiao atinge 12,5 m (ESCAP, 2007). Por outro lado, no porto de Hamburgo, os navios com um calado máximo de 12,8 m podem entrar no canal de navegação a qualquer momento, e navios de até 15,1 m de calado podem fazê-lo na maré alta (Porto de Hamburgo, 2017).

Os operadores portuários têm interesse no planejamento de atracação, porque recebem um pagamento pelo manuseio de contêineres e, é o ponto de partida para o planejamento das operações portuárias.

Este processo de planejamento é dividido em planejamento mensal, semanal e diário. No último, as linhas marítimas enviam ao operador a hora exata de chegada e partida, que decidirá a posição de atracado e a duração. Os operadores portuários estão mais interessados no planejamento do dia a dia, porque o problema é baseado em informações precisas.

Os grandes navios dependem do padrão de maré para passar pelo canal de navegação, e determinar a hora de chegada e a atracação no porto. Este padrão de maré é fundamental para o planejamento da atracação diária (ZHEN *et al.*, 2017).

Nos portos de maré, a profundidade disponível durante a maré baixa não é adequada para a entrada do navio, dado que as condições de calado dependem disso (NONNEMAN, 1981).

Assim, o navio deverá esperar para ser atendido, caso não tenha a profundidade mínima disponível para entrar no porto, mesmo quando há um lugar para ser atracado.

Conforme BARROS *et al.*, (2011), as imposições atribuídas para a atracação de navios têm como prioridade os navios que devem descarregar matérias-primas com estoque abaixo do nível crítico. Essa prioridade está associada a problemas logísticos no gerenciamento comercial e fluxo de trabalho no porto.

O planejamento de portos é dividido em quatro componentes:

- Tempo de chegada estimado, que é conhecido.
- Tempo de atracação esperado.
- Tempo de conclusão esperado.
- Tempo de navegação esperado.

Estes três últimos dependem de certas condições de operação, tais como a condição da maré, a importância do navio e a disponibilidade de atracação.

De acordo com MOON e WHO (2014), o tempo de permanência de um navio num porto consiste dos seguintes componentes:

- Tempo de espera.
- Tempo de manobra.
- Tempo de atracação.
- Tempo produtivo.
- Tempo ocioso.

Para maior produtividade portuária, há um grande interesse em medidas operacionais e projetos estratégicos para a diminuição dos componentes não produtivos, isto é,

tempos de espera, manobra, atracação e ocioso. O trabalho objeto dessa proposta visa a redução de tempo de espera que pode ser feita por medidas operacionais como o planejamento de chegada de navio ao porto na política *Just-in-time*. Desse modo, benefícios no consumo de combustível dependerá da razão do tempo de espera e tempo de viagem. Quanto menor é o tempo de espera, se otimizará o consumo de combustível.

OLBA *et al.*, (2015) em seu trabalho identificou os processos mais relevantes envolvidos no desempenho de navegação no porto para analisar e avaliar os modelos já desenvolvidos destes processos. Modelos de simulação do transporte marítimo provaram ser ferramentas úteis para representar e prever os processos e operações portuárias. Quanto à representação de tráfego no estreito, modelos consideram sistemas de navegação como os sistemas de formação de filas.

NONNEMAN (1981) apresenta um procedimento quantitativo para determinar a redução de tempo de espera nos canais de aproximação em função de ciclo de maré. Se por um lado este procedimento possui a vantagem de simplicidade, por outro é aproximado e não leva em consideração as características específicas de maré num porto. Esta constatação é explicitada pelo próprio autor.

YIN *et al.*, (2014) analisa a história e a implementação de redução de velocidade na viagem marítima, devido aos seguintes motivos: (1) aumento no preço do bunker, (2) excesso de oferta de capacidade de transporte e (3) a pressão ambiental. Este trabalho também examina o lado negativo da redução de velocidade, que é, como afeta o tempo de entrega de mercadorias.

O estudo de KONTOVAS e PSARAFTIS (2011) examina o ambiente operacional devido à velocidade reduzida, o que se tornou uma medida operacional muito popular para reduzir o consumo de combustível e também as emissões. Ele também menciona o forte interesse em investigar possíveis formas de reduzir o tempo no porto, e maximizar a eficiência de um navio para atracar na chegada no porto. Neste sentido, políticas relativas à atracação estão sendo investigadas como uma medida para reduzir o tempo de espera.

BROWN *et al.*, (2007) aplica o planejamento do deslocamento de um navio de um lugar para outro em um determinado período de tempo, uma vez que o navio pode operar com uma ou mais das suas unidades de propulsão para economizar combustível. Análise em vários modos de plantas de propulsão que mostram diferentes relações de velocidade e consumo de combustível é feito. Uma ferramenta aplica programação linear para otimizar o consumo de combustível de modo a manter uma velocidade média. A flexibilidade de programação linear pode ser adaptada às novas restrições e outros problemas que possam surgir no futuro.

2.1. Teoria básica de marés

Mares são as alterações cíclicas verticais da superfície do mar sobre a terra, causada principalmente pelos efeitos combinados da força centrífuga e forças gravitacionais exercidas pela lua e o sol devido à rotação do sistema Terra-Lua-Sol.

A oscilação de maré é resultado da Lei de Gravitação Universal publicado por Sir Issac Newton em 1687 na obra *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*, dada pela Equação (2.1) onde explica o fenómeno da maré astronómica.

$$F_a = G \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2} \quad (2.1)$$

Onde:

- F_a = Força de atração entre os dois corpos [N];
- G = Constante de gravitação universal, $6,67 \cdot 10^{-11}$ [N·m²/kg²];
- m_1, m_2 = Massas dos corpos que se atraem [kg];
- d = Distância entre os centros dos corpos [m].

Embora o sol tenha uma massa milhares de vezes maior que a lua, por se encontrar mais afastado da terra, o efeito gravitacional do sol é muito menor que os efeitos da lua.

As forças de atração dos sistemas Terra-Lua e Terra-Sol fazem que a água se eleve acima do seu nível normal. Assim, durante as fases de lua cheia e lua nova, a lua e o sol estão alinhados, desta forma as forças gravitacionais se somam, e obtém-se a maré

de maior amplitude, chamadas marés vivas ou marés de sizígia. Por outro lado, durante as fases de quarto crescente e quarto minguante, as forças gravitacionais se opõem, e obtém-se a maré de menor amplitude, trata-se das marés mortas ou de quadratura, como é exibido na Figura 4.

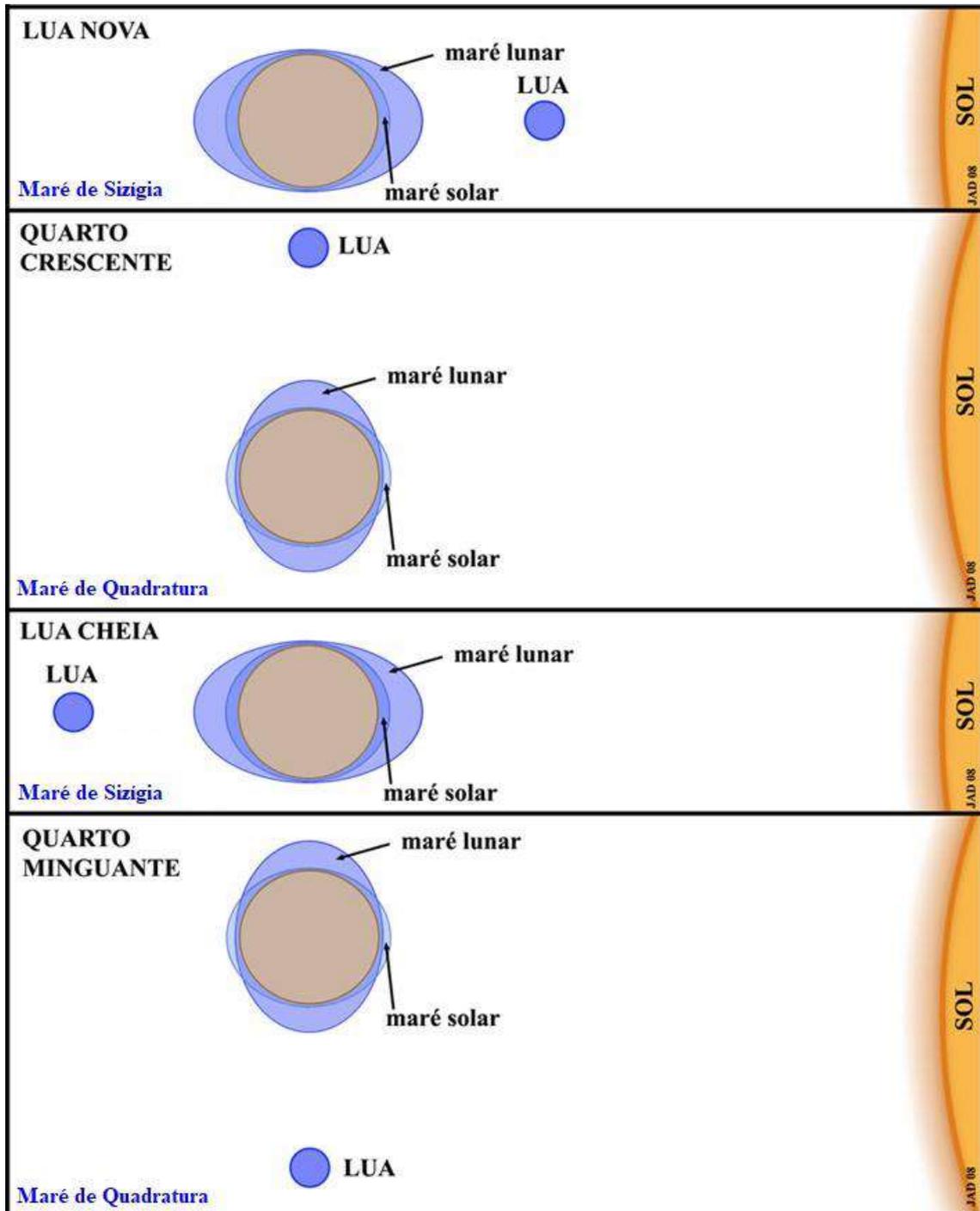


Figura 4 - Gráfico representativo das marés de sizígia e de quadratura.

As forças gravitacionais e centrífugas que atuam nos oceanos e formam as marés, são expressas como potencial de maré, que consiste em componente harmônicas, com diferentes períodos e fases, conhecidas como constituintes de maré.

Dessa forma, a mudança do nível do mar pode ser prevista, a través da soma dos componentes harmônicos, e definida pela formula (2.2).

$$\zeta(\phi, \lambda, t_i) = \zeta_0 + \sum_{j=1}^m A_j(\phi, \lambda) \cos[\omega_j t_i - G_j(\phi, \lambda)] \quad (2.2)$$

Onde:

ζ	=	Nível da maré observado no tempo t_i ;
ζ_0	=	Nível médio do mar;
$A_j(\phi, \lambda)$	=	Amplitude teórica;
ω_j	=	Frequência da onda de maré em radianos por unidade de tempo;
$G_j(\phi, \lambda)$	=	Fase de Greenwich;
j	=	Cada uma das constituintes;
i	=	Cada instante de tempo de previsão;
m	=	Número de constituintes considerados.

Os constituintes de maré são classificados pelo período em quatro grupos. Segundo o especificado por ROSMAN (2017):

1. Sobre-marés, do inglês *overtides*: também conhecidas como constante de águas rasas, são constituintes de maré com períodos menores do que 9 horas, produzidos por interação de determinadas constituintes com a batimetria local, comumente encontrada em estuários e águas rasas. Seus símbolos apresentam subscritos iguais ou maiores que 3, indicando que tem períodos menores que cerca de 1/3 do dia ou menores que cerca de 8 horas.
2. Semidiurnas: constituintes com períodos cerca de 12 horas, denotando subscrito 2, indicando que tem períodos na faixa de 1/2 dia.
3. Diurnos: constituintes com períodos de cerca de 24 horas, denotando subscrito 1.
4. Baixa frequência: constituintes com períodos entre dias e anos, não apresentam um padrão determinado em sua simbologia.

A classificação temporal de maré é obtida pelo cálculo da relação das amplitudes das principais constituintes harmônicas. A relação é quantificada pelo número de forma (DIETRICH *et al.*, 1975) é definida pela formula (2.3).

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \quad (2.3)$$

Onde:

- K_1 = Amplitude da componente lunar/solar diurna K_1 ;
- O_1 = Amplitude da componente principal lunar diurna O_1 ;
- M_2 = Amplitude da componente principal lunar semidiurna M_2 ;
- S_2 = Amplitude da componente principal solar semidiurna S_2 .

Dessa forma a maré classifica-se temporalmente como indica a Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação da maré segundo o Número de Forma, F.

Tipo de maré	Número de Forma, F
Semidiurna	0 - 0,25
Mista, principalmente semidiurna	0,25 - 1,5
Mista, principalmente diurna	1,5 - 3,0
Diurna	> 3,0

A maré semidiurna tem duas marés altas e duas marés baixas por dia, isto é, um período de 12 horas e 25 minutos. Por outro lado, a maré diurna tem apenas uma maré alta e uma maré baixa por dia, isto é, um período de 24 horas e 25 minutos. Finalmente as marés mistas têm características de marés semidiurnas e outras de marés diurnas, assim como é apresentado na Figura 5.

A diferença de níveis (H) entre marés altas e baixas consecutivas, classifica a maré nos seguintes regimes.

1. Regime de micro-maré: ($H < 2$ m).
2. Régime de meso-maré: ($2 < H < 4$ m).
3. Regime de macro-maré ($H > 4$ m).

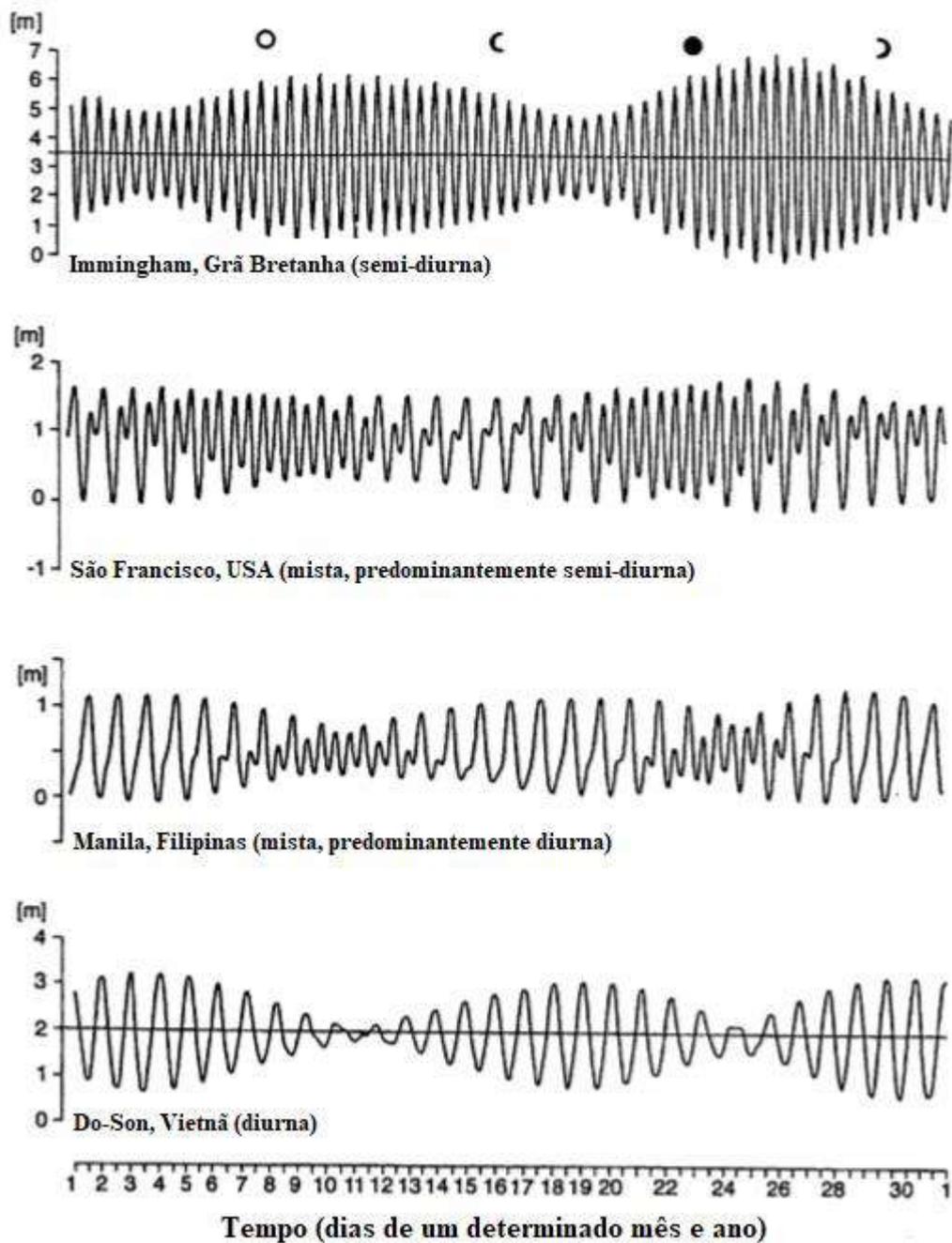


Figura 5 - Exemplos selecionados de curvas de maré de diferentes locais geográficos que ilustram os principais tipos de maré. **Fonte:** Adaptado de DIETRICH *et al.*, 1975 (a) maré semidiurna (e.g., Immingham, Grã-Bretanha; (b) maré mista, predominantemente semidiurna (e.g., São Francisco, USA); (c) maré mista, predominantemente diurna (e.g., Manila, Filipinas); (d) maré diurna (e.g., Do-Son, Vietnã).

3. Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho consiste na formulação de um modelo matemático para o problema que é definido, modelo que minimiza o custo de viagem, o qual é a soma dos custos de combustível e custo da espera. Sendo usado para este propósito uma ferramenta computacional de otimização, LINGO versão 10.0, para determinar o menor custo de viagem. Para a simulação computacional da circulação hidrodinâmica na Baía de São Marcos é utilizada uma ferramenta computacional, SisBaHiA, v. www.sisbahia.coppe.ufrj.br, com o qual obteve-se as curvas de maré e assim determinar os tempos que o navio espera para seu ingresso ao porto. Finalmente se apresenta o caso hipotético que utiliza uma maré ideal usada no trabalho realizado por NONNEMAN (1981), para analisar a profundidade requerida e disponível de água para o ingresso do navio ao porto.

O caso de estudo é apresentado no capítulo subsequente onde se põe em prática o estudado na metodologia.

3.1. Definição do Problema

O transporte marítimo é governado pelo transporte de carga através de navios por longas distâncias que enfrentam dois desafios importantes, otimizar custo e tempo. Não obstante, um efeito que se leva em consideração é o efeito estufa produzido pelos gases contaminantes.

A velocidade de navegação é quem tem a maior influência no consumo de combustível e é conhecido que quanto mais combustível é consumido no navio, mais CO₂ será produzido. O crescente aumento do preço do combustível marítimo que vem sendo observado ao longo dos últimos anos, fez com que grandes armadores optassem por operar seus navios em velocidade reduzida, a fim de reduzir os custos de combustível.

Deve-se ter conhecimento indispensável da variação do nível da água, especialmente em portos, porque em ocasiões um navio pode estar impedido de ingressar ao porto pela elevação de maré insuficiente, levando em consideração o calado do navio.

Nesse sentido, existe uma necessidade de resolver os problemas enfrentados na navegação de navios nos portos quando aparecem as variações de maré e tornam desfavoráveis à navegação.

3.1.1. Enunciado do problema

O problema consiste em encontrar a combinação de velocidades que otimize o custo total de viagem e reduza o tempo de espera, sendo conhecidos:

- 1) Um navio partindo desde um instante dado, com uma trajetória definida de 2000 milhas náuticas (mn) até o porto.
- 2) Principais características do navio, como calado, comprimento, porte bruto, curva do consumo do navio (relação entre velocidade e consumo específico de combustível), capacidade do tanque de combustível e capacidade do combustível de reserva.
- 3) Restrição de calado pela variação de maré no porto ao longo do tempo, ademais, a disponibilidade de berço em qualquer instante, para receber ao navio na chegada ao porto.

3.2. Modelo Matemático

O modelo matemático é formulado pelo enunciado do problema e, posteriormente, nas considerações explicativas onde são detalhados a função objetivo que minimiza o custo de viagem, e as restrições dos elementos da viagem.

3.2.1. Formulação do modelo matemático

O modelo matemático é declarado como segue:

Função objetivo:

$$\text{Minimizar (FUELCOST + WAITCOST) ,} \quad (1)$$

Condicionantes:

$$\sum_{s \in S} \text{speed}_s * \text{HOURS}_s \geq \text{distance} , \quad (2)$$

$$\text{FUELCONS} \geq \sum_{s \in S} \text{frate}_s * \text{HOURS}_s , \quad (3)$$

$$\text{FUELCONS} \leq \text{fuelcap} - \text{reserve_fuel} , \quad (4)$$

$$\text{FUELCOST} = \text{fuelcost} * \text{FUELCONS} , \quad (5)$$

$$\text{WAITCOST} = \text{anchorcst} * \text{WAITTIME} , \quad (6)$$

$$\text{se } (te_n \leq \sum_{s \in S} \text{HOURS}_s \leq tv_n) \text{ então } (\text{WAITTIME} = 0) , \quad (7)$$

$$\text{se } (tv_n < \sum_{s \in S} \text{HOURS}_s < te_{n+1}) \text{ então } (\text{WAITTIME} = te_{n+1} - \sum_{s \in S} \text{HOURS}_s) , \quad (8)$$

$$\text{HOURS}_s, \text{ WAITTIME} \geq 0 , \forall s \in S \quad (9)$$

3.2.2. Considerações sobre a formulação do modelo

Função objetivo (1) representa custo de viagem, de combustível e de espera desde o mar aberto ao porto. A restrição (2) garante que a distância pode estar coberta pela variação de velocidade e o intervalo de tempo gasto em cada velocidade. Restrições (3) e (4) definem limites superiores e inferiores, respectivamente, para o consumo de combustível. Restrições (5) e (6) definem o custo de combustível e custo de espera, respectivamente. A restrição (7) assegura que à entrada do porto, o navio não precisa esperar. A restrição (8) define o valor do tempo de espera quando o navio chega ao porto no intervalo de tempo que a profundidade mínima requerida para seu ingresso é maior que a profundidade disponível. A restrição (9) define o domínio das variáveis de decisão.

O modelo matemático baseia-se principalmente, no aporte de dois trabalhos: o estudo de NONNEMAN (1981) que apresenta um procedimento para reduzir o tempo

de espera em função do ciclo de maré, e o estudo de BROWN *et al.*, (2007) que opera o navio com uma ou mais das suas unidades de propulsão para economizar combustível.

NONNEMAN (1981) trabalhou com uma maré ideal com a mesma altura de preamar e período de 12 horas. Por outro lado, a presente dissertação considera as características específicas de maré num porto. BROWN *et al.*, (2007) aplica programação linear para otimizar o consumo de combustível, de modo de manter uma velocidade média no planejamento de uma viagem, num período de tempo específico. Da mesma forma o presente documento utiliza uma ferramenta de otimização para apresentar que além de viajar a velocidade reduzida, utilizar uma combinação ótima de velocidades gera uma economia no consumo de combustível.

3.3. Implementação computacional

Para minimizar o consumo de combustível na viagem, foi implementado o programa Lingo de otimização, e para obter as curvas de maré no porto se utilizou a ferramenta computacional SisBaHiA que são explicados seguidamente.

3.3.1. Programa Lingo

Segundo o manual do usuário do Lingo, versão 10; este programa é uma ferramenta para utilizar o poder da otimização linear e não linear para formular problemas grandes de forma resumida, resolvê-los, e analisar a solução. A otimização ajuda a encontrar a resposta que produz o resultado desejado.

O modelo matemático estabelecido é implementado no programa para ser resolvido da seguinte forma:

- Define-se os parâmetros que são incluídos no modelo matemático.
- A seguir define-se o conjunto de dados de entrada, os quais são fornecidos pelo usuário do programa, e os dados de saída, que o programa vai calcular como a resposta para otimizar a função objetivo.

- Posteriormente se escreve a função objetivo, que para o nosso problema trata-se de minimização de custos.
- Insere-se as condicionantes às quais a função objetivo está sujeita, e restringem às variáveis de saída.
- E finalmente o programa calcula os dados de saída do problema.

3.3.2. Sistema de modelagem SisBaHiA

SisBaHiA é um sistema profissional de modelos computacionais registrado pela Fundação Coppeltec, órgão gestor de convênios e contratos de pesquisa da COPPE/UFRJ - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Amplos detalhes estão disponíveis na página www.sisbahia.coppe.ufrj.br, segue uma breve apresentação.

Novas versões do SisBaHiA têm sido continuamente implementadas na COPPE/UFRJ desde 1987, com aplicações de escopo e aperfeiçoamentos feitos através de dissertações de mestrado, teses de doutorado, além de projetos de pesquisa. O sistema tem sido adotado em dezenas de estudos e projetos contratados à Fundação Coppeltec envolvendo modelagem de corpos de água naturais.

O SisBaHiA possui os seguintes módulos:

1. Modelo Hidrodinâmico;
2. Modelo de Transporte Euleriano;
3. Modelo de Qualidade de Água e Eutrofização;
4. Modelo de Transporte de Sedimentos e Evolução Morfológica do Fundo;
5. Modelo de Transporte Lagrangeano – Determinístico;
6. Modelo de Transporte Lagrangeano – Probabilístico;
7. Modelo de Transporte Lagrangeano de Campo Próximo para emissários e Fontes Pontuais;
8. Modelos de Geração de Ondas;
9. Modelo de Propagação de Ondas;
10. Ferramenta de Análise e Previsão de Marés.

3.4. Caso hipotético

Para o caso hipotético foi usado como referência uma maré sintética para analisar a disponibilidade de água suficiente para o calado do navio. Maré sintética que foi utilizada no estudo realizado por NONNEMAN (1981), onde se faz uma análise para um navio se aproximando ao porto. O estudo se centra numa economia no tempo de espera apresentando fórmulas aproximadas do tempo de espera como consequência do incremento da profundidade de um ciclo de maré.

O navio tem incerteza na hora de chegada, é por isso que se o navio chega ao porto quando a profundidade disponível é maior que a profundidade requerida, então será atendido. Caso contrário, o navio terá que esperar até o instante no qual as condições de ingresso sejam favoráveis.

A profundidade disponível ao longo do tempo é dada pela expressão (3.1):

$$h_t = h^o + \frac{r \cos\left(\frac{t\pi}{6}\right)}{2} \quad (3.1)$$

Onde:

- h_t = Profundidade disponível no instante t [m];
- h^o = Profundidade média [m];
- r = Amplitude da maré [m];
- t = Instante de tempo [h].

A profundidade requerida para o ingresso seguro de navios no porto é aproximada pela fórmula (3.2) UNCTAD, (1977).

$$d_t = \sqrt{S_t} + 6.5 \quad (3.2)$$

Onde:

- d_t = Profundidade requerida para o ingresso seguro ao porto [m];
- S_t = Porte bruto do navio em milhares [dwt].

A formula (3.2) é uma aproximação razoável para menos de um metro do calado requerido ao longo do intervalo de 10000 a 500000 dwt para navios graneleiros secos e líquidos, tendo em consideração o Efeito Squat⁴.

Como consequência, navios com porte bruto maiores que \underline{S} e menores que \bar{S} estão potencialmente sujeitos à espera, até que a subida da maré seja suficiente.

O tamanho máximo do navio, é derivado das formulas (3.1) e (3.2);

$$\bar{S} = (h^o + \frac{r}{2} - 6,5)^2 \quad (3.3)$$

Os navios menores que \underline{S} podem ingressar ao porto a qualquer momento porque não dependem da espera de maré. O tamanho mínimo do navio é obtido também derivando as formulas (3.1) e (3.2);

$$\underline{S} = (h^o - \frac{r}{2} - 6,5)^2 \quad (3.4)$$

A Figura 6 representa a variação da profundidade no ciclo de maré (Fig. 6b) e profundidade em relação ao tamanho do navio (fig. 6a). Os períodos de tempo entre $[0; \Phi] \cup [12-\Phi; 12]$ representam os intervalos de tempo de entrada de navios de tamanho S ao porto. No estudo realizado por NONNEMAN (1981), a maré sintética tem um ciclo de 12 horas.

A equação (3.5) representa o instante de tempo que inicia a restrição de calado do navio, porque a profundidade requerida é maior que a profundidade disponível.

$$\Phi = \frac{6 \arccos\left(\frac{\sqrt{S_t} + 6.5 - h^o}{r/2}\right)}{\pi} \quad (3.5)$$

⁴ Efeito Squat - Trata-se da diminuição da altura livre entre o casco e o leito do curso navegado. Não é teoricamente um aumento do calado. O efeito aplica-se somente a embarcações de casco deslocante, em movimento, e refere-se a calado de casco. Em calado de quilha o efeito pode ser quase imperceptível já que o deslocamento é bem menor.

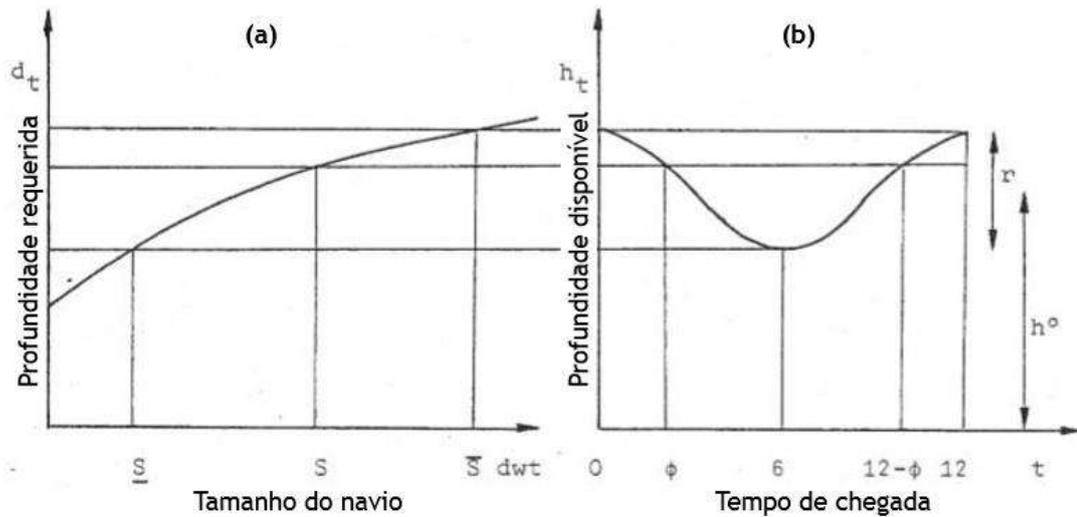


Figura 6 - (a) Relação do tamanho do navio e a profundidade requerida, (b) o ciclo de maré assumido. **Fonte:** Ilustração retirada de (NONNEMAN, 1981).

3.4.1. Resultados

No caso hipotético se utilizou um navio com características similares ao que será usado no caso de estudo em sua chegada ao porto, com valores de amplitude de maré e profundidade média muito similares no caso real.

Foram considerados os seguintes valores de entrada:

$$h^o = 15,5 \text{ m}$$

$$r = 6 \text{ m};$$

$$S_t = 100000 \text{ dwt.}$$

E obtemos os seguintes resultados das equações (3.2), (3.3), (3.4) e (3.5):

$$d_t = 16,5 \text{ m};$$

$$\bar{S} = 144000 \text{ dwt};$$

$$\underline{S} = 36000 \text{ dwt};$$

$$\Phi = 2.351 \text{ horas (2 horas e 21 minutos 03 segundos).}$$

Segundo os valores de entrada inseridos na equação (3.2) o navio requer de uma profundidade para ingresso seguro ao porto de 16,5 m, portanto só pode ingressar no porto nos intervalos que mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Intervalos de tempo que o navio de 100000 DWT pode ingressar ao porto.

Intervalos de tempo (h)	Navio de 100 000 dwt pode ingressar no porto
00:00:00 – 02:21:03	SIM
02:21:04 – 09:38:56	NÃO
09:38:57 – 12:00:00	SIM

3.4.2. Conclusões

No segundo intervalo da Tabela 2, a duração é de 7 horas, 17 minutos e 52 segundos que o navio não pode ingressar ao porto pela restrição de calado, porque seria um prejuízo para o armador caso o navio encalhe no trajeto.

Navios com porte bruto inferiores a 36000 dwt poderão ingressar ao porto sem nenhuma restrição de profundidade.

Navios com porte bruto maiores a 144000 dwt não deverão ingressar ao porto sob quaisquer das circunstâncias.

A variante do modelo de otimização baseia-se no ciclo das marés descrito no trabalho de NONNEMAN (1981). Para aplicação a um ciclo de maré num porto real, como Baía de São Marcos, precisa ser modificado porque as alturas de maré variam no decorrer do tempo. No entanto, a estrutura do modelo é mantida.

4. Caso de estudo

O litoral do Brasil tem uma extensão de aproximadamente 7500 km. As marés são semi-diurnas e mistas, com predomínio das semi-diurnas. As condições de macro-maré são vistas na costa da Amazônia, que inclui os estados de Pará, Amapá e Maranhão (GORBEÑA, 2013).

Na Baía de São Marcos a média da amplitude de maré é de 6,6 m, entretanto pela adjacência da linha do Equador e durante a sizígia, a amplitude alcança a altura de 7,2 m (FEITOSA, 1989), não obstante, na maior parte do tempo as amplitudes de marés são inferiores a 5,5 m (PORTOBRÁS, 1988).

4.1. Navio utilizado

O navio utilizado é um minério Aframax MINERVA ALEXANDRA como se apresenta na Fig. 7, embarcação típica que navega pela Baía de São Marcos, e cujas características principais são apresentadas na Tabela 3.



Figura 7 - Navio de minério Aframax MINERVA ALEXANDRA.

Tabela 3 - Características principais do navio Mineiro Aframax MINERVA ALEXANDRA.
Fonte: www.minervamarine.com, 10/2017.

Grandeza	Unidade	Valor
Comprimento total (L_{OA})	[m]	243,56
Boca (B)	[m]	42
Calado (T)	[m]	14,72
Porte bruto	[dwt]	104643,2

4.2. Trajetória desde mar aberto

No trajeto desde o ponto inicial em mar aberto até a entrada da baía, não está se considerando alguns fatores como correntes oceânicas, sinistros naturais, etc. Quando o navio ingressa à baía até o porto são tomados em consideração efeitos hidrodinâmicos como as elevações de maré nas estações Entrada da Baía e Porto.

A Figura 8 mostra o trajeto do navio nas 2000 milhas náuticas (mn) desde mar aberto até o Porto de Itaqui na Baía de São Marcos.

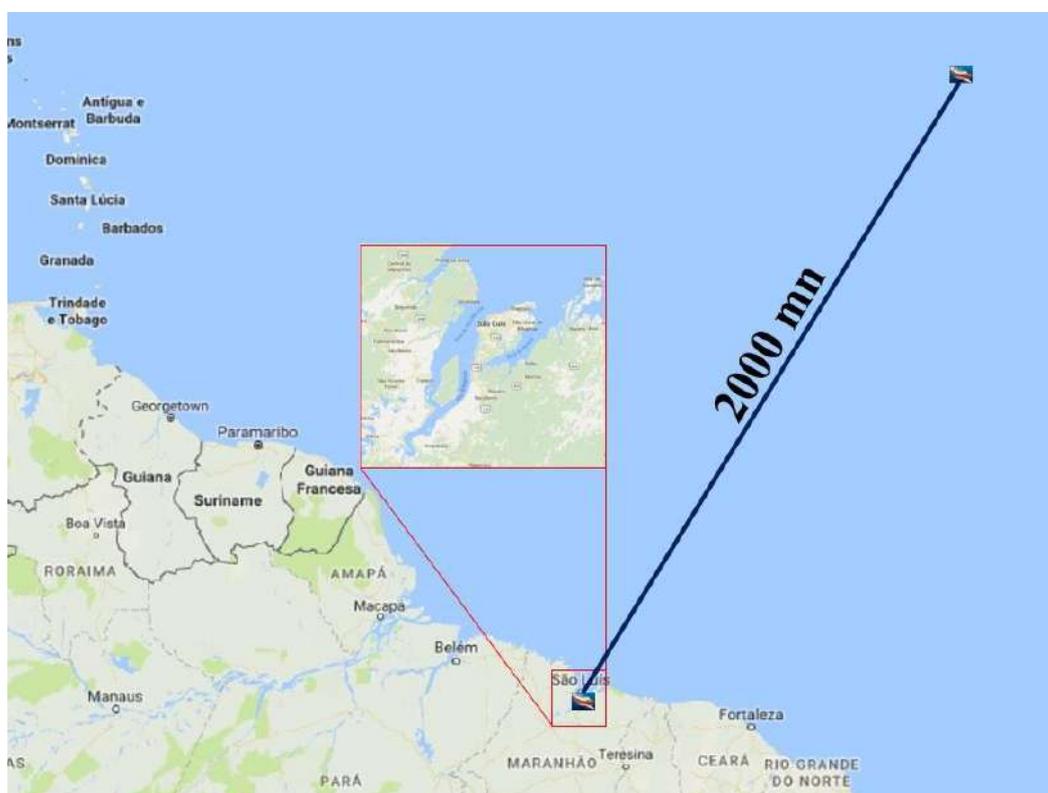


Figura 8 - Ilustração do deslocamento do navio nas 2000 mn de trajetória desde mar aberto até o Porto de Itaqui na Baía de São Marcos. **Fonte:** Google Maps 10/2017.

As características do navio como a capacidade do combustível principal, combustível de reserva e custo de combustível por unidade de volume são apresentados na Tabela 4 e, utilizando as curvas do consumo específico de combustível em relação à velocidade que se apresenta na Figura 9 (BROWN *et al.*, 2007) obtêm-se os resultados no capítulo 5 dos valores das combinações de velocidades que otimizam o consumo de combustível.

Tabela 4 - Características do navio.

Combustível principal	300000 gal.
Combustível de reserva	30000 gal.
Custo de combustível/gal.	1,67 US\$/gal.

Classe DDG 51 (FLT I & II)
Consumo total de combustível no navio (GPH)
(Sem aba de popa)

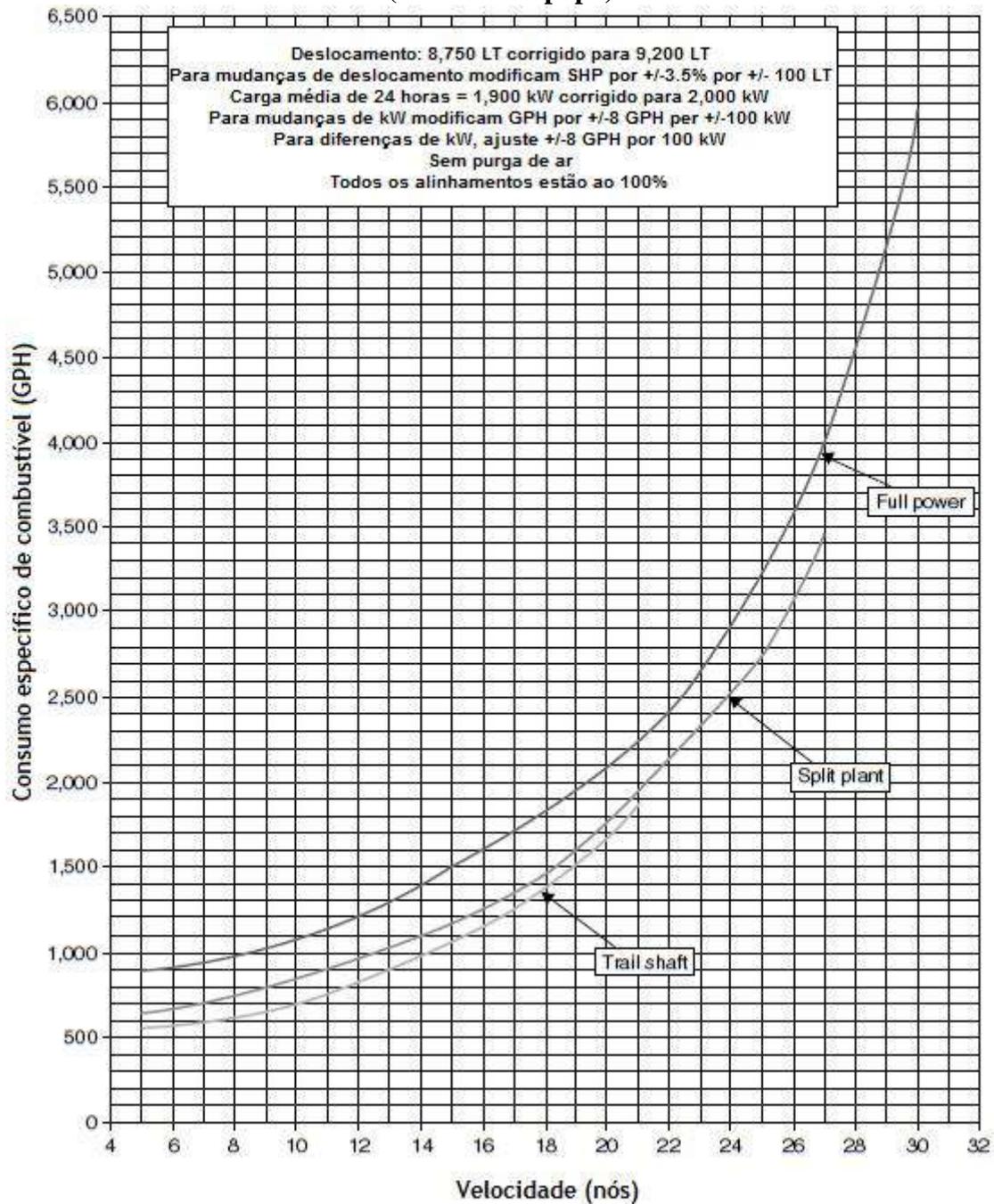


Figura 9 - Ilustração da relação entre o consumo específico de combustível para cada velocidade. **Fonte:** Adaptado de BROWN *et al.*, 2007.

É extraído da Figura 9 para cada intervalo de velocidade o menor consumo específico de combustível de cada um dos três modos de operação, que é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Modos de operação do navio que são utilizados em cada intervalo de velocidade para otimizar o consumo de combustível na viagem. **Fonte:** Adaptado de BROWN *et al.*, 2007.

Modo de operação	Velocidade (nós)
<i>Trail-shaft</i> ⁵	5 - 21
<i>Split-plant</i> ⁶	22 - 27
<i>Full-power</i> ⁷	28 - 30

Cada valor extraído da Figura 9 é apresentado na Tabela 6 que mostra cada um dos valores do consumo de combustível e custo da viagem de 2000 mn considerando que o navio se desloca a velocidade constante em todo o trajeto, e que não tem limitações no tanque de combustível.

Na Tabela 6 se observa que o intervalo de tempo para realizar a viagem é no mínimo 66,67 horas e no máximo 400 horas. Trabalhar com uma menor quantidade de horas é inviável pela limitação da velocidade, e prolongar o tempo a mais de 400 horas, indica que o navio ficará parado por algum tempo ou que mudará sua trajetória, condições que não fazem parte deste estudo, tal como se indicou anteriormente.

Da Tabela 6 são extraídos os valores do consumo específico de combustível, tempo de viagem, o consumo de combustível e o custo total de combustível na viagem de 2000 mn para cada velocidade. Além disso pode-se observar que se o navio se desloca a 12 nós, usará menos combustível para chegar a seu destino e também, o custo será menor.

⁵Trail-shaft – Modo de operação do navio no qual uma das quatro turbinas está funcionando dirigindo um dos dois eixos, enquanto o outro eixo está parado.

⁶Split-plant – Dois motores estão funcionando, cada um conduzindo um eixo.

⁷Full-power – Todas as quatro turbinas estão funcionando, com duas turbinas acionando cada eixo.

Tabela 6 - Consumo de combustível em galões e custo de combustível em US\$ na viagem.
Fonte: Adaptado de BROWN *et al.*, 2007.

Velocidade (nós)	Consumo específico de combustível (GPH)	Tempo de viagem (h)	Consumo de combustível (gal.)	Custo total de combustível (US\$)
5	560	400,00	224000,00	374080,00
6	575	333,33	191666,67	320083,33
7	595	285,71	170000,00	283900,00
8	610	250,00	152500,00	254675,00
9	650	222,22	144444,44	241222,22
10	700	200,00	140000,00	233800,00
11	760	181,82	138181,82	230763,63
12	820	166,67	136666,67	228233,33
13	900	153,85	138461,54	231230,76
14	985	142,86	140714,29	234992,85
15	1060	133,33	141333,33	236026,66
16	1150	125,00	143750,00	240062,50
17	1240	117,65	145882,35	243623,52
18	1380	111,11	153333,33	256066,66
19	1510	105,26	158947,37	265442,10
20	1670	100,00	167000,00	278890,00
21	1860	95,24	177142,86	295828,57
22	2140	90,91	194545,45	324890,90
23	2340	86,96	203478,26	339808,69
24	2515	83,33	209583,33	350004,16
25	2735	80,00	218800,00	365396,00
26	3070	76,92	236153,85	394376,92
27	3450	74,07	255555,56	426777,77
28	4535	71,43	323928,57	540960,71
29	5135	68,97	354137,93	591410,34
30	5950	66,67	396666,67	662433,33

Posteriormente são apresentadas e explicadas as ilustrações do consumo específico de combustível, tempo de viagem e consumo de combustível em relação à velocidade desde a Figura 10 até a Figura 12, exibindo valores discretos por considerar cada uma das velocidades da Tabela 6. Por outro lado, a Figura 13 mostra o consumo de combustível em relação ao tempo de viagem exibindo valores contínuos. O intuito de exibir cada gráfico de dispersão, é analisar o comportamento dos dados, isto é a linha de tendência de cada figura.

A Figura 10 mostra o menor consumo específico de combustível dos três modos de operação para cada velocidade, representado em círculo o modo de operação *Trail-shaft*, em triângulo o modo *Split-plant* e em quadrado o modo *Full-power*. A ilustração exhibe a tendência exponencial desenvolvida por (MANNING,1956; AVI-ITZHAK, 1974; ARTZ JUN, 1975).

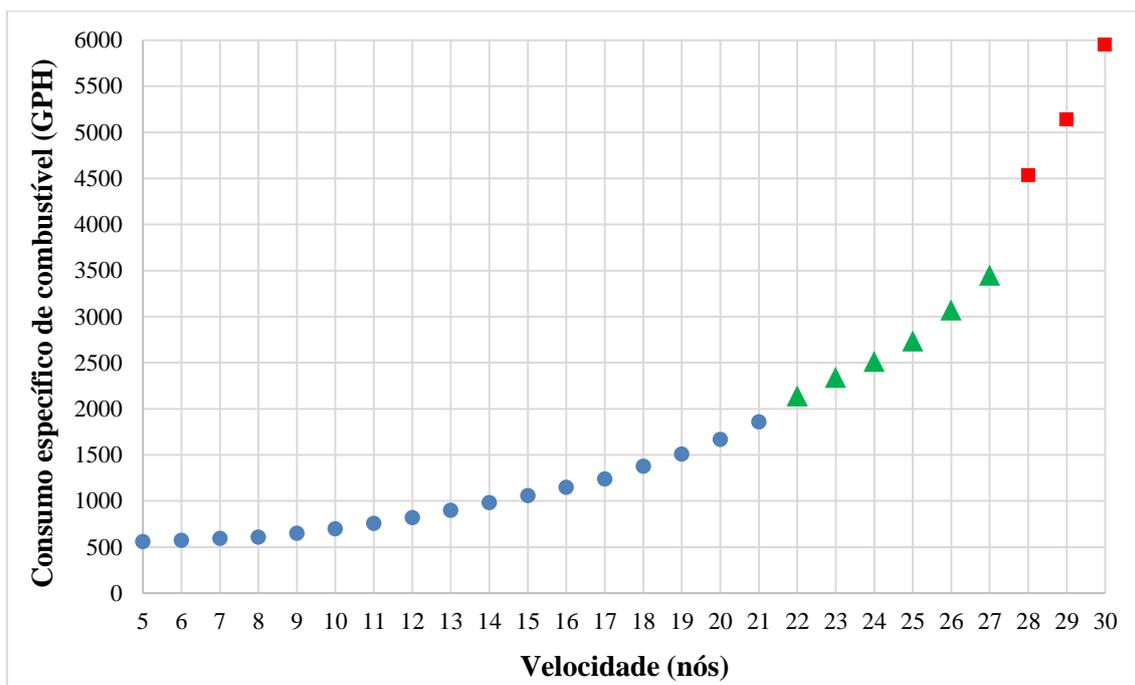


Figura 10 - Ilustração do consumo específico de combustível para cada velocidade na viagem.

A Figura 11 associa o tempo de viagem a velocidade constante, e mostra-se o tempo de viagem mínimo de 66,67 horas à velocidade máxima de 30 nós até o tempo de viagem máximo de 400 horas à velocidade mínima de 5 nós. Pode-se observar claramente que a medida que aumentamos a velocidade de navegação, o tempo de viagem diminui.

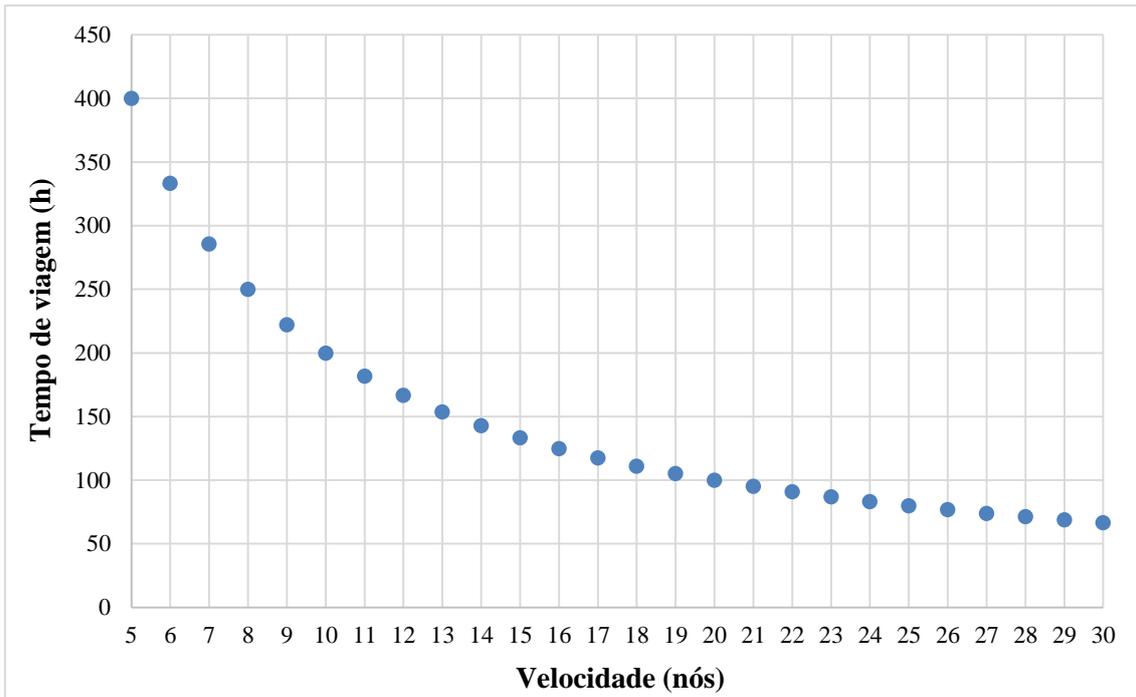


Figura 11 - Ilustração do tempo de viagem para cada velocidade.

A Figura 12 compara a velocidade de navegação e o combustível consumido na viagem, e exibe-se que se o navio consome menos combustível quando navega a 12 nós. Em qualquer outra condição de velocidade o consumo é maior.

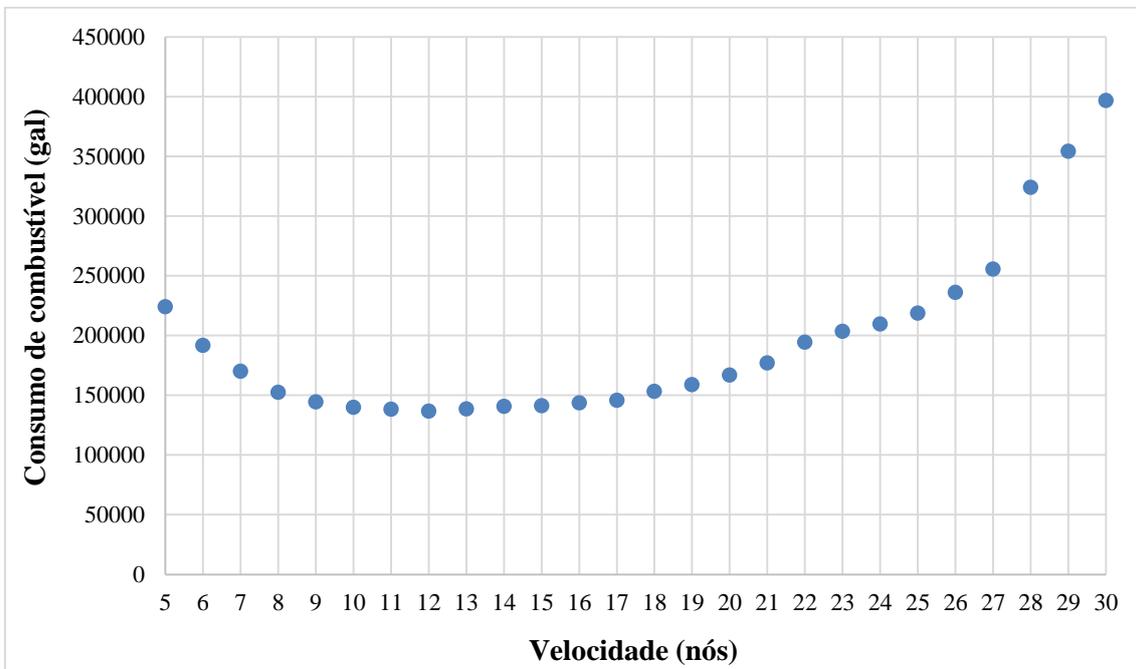


Figura 12 - Ilustração do consumo de combustível para cada velocidade.

A Figura 13 mostra a redução do consumo de combustível quando se utiliza maior tempo para a viagem, considerando que o navio viaja a velocidade constante no trajeto. Assim, apresenta um padrão decrescente que indica que quanto é empregado maior tempo na viagem, teve redução de velocidade e como consequência, diminuirá o consumo de combustível, o que representa o conceito de “*Slow Steaming*”.

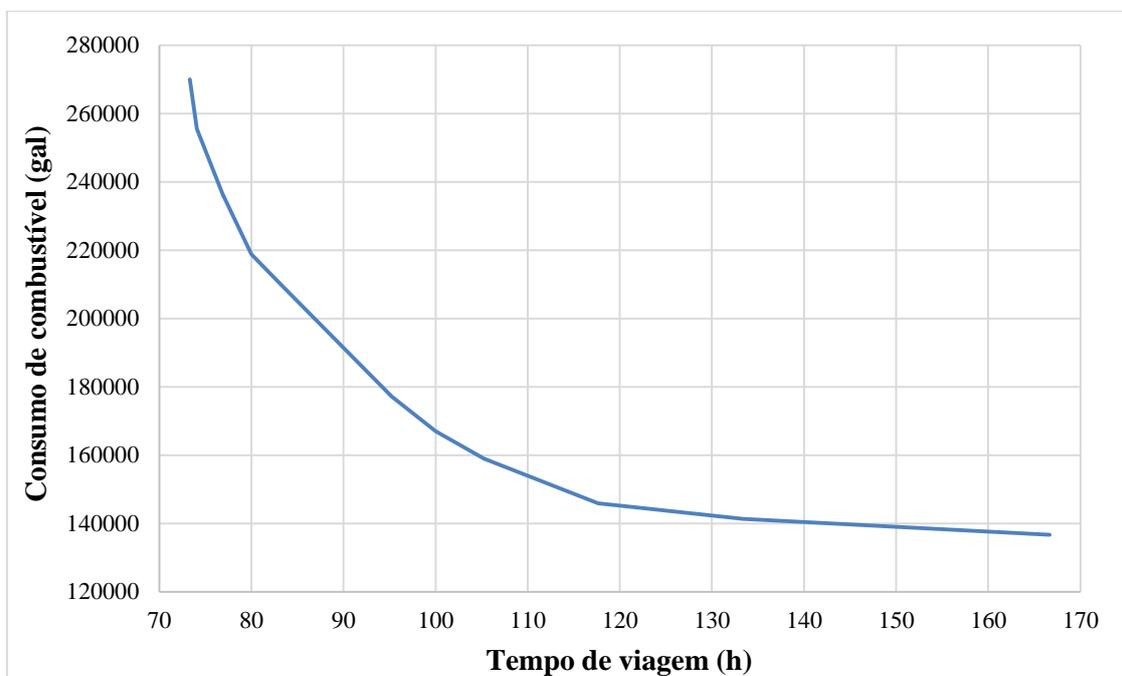


Figura 13 - Ilustração do consumo de combustível para cada tempo utilizado na viagem a velocidade constante.

4.3. Ingresso à Baía de São Marcos

O navio ingressa na Baía de São Marcos pela estação Entrada à Baía e percorre 24 mn até seu arribo à Estação Porto. O interesse neste percurso na baía é devido às alturas de maré, dado que as considerações a tomar são a segurança e integridade do navio no ingresso ao porto. Fez-se uso do modelo hidrodinâmico na Baía de São Marcos de níveis e correntes de maré, à luz de um projeto elaborado por ROSMAN *et al.*, (2016).

Na Figura 14 apresentam-se o trajeto do navio no canal de acesso no ingresso ao porto, as isolinhas de batimetria, a malha que foi gerada para fazer o análise hidrodinâmico na Baía de São Marcos e duas estações: Entrada à Baía e Porto.

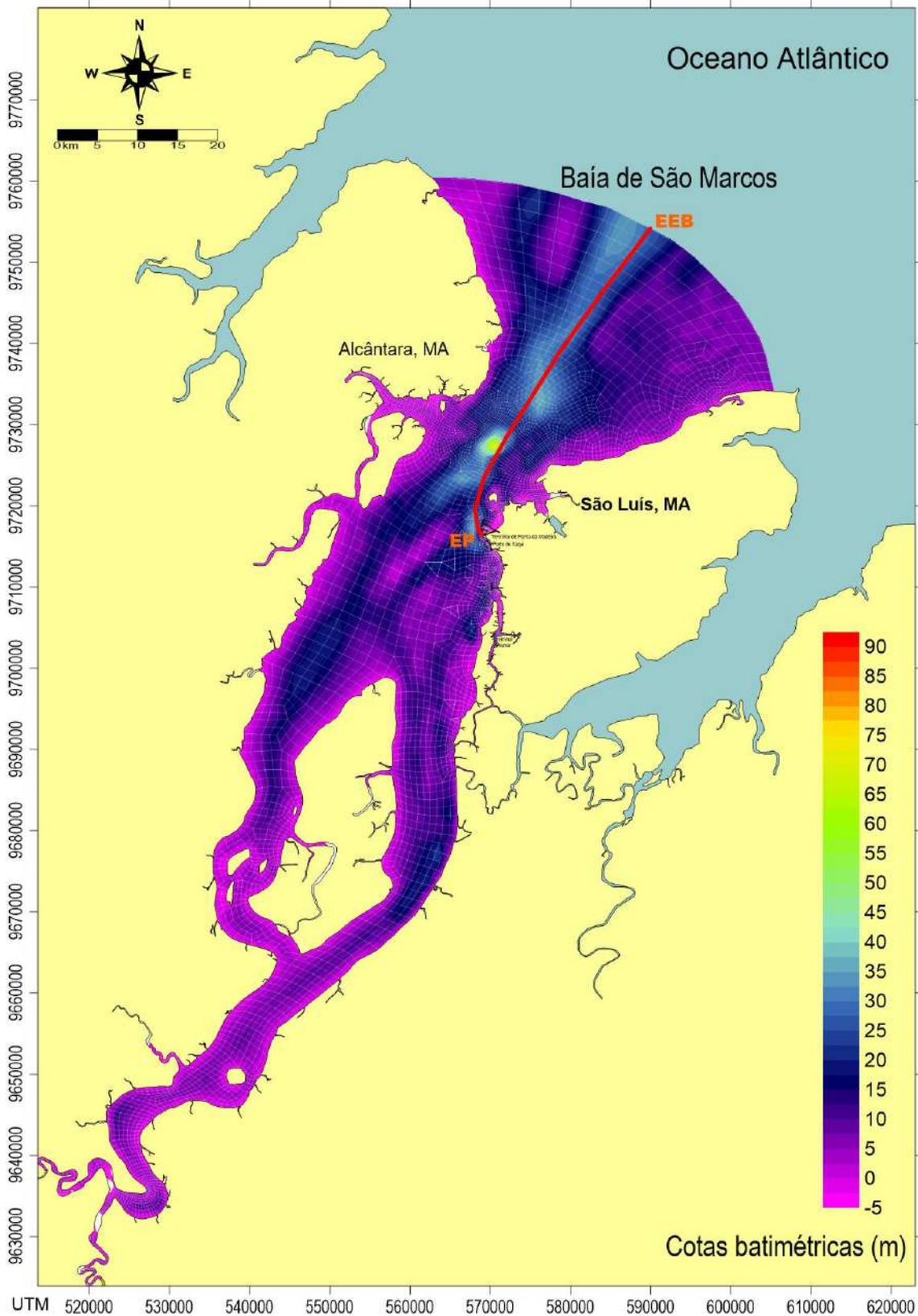


Figura 14 - Mapa da Baía de São Marcos com discretização em malhas de elementos finitos, e isolinhas de batimetria mostrando o trajeto do navio no canal de acesso no ingresso ao porto e duas estações usadas para o análise hidrodinâmica: Estação Entrada da Baía e Estação Porto. **Fonte:** Adaptado de ROSMAN *et al.*, 2016.

No modelo da Baía de São Marcos realizado por ROSMAN *et al.*, (2016), adotou-se o período equinocial⁸ de 15 a 31 de março de 2015. Apresenta-se na Figura 15, as curvas de maré em azul e vermelho que representam as elevações na entrada da fronteira do domínio de modelagem e no porto de Itaqui respectivamente.

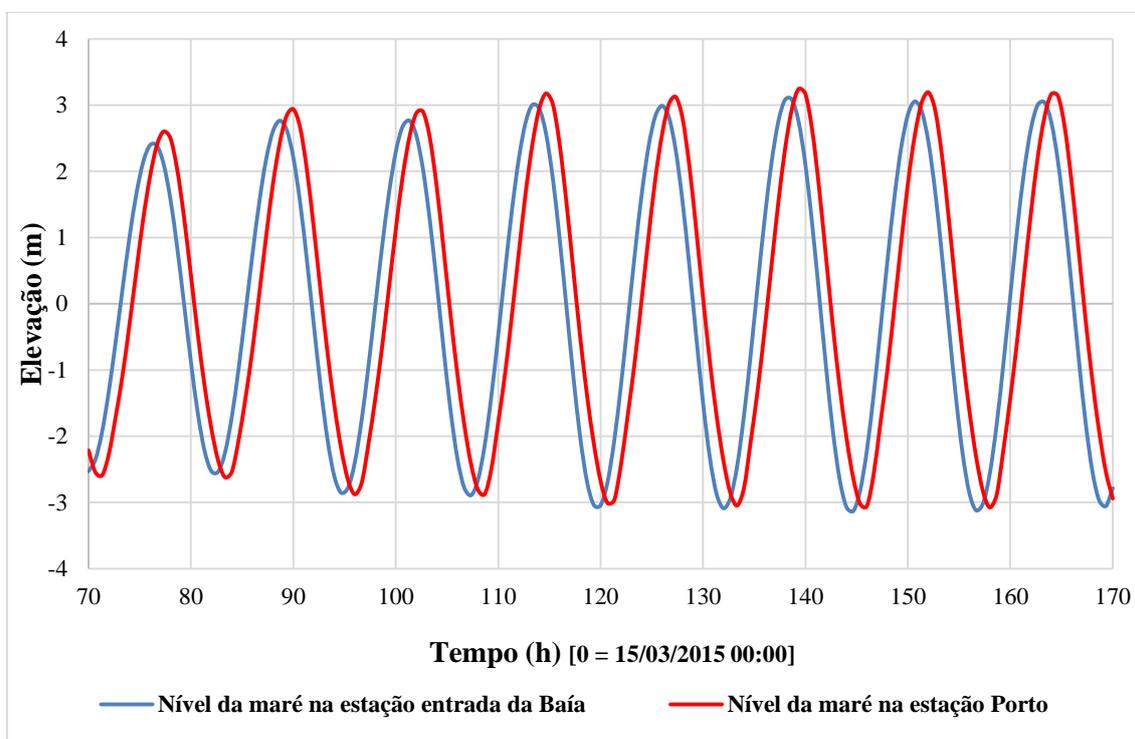


Figura 15 - Ilustração das elevações de maré nas estações Entrada da Baía e Porto. **Fonte:** Adaptado de ROSMAN *et al.*, 2016.

Os tempos de resultado de modelagem, por serem gravados em intervalos regulares de 40 minutos, não correspondem exatamente aos instantes das fases de maré listadas no Porto de Itaqui, mas são próximos suficiente para caracterizá-las. Aliás, aplicando o critério de Nyquist⁹, um intervalo de amostragem de uma hora é suficiente para detectar os constituintes de maior frequência com interesse em estudos práticos de maré (ROSMAN, 2017 *apud* FORRESTER, 1983).

⁸ Período equinocial - Nos períodos equinociais as marés de sizígia são as máximas alturas anuais.

⁹ Teorema de Nyquist - Define que a quantidade mínima de amostras que devem ser obtidas de um sinal contínuo a ser amostrado deve ser duas vezes a maior frequência deste sinal, a fim de ser possível sua recuperação

A continuação, apresenta-se o sétimo dia de estudo na Figura 16, onde a diferença entre os instantes das fases de maré nas duas estações, é de aproximadamente uma hora. No entanto, a análise está focada no porto de Itaquí, por essa razão o estudo das curvas de maré que são analisados é na estação Porto. Ademais, toma-se em consideração que no instante: 158 horas, exibe-se a menor elevação das curvas de maré da estação Porto, isto é -3,08 m abaixo do nível médio. Indicando assim que o estudo considera a menor elevação das curvas de maré dos 17 dias estudados.

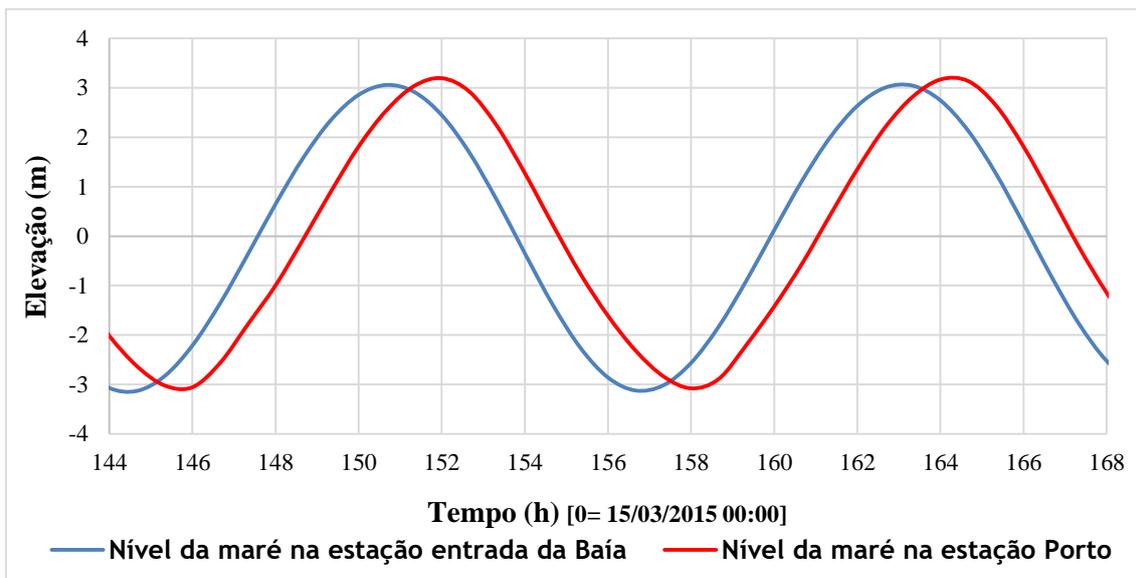


Figura 16 - Ilustração das diferenças de fase e amplitudes de onda de maré das estações Entrada da Baía e Porto no sétimo dia. **Fonte:** Adaptado de ROSMAN *et al.*, 2016.

O navio tem restrições pelo tanque de combustível, por esse motivo não pode navegar as 2000 mn em 66,67 horas (30 nós), dado que excederia a capacidade do tanque. Portanto, o navio utiliza como mínimo 73,32 horas (uma combinação de 30 e 27 nós), e um máximo de 166,67 horas se viaja a 12 nós, desse modo, otimiza o consumo de combustível que iria desde 136666,7 até 269920,7 galões de combustível.

4.3.1. Elevação requerida para ingresso ao porto

A disponibilidade de calado é representada pela variação de maré na Baía de São Marcos, como discutido acima. É de ressaltar que para um caso real a variação da maré no

porto é expressa por uma série de constantes harmônicas particulares do referido porto, tal como se exhibe na Figura 17.

Por esse motivo, é que o modelo simplificado de NONNEMAN (1981), não pode ser considerado para o caso real, dado que no caso de estudo a série de maré foi representada unicamente pela constante harmônica M2.

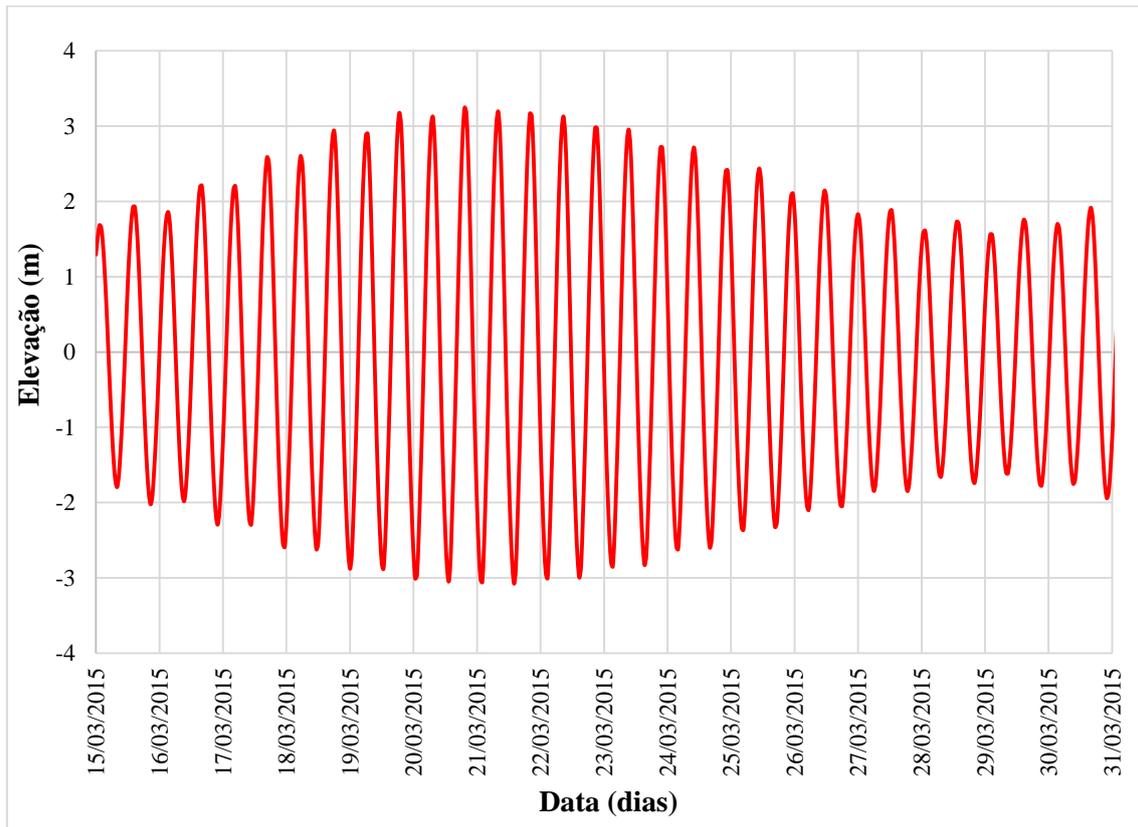


Figura 17 - Ilustração da série temporal de níveis de maré na Estação Porto. **Fonte:** Adaptado de ROSMAN *et al.*, 2016.

Dado que se pretende determinar a elevação requerida, iguala-se a profundidade disponível e profundidade requerida das equações (3.1) e (3.2), exibidas na Figura 6. Dessa forma, obtém-se valor da elevação mínima requerida para o ingresso ao porto, em relação aos valores do porte bruto do navio e profundidade média.

A equação (4.1) representa a elevação requerida:

$$e_r = \sqrt{S_t} + 6.5 - h^o \quad (4.1)$$

Onde:

- e_r = Elevação requerida [m];
- S_t = Porte bruto do navio em milhares [dwt];
- h^o = Profundidade média [m];

Baseado na Figura 6b, da profundidade disponível em relação ao tempo, onde se exibem duas preamares consecutivas com a mesma elevação, se apresenta a Figura 18 que mostra um fragmento extraído da série temporal da Figura 17, desde uma baixa-mar a outra consecutiva.

Onde:

- e_p = Elevação na preamar [m];
- e_r = Elevação requerida [m];
- e_{b1} = Elevação na primeira baixa-mar ao início da enchente [m];
- e_{b2} = Elevação na segunda baixa-mar ao final da vazante [m];
- t_{n-1} = Instante de tempo no início da enchente [h];
- t_n = Instante de tempo da preamar [h];
- t_{n+1} = Instante de tempo no final da vazante [h];
- t_e = Instante inicial da elevação requerida [h];
- t_v = Instante final da elevação requerida [h];

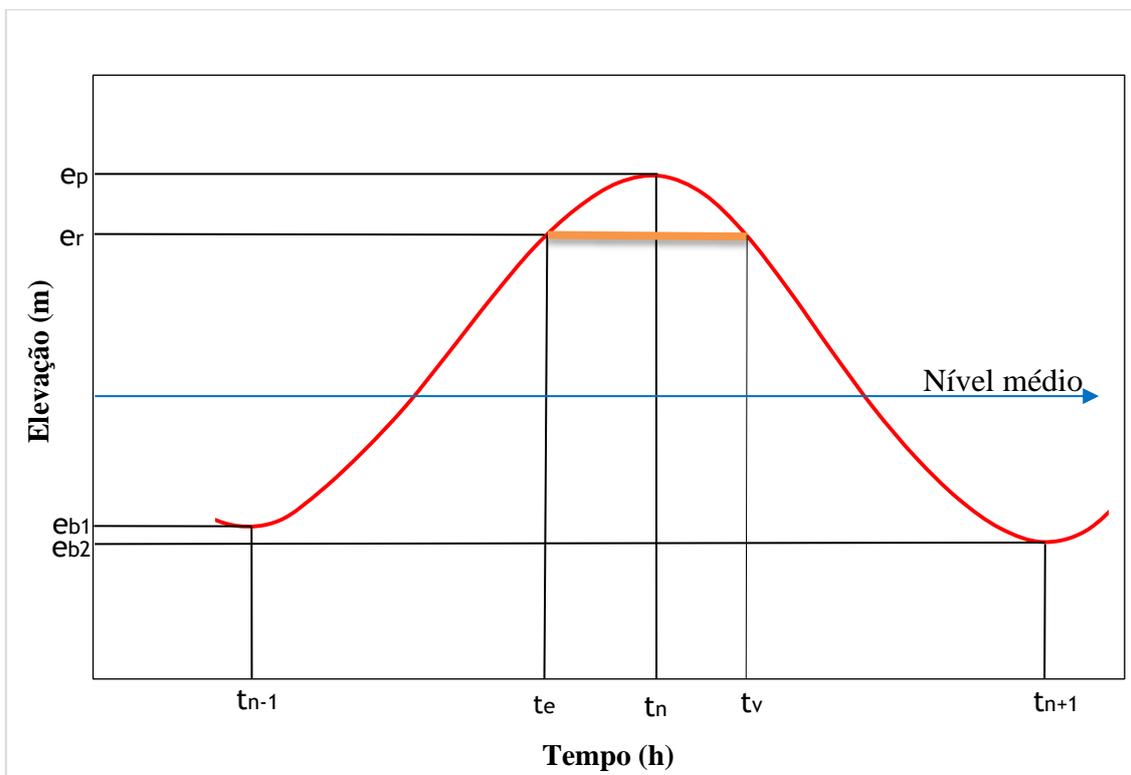


Figura 18 - Ilustração generalizada de duas baixas-mares consecutivas para assim obter o tempo inicial e final do ingresso seguro do navio ao porto.

A fim de fazer o análise por separado para uma maré de enchente e uma de vazante, a Figura 18 é dividida nas Figuras 19 e 20 respectivamente.

4.3.2. Instante inicial da elevação requerida na enchente

A Figura 19 apresenta uma maré de enchente com valores de elevação e tempo próprios, para assim obter o instante inicial da elevação requerida.

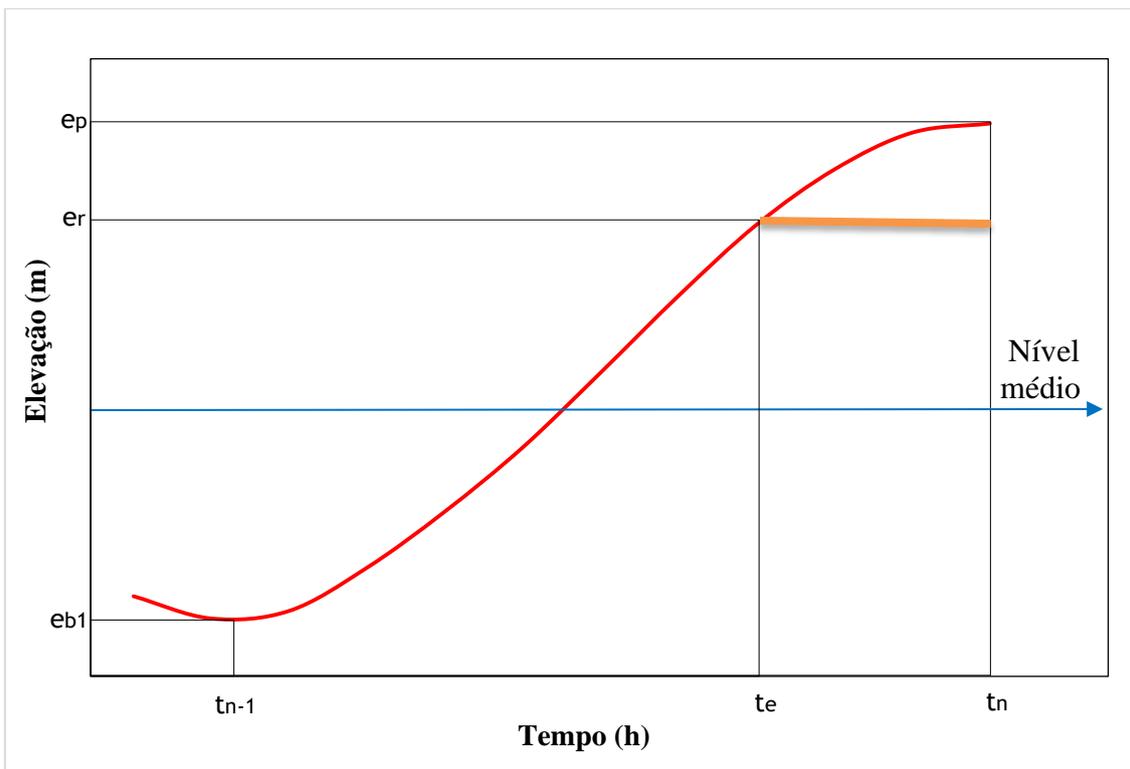


Figura 19 - Ilustração generalizada de uma maré de enchente.

Trabalhando esse fragmento de maré como uma função senoidal é obtida a equação (4.2):

$$e = \frac{r_e}{2} (\cos(-\omega_e(t - t_n)) + c_e) \quad (4.2)$$

Desde que o instante inicial da elevação requerida t_e é resolvida, e expressada na equação (4.3):

$$t_e = -\frac{\arccos\left[\frac{2(e_r - c_e)}{r_e}\right]}{\omega_e} + t_n \quad (4.3)$$

Onde r_e é a amplitude da maré desde a baixa-mar até a seguinte preamar, ω_e é a frequência angular que depende do período, e c_e representa a translação vertical sobre o nível médio da série temporal.

Assim valores de r_e , ω_e e c_e são obtidos nas equações (4.4), (4.5) e (4.6):

$$r_e = e_p - e_{b1} \quad (4.4)$$

$$\omega_e = \frac{\pi}{t_n - t_{n-1}} \quad (4.5)$$

$$c_e = \frac{e_p + e_{b1}}{2} \quad (4.6)$$

4.3.3. Instante final da elevação requerida na vazante

A Figura 20 apresenta uma maré de vazante com valores de elevação e tempo próprios, para assim obter o instante final da elevação requerida.

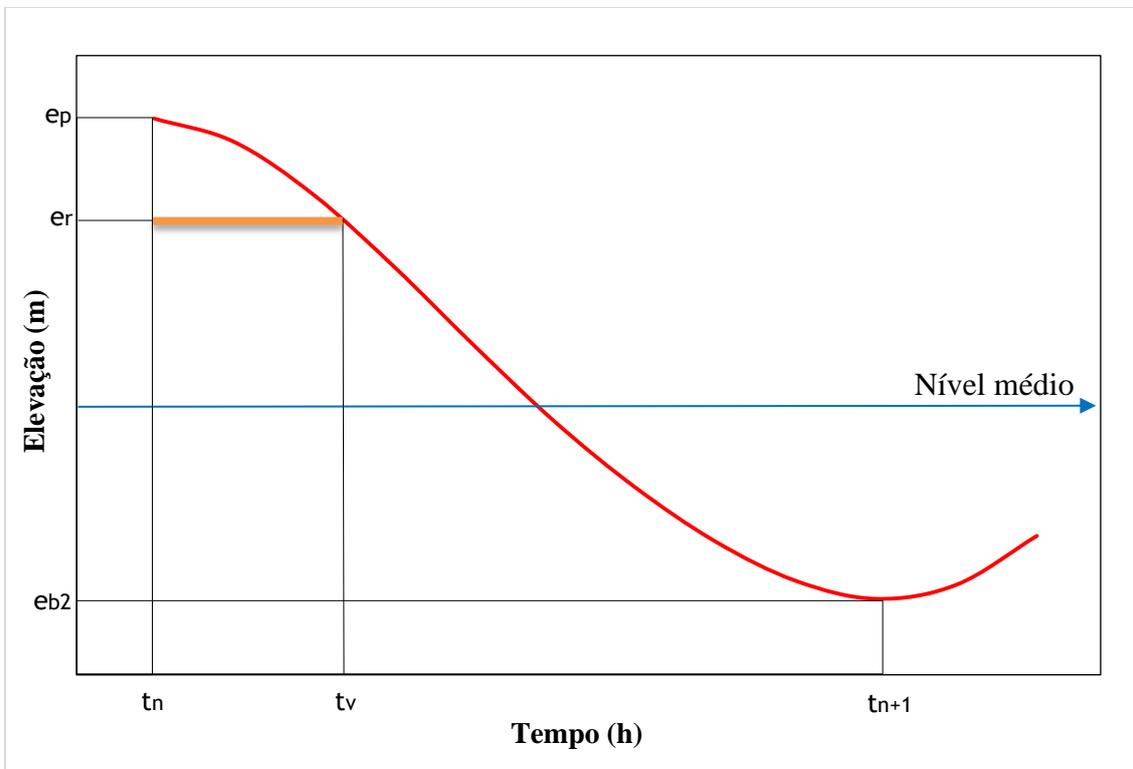


Figura 20 - Ilustração generalizada de uma maré de vazante.

Trabalhando esse fragmento de maré como uma função senoidal é obtida a equação (4.7):

$$e = \frac{r_v}{2} (\cos(\omega_v(t - t_n)) + c_v) \quad (4.7)$$

Desde que o instante final da elevação requerida t_v é resolvida, e expressada na equação (4.8):

$$t_v = \frac{\arccos\left[\frac{2(e_r - c_v)}{r_v}\right]}{\omega_v} + t_n \quad (4.8)$$

Onde r_v é a amplitude da maré desde a preamar até a seguinte baixa-mar, ω_v é a frequência angular que depende do período, e c_v representa a translação vertical sobre o nível médio da série temporal.

Assim valores de r_v , ω_v e c_v são obtidos nas equações (4.9), (4.10) e (4.11):

$$r_v = e_p - e_{b2} \quad (4.9)$$

$$\omega_v = \frac{\pi}{t_{n+1} - t_n} \quad (4.10)$$

$$c_v = \frac{e_p + e_{b2}}{2} \quad (4.11)$$

5. Resultados

A continuação, são mostrados os resultados do caso de estudo do capítulo 4. Primeiramente, é exibida a combinação de velocidades que reduz o consumo de combustível para uma quantidade de horas determinada. Depois são calculados os instantes de tempo para o ingresso seguro ao porto. Finalmente, são apresentados os custos de viagem em ambos casos: nos intervalos que alcança a elevação requerida para o ingresso ao porto e caso contrário, quando o navio deve esperar e é considerado o custo de espera.

5.1. Combinação das velocidades

A combinação de velocidades otimiza o consumo, como foi calculado por BROWN *et al.*, (2007) quando explica por exemplo que navegar o O'KANE (DDG 77) à velocidade constante de 28 nós em modo de operação *Full-power*, a potência consumida é de 4500 GPH. No entanto, pode-se atingir a mesma velocidade média de 28 nós operando metade do tempo em 29 nós no modo de operação *Full-power* e a outra metade do tempo em 27 nós no modo de operação *Split plant*. Assim, a taxa média de consumo de combustível nesse modo misto de operação é de 4300 GPH. Desta forma, o modo misto proporciona uma economia de combustível de 200 GPH, que representa um 4,65%.

Com os valores do consumo específico de combustível para cada velocidade, e fazendo uso do programa de otimização LINGO, obtém-se as melhores combinações de velocidades para os diferentes tempos que pode durar a viagem de 2000 mn. Na Tabela 7 apresentam-se aquelas combinações de velocidades que otimizarão o consumo de combustível usando o menor tempo possível, o tempo usado em cada velocidade, assim como o combustível consumido e o custo de combustível.

Tabela 7 - Menor consumo de combustível e custo total de combustível para determinados tempos de viagem otimizando as combinações de velocidades nos diferentes modos de operação.

Tempo de viagem (h)	Velocidade (nós)	Consumo específico de combustível (GPH)	Tempo para cada velocidade (h)	Consumo de combustível (gal.)	Custo total de combustível (US\$)
66,67	27	3450	50,67	270000,0	450900,00
	30	5950	16,00		
70	27	3450	58,60	270000,0	450900,00
	30	5950	11,40		
73,31	27	3450	66,48	270000,0	450900,00
	30	5950	6,83		
73,32	27	3450	66,53	269920,7	450767,53
	30	5950	6,79		
74,07	27	3450	74,03	255641,5	426921,31
	30	5950	0,04		
74,08	26	3070	0,16	255515,2	426710,38
	27	3450	73,92		
76,92	26	3070	76,84	236174,8	394411,92
	27	3450	0,08		
76,93	25	2735	0,18	236114,8	394311,72
	26	3070	76,75		
79,99	25	2735	79,74	218856,4	365490,19
	26	3070	0,25		
80	25	2735	80,00	218800,0	365396,00
80,01	24	2515	0,25	218772,4	365349,82
	25	2735	79,76		
83,33	24	2515	83,25	209592,6	350019,56
	25	2735	0,08		
83,34	21	1860	0,05	209565,2	349973,83
	24	2515	83,29		
95,23	21	1860	95,17	177164,9	295865,41
	24	2515	0,06		
95,24	20	1670	0,04	177138,8	295821,80
	21	1860	95,20		
99,99	20	1670	99,79	167021,3	278925,57
	21	1860	0,20		
100	20	1670	100,00	167000,0	278890,00
100,01	19	1510	0,20	166984,7	278864,45
	20	1670	99,81		

105,26	19	1510	105,20	158952,2	265450,17
	20	1670	0,06		
105,27	17	1240	0,07	158940,2	265430,05
	19	1510	105,21		
117,64	17	1240	117,58	145889,8	243635,97
	19	1510	0,06		
117,65	16	1150	0,05	145881,5	243622,11
	17	1240	117,60		
124,99	16	1150	124,83	143752,9	240067,34
	17	1240	0,16		
125	15	1060	0,50	143750,0	240062,50
	16	1150	124,00		
	17	1240	0,50		
125,01	15	1060	0,16	143747,1	240057,66
	16	1150	124,85		
133,33	15	1060	133,28	141334,3	236028,28
	16	1150	0,05		
133,34	12	820	0,03	141332,5	236025,24
	15	1060	133,31		
166,66	12	820	166,63	136667,6	228234,91
	15	1060	0,03		
166,67	12	820	166,67	136666,7	228233,33
180	12	820	166,67	136666,7	228233,33
200	12	820	166,67	136666,7	228233,33
300	12	820	166,67	136666,7	228233,33
400	12	820	166,67	136666,7	228233,33

Por outro lado, na Tabela 8 se apresenta um resumo das combinações de velocidades e o intervalo do tempo usado para cada caso. Não se considera o intervalo de tempo de 66,67 horas até 73,31 horas tendo em consideração que minha formulação matemática indica que deve percorrer 2000 mn e o consumo de combustível não deve exceder os 270000 galões nesse trajeto.

Tabela 8 - Intervalo de tempo para a viagem de 2000 mn usando as combinações de velocidade para otimizar o consumo de combustível.

Intervalo de tempo (h)	Velocidades utilizadas (nós)
73,32 – 74,07	27 e 30
74,08 – 76,92	26 e 27
76,93 – 79,99	25 e 26
80	25
80,01 – 83,33	24 e 25
83,34 – 95,23	21 e 24
95,24 – 99,99	20 e 21
100	20
100,01 – 105,26	19 e 20
105,27 – 117,64	17 e 19
117,65 – 124,99	16 e 17
125	15, 16 e 17
125,01 – 133,33	15 e 16
133,34 – 166,66	12 e 15
> 166,67	12

Apresenta-se a Figura 21 que exibe a curva de consumo de combustível em relação ao tempo de viagem, utilizando combinações de velocidades que otimizarão o consumo. Desse modo, pode-se observar o decréscimo do consumo de combustível se é empregada uma maior quantidade de horas na viagem.

O preço de óleo combustível utilizado pelo navio do caso de estudo é variável segundo o preço do mercado, mas para este análise foi considerado o preço no setembro de 2017 que foi de 1,67 US\$/gal. Dado que o custo de combustível é proporcional ao consumo, uma ilustração do custo de combustível em relação ao tempo de viagem apresentará exatamente a mesma curva que a Figura 21.

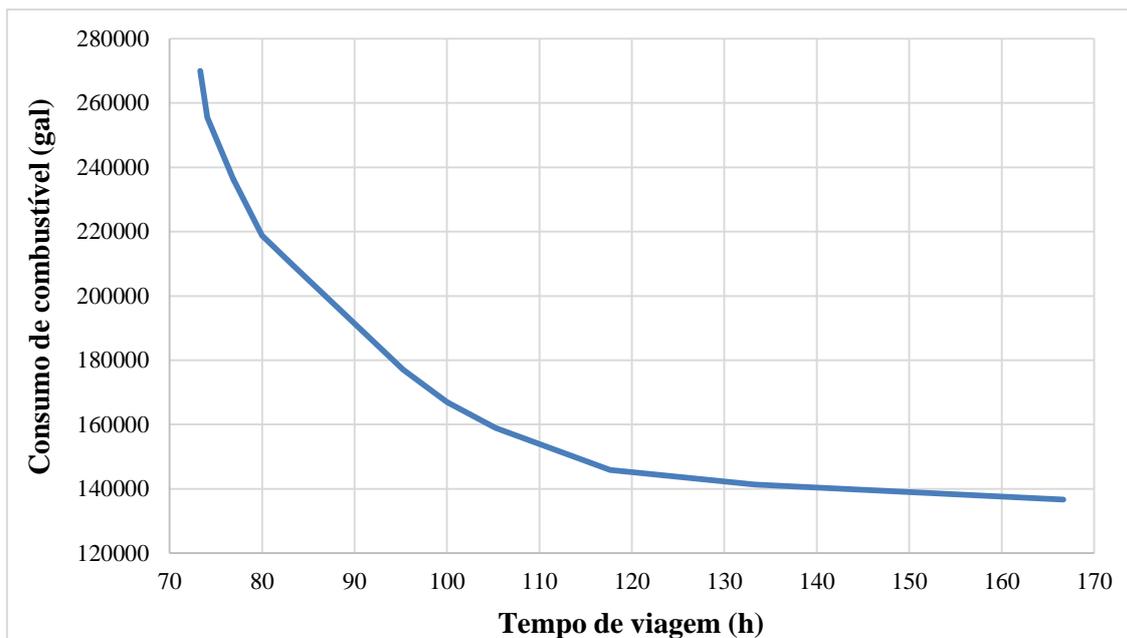


Figura 21 - Ilustração do ótimo consumo de combustível no tempo de viagem de 2000 mn.

5.2. Instantes de tempo para ingresso seguro ao porto

Os intervalos de tempo para a viagem do navio estudado utilizando as melhores combinações de velocidade foram apresentados na Tabela 8. Por esse motivo se exhibe na Figura 22, a série temporal de todo o intervalo de tempo para calcular cada um dos instantes no qual o navio pode ingressar ao porto pela restrição de calado, nos oito intervalos de duas baixa-mares consecutivas que são apresentados.

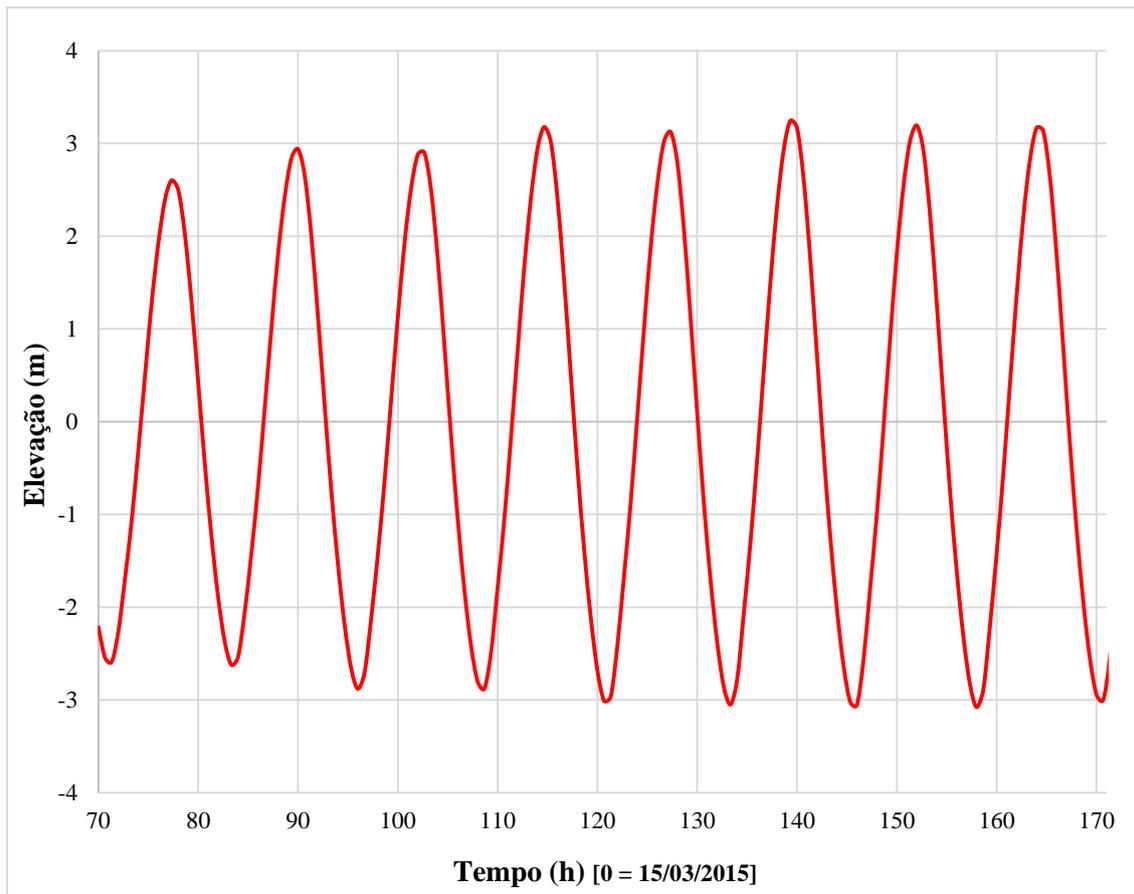


Figura 22 - Ilustração das elevações de maré na Estação Porto.

5.2.1. Elevação requerida para ingresso ao porto.

A profundidade média no porto, considerada para o caso de estudo é de 15,5 m, assim como o porte bruto do navio da Tabela 3, usamos a fórmula 4.1 da qual obtemos a elevação mínima requerida para o ingresso do navio ao porto de 1,23 m desde o nível médio.

5.2.2. Intervalos de tempo para ingresso ao porto

Nos oito intervalos de duas baixa-mares consecutivas obtêm-se também oito intervalos de tempo no qual o navio poderá ingressar ao porto, dado que a elevação requerida é de 1,23 m desde o nível médio, e usando as fórmulas (4.3) e (4.8) obtêm-se os instantes de tempo em cada uma das oito enchentes e vazantes que alcança a elevação mínima requerida, tal como se apresenta na Tabela 9.

Tabela 9 - Intervalos de tempo no qual o navio poderá ingressar ao porto pela elevação requerida.

Intervalo de tempo de duas baixa-mares consecutivas (h)	t_e	t_v	Tempo na elevação requerida para o ingresso (h)
71,33 - 83,33	75,27	79,38	4,11
83,33 - 96	87,51	92,19	4,68
96 - 108,66	100,25	104,83	4,58
108,66 - 120,66	112,36	116,94	4,58
120,66 - 133,33	124,83	129,57	4,74
133,33 - 146	137,03	141,88	4,85
146 - 158	149,73	154,27	4,54
158 - 170,66	161,74	166,53	4,77

Os intervalos de tempo no qual o navio pode ingressar ao porto oscilam desde 4 horas e 7 minutos até 4 horas e 51 minutos, fazendo uma média de 4 horas e 38 minutos nos oito intervalos das duas baixa-mares consecutivas as quais têm uma média de 12 horas e 25 minutos.

Desse modo os instantes de tempo prováveis no qual o navio deverá ingressar ao porto sem tempo de espera representa um 37,1% do tempo de viagem.

5.3. Custo de viagem sem tempo de espera

O navio pode ingressar ao porto sem tempo de espera em oito intervalos de tempo, e a cada instante de chegada nesses intervalos representa custos diferentes, como apresenta a Tabela 10 que exhibe o consumo e custo de combustível em cada instante da elevação mínima requerida.

Tabela 10 - Consumo de combustível e custo total de combustível para os instantes da elevação mínima requerida.

Tempo de viagem (h)	Consumo de combustível (gal.)	Custo total de combustível (US\$)
75,27	247411,3	413176,9
79,38	222296,8	371235,7
87,51	198204,1	331000,8
92,19	185451,1	309703,3
100,25	166617,5	278251,2
104,83	159610,1	266548,9
112,36	151460,2	252938,5
116,94	146628,3	244869,3
124,83	143799,3	240144,8
129,57	142424,7	237849,2
137,03	140816,6	235163,7
141,88	140137,6	234029,8
149,73	139038,6	232194,5
154,27	138403	231133
161,74	137357,2	229386,5
166,53	136686,6	228266,6

Em cada intervalo que o navio entra no porto sem esperar por sua entrada, apresenta uma economia no consumo de combustível que é refletida nos custos, assim como se mostra na Tabela 11, na qual pode se observar nos últimos três intervalos, tem similar economia de consumo de combustível, isso é porque nesses intervalos o navio se desloca com as mesmas combinações de velocidades de 12 e 15 nós.

Tabela 11 - Economia no consumo de combustível e nos custos de combustível em cada intervalo.

Intervalo de tempo (h)	Economia no consumo de combustível (gal.)	Economia no custo de combustível (US\$)
75,27 - 79,38	25114,5	41941,2
87,51 - 92,19	12753	21297,5
100,25 - 104,83	7007,4	11702,4
112,36 - 116,94	4831,9	8069,3
124,83 - 129,57	1374,6	2295,6
137,03 - 141,88	679	1133,9
149,73 - 154,27	635,6	1061,5
161,74 - 166,53	670,6	1119,9

O ponto médio de cada intervalo indica a economia do consumo de combustível entre um intervalo e outro, e como consequência demora na chegada, como é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 - Economia no consumo de combustível e nos custos de combustível em cada intervalo.

Intervalo de tempo (h)	Tempo médio (h)	Consumo de combustível (gal.)	Custo total de combustível (US\$)
75,27 - 79,38	77,33	233887	390591,3
87,51 - 92,19	89,85	191825,4	320348,4
100,25 - 104,83	102,54	163113,8	272400
112,36 - 116,94	114,65	149044,2	248903,8
124,83 - 129,57	127,20	143112	238997
137,03 - 141,88	139,46	140476,3	234595,4
149,73 - 154,27	152	138720	231662,4
161,74 - 166,53	164,14	137021,1	228825,2

Considerando os tempos médios do primeiro e último intervalo, obtém-se que o navio viajando 77 horas e 20 minutos no menor tempo reduzirá sua chegada em 86 horas e 49 minutos, o que representa uma economia de 53% de tempo. No entanto o consumo de combustível e o custo será maior em 96865,9 galões e 161766,1 US\$ respectivamente, que representa um incremento de 71%.

5.4. Custo de viagem com tempo de espera

Se o navio faz a viagem nos intervalos de tempo apresentados na Tabela 12 não deverá esperar até a subida da maré para ingressar ao porto, mas neste caso a análise é quando o navio faz a viagem fora desses intervalos gerando uma despesa que é proporcional ao tempo de espera.

O navio está sujeito aos custos portuários, no caso de estudo o custo de fundear o navio é 0,42 US\$/hora ou fração por metro de comprimento, assim obtém-se 102,3 US\$/hora ou fração no porto de Itaquí.

Dessa forma são apresentados na Tabela 13 os valores do custo de viagem, detalhando o custo de combustível e da espera, e exibindo na vazante a variação do custo de viagem nos instantes imediatos que o navio começa novamente a esperar até a próxima enchente para alcançar a elevação requerida para o ingresso ao porto.

Tabela 13 - Custo de viagem, detalhando o custo de combustível e da espera no trajeto de 2000 mn.

Tempo (h)	Consumo (gal.)	Custo Combustível (US\$)	Tempo de espera (h)	Custo da espera (US\$)	Custo Total (US\$)
73,32	269920,7	450767,6	1,95	204,6	450972,2
74	256966,7	429134,4	1,27	204,6	429339,0
74,5	252655	421933,9	0,77	102,3	422036,2
75,27	247411,3	413176,9	0	0	413176,9
79,38	222296,8	371235,7	0	0	371235,7
79,39	222240,4	371141,5	8,12	920,7	372062,2
79,42	222071,2	370858,9	8,09	920,7	371779,6
79,44	221958,4	370670,5	8,07	920,7	371591,2
79,47	221789,2	370388,0	8,04	920,7	371308,7
79,48	221732,8	370293,8	8,03	920,7	371214,5
87,51	198204,1	331000,8	0	0	331000,8
92,19	185451,1	309703,3	0	0	309703,3
92,2	185421,7	309654,2	8,05	920,7	310574,9
92,25	185285,4	309426,6	8	818,4	310245,0
92,3	185149,2	309199,2	7,95	818,4	310017,6
92,36	184985,7	308926,1	7,89	818,4	309744,5
92,37	184958,4	308880,5	7,88	818,4	309698,9
100,25	166617,5	278251,2	0	0	278251,2
104,83	159610,1	266548,9	0	0	266548,9
104,84	159594,8	266523,3	7,52	818,4	267341,7
104,9	159503	266370,0	7,46	818,4	267188,4
105	159350	266114,5	7,36	818,4	266932,9
105,15	159120,5	265731,2	7,21	818,4	266549,6
105,16	159105,2	265705,7	7,2	818,4	266524,1
112,36	151460,2	252938,5	0	0	252938,5
116,94	146628,3	244869,3	0	0	244869,3
116,95	146617,7	244851,6	7,88	818,4	245670,0
117,05	146512,2	244675,4	7,78	818,4	245493,8
117,15	146406,8	244499,4	7,68	818,4	245317,8
117,4	146143	244058,8	7,43	818,4	244877,2
117,41	146132,4	244041,1	7,42	818,4	244859,5
124,83	143799,3	240144,8	0	0	240144,8
129,57	142424,7	237849,2	0	0	237849,2
129,58	142421,8	237844,4	7,45	818,4	238662,8

129,8	142358	237737,9	7,23	818,4	238556,3
130,2	142242	237544,1	6,83	716,1	238260,2
131,02	142004,2	237147,0	6,01	716,1	237863,1
131,03	142001,3	237142,2	6	613,8	237756,0
137,03	140816,6	235163,7	0	0	235163,7
141,88	140137,6	234029,8	0	0	234029,8
141,89	140135,4	234026,1	7,84	818,4	234844,5
142	140120	234000,4	7,73	818,4	234818,8
143	139980	233766,6	6,73	716,1	234482,7
144,49	139771,4	233418,2	5,24	613,8	234032,0
144,5	139770	233415,9	5,23	613,8	234029,7
149,73	139038,6	232194,5	0	0	232194,5
154,27	138403	231133,0	0	0	231133,0
154,28	138400,8	231129,3	7,46	818,4	231947,7
154,5	138370	231077,9	7,24	818,4	231896,3
155	138300	230961,0	6,74	716,1	231677,1
156,73	138057,8	230556,5	5,01	613,8	231170,3
156,74	138056,4	230554,2	5	511,5	231065,7
161,74	137357,2	229386,5	0	0	229386,5
166,53	136686,6	228266,6	0	0	228266,6
166,54	136684,4	228262,9	7,86	818,4	229081,3
166,6	136676	228248,9	7,8	818,4	229067,3
166,67	136666,7	228233,4	7,73	818,4	229051,8

Dessa forma, é exibido o intervalo logo depois da primeira vazante da Tabela 13, onde o tempo de espera pode chegar até 8 horas e 7 minutos, no entanto, como os custos de fundeio são cobrados por hora ou fração, o custo da espera alcança valores de até US\$ 920,7.

Em linhas gerais a tendência é mantida, onde a maior tempo, o custo de viagem é menor, porém, há pequenos intervalos de tempo onde isso não acontece, dado que existem picos que elevam levemente o custo de viagem. Tal como é apresentado na Figura 23 que compara o tempo e o custo de viagem.

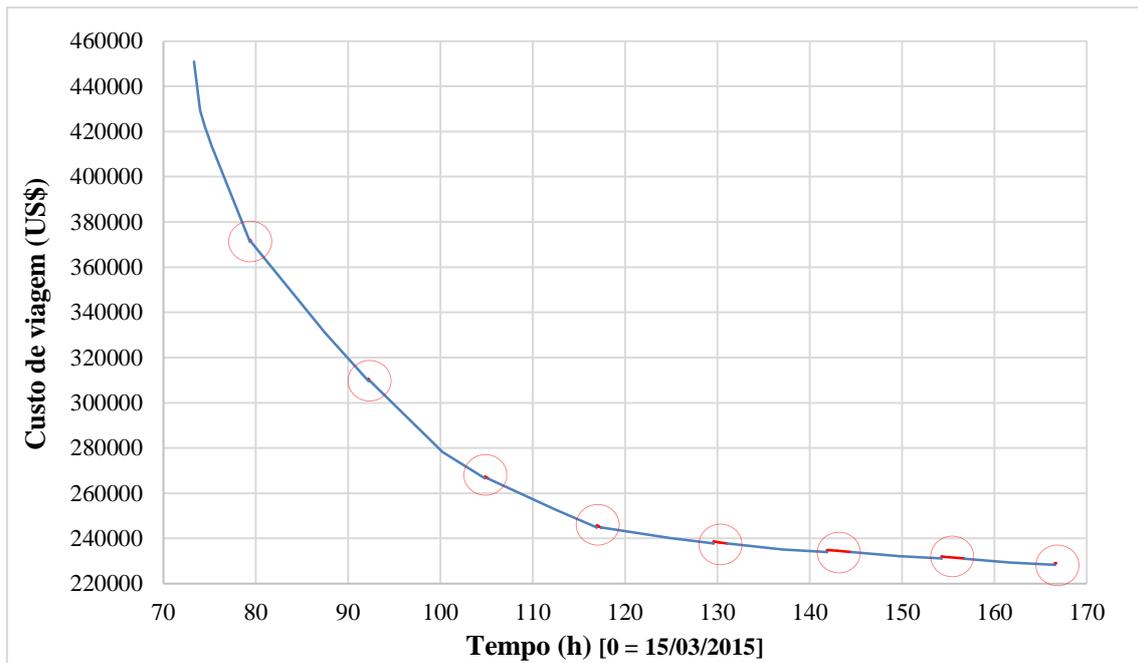


Figura 23 - Ilustração de custo de viagem em relação ao tempo empregado, exibindo em círculo vermelho os intervalos onde acontecem picos que elevam ligeiramente o custo.

Desse modo pode-se observar nesses intervalos que os custos de viagem são maiores pelo custo de espera, exibidos desde a Figura 24 até 31. E dado que o custo de espera é cobrado por hora ou fração, se apresentam valores escalonados múltiplos de US\$ 102,3, da mesma forma, as ilustrações desses intervalos apresentam variações nas curvas.

A Figura 24 mostra um incremento de até US\$ 826,5 num intervalo de 6 minutos, instantes onde o custo de viagem é maior que o custo no instante da primeira vazante.

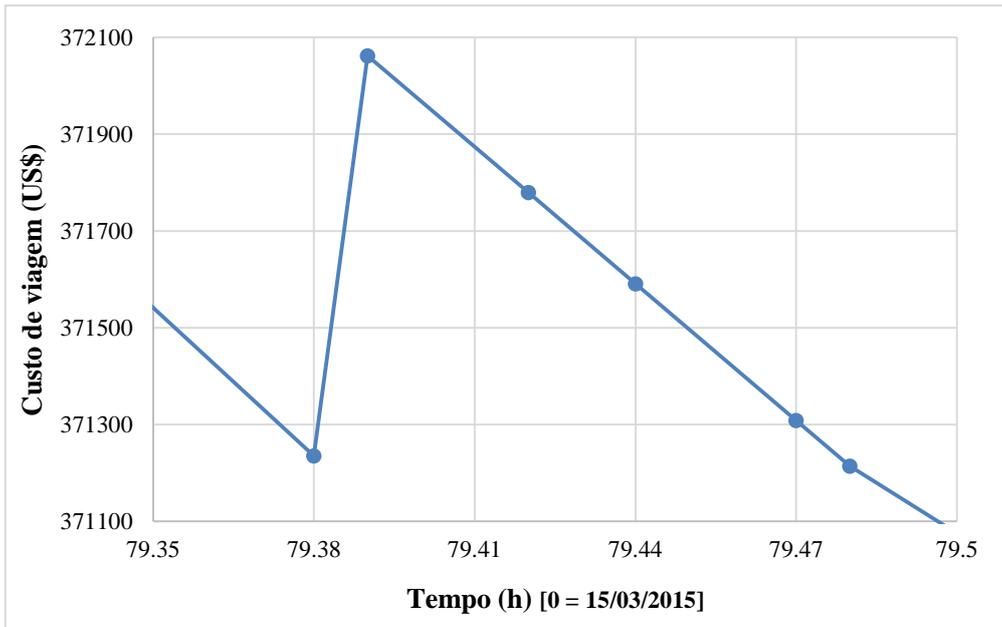


Figura 24 - Ilustração onde os custos de viagem são maiores ao custo no instante da primeira vazante, limite da elevação requerida.

A Figura 25 mostra um incremento de até US\$ 871,6 num intervalo de 10 minutos e 48 segundos, instantes onde o custo de viagem é maior que o custo no instante da segunda vazante.

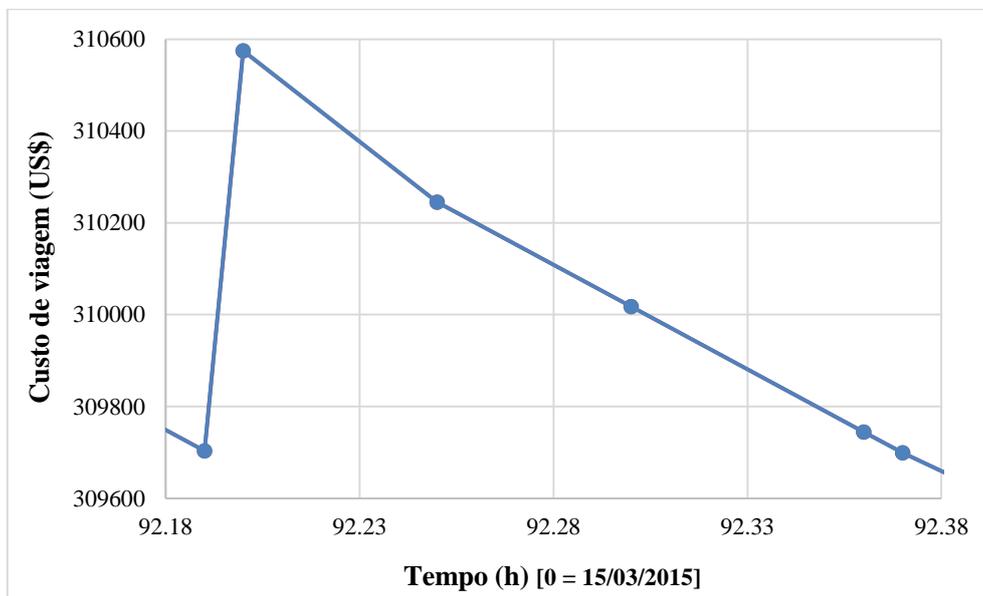


Figura 25 - Ilustração onde os custos de viagem são maiores ao custo no instante da segunda vazante, limite da elevação requerida.

Na Figura 26 mostra um incremento de até US\$ 792, num intervalo de 20 minutos, instantes onde o custo de viagem é maior que o custo no instante da terceira vazante.

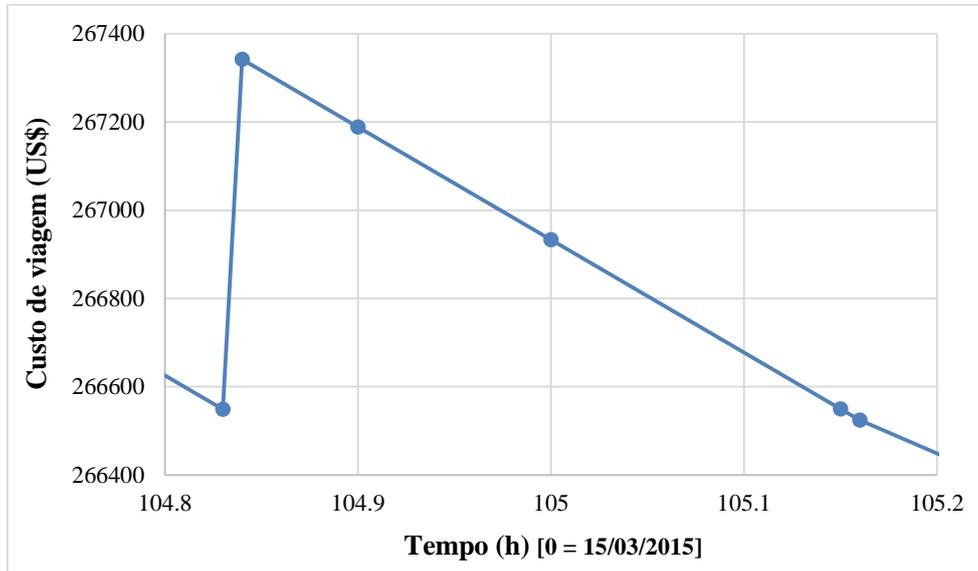


Figura 26 - Ilustração onde os custos de viagem são maiores ao custo no instante da terceira vazante, limite da elevação requerida.

A Figura 27 mostra um incremento de até US\$ 800,7 num intervalo de 28 minutos e 12 segundos, instantes onde o custo de viagem é maior que o custo no instante da quarta vazante.

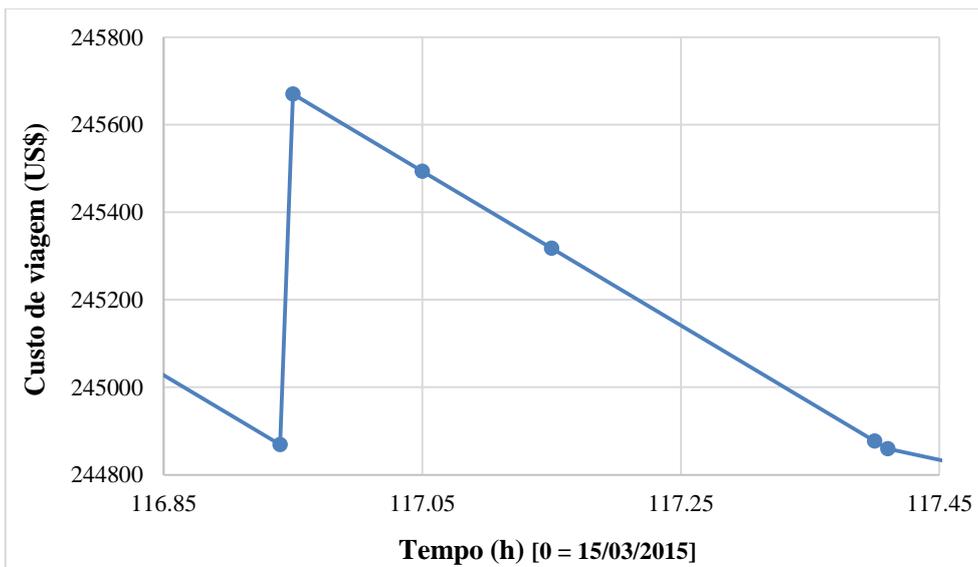


Figura 27 - Ilustração onde os custos de viagem são maiores ao custo no instante da quarta vazante, limite da elevação requerida.

Na Figura 28 mostra um incremento de até US\$ 813,6 num intervalo de 1 hora 27 minutos e 36 segundos, instantes onde o custo de viagem é maior que o custo no instante da quinta vazante.

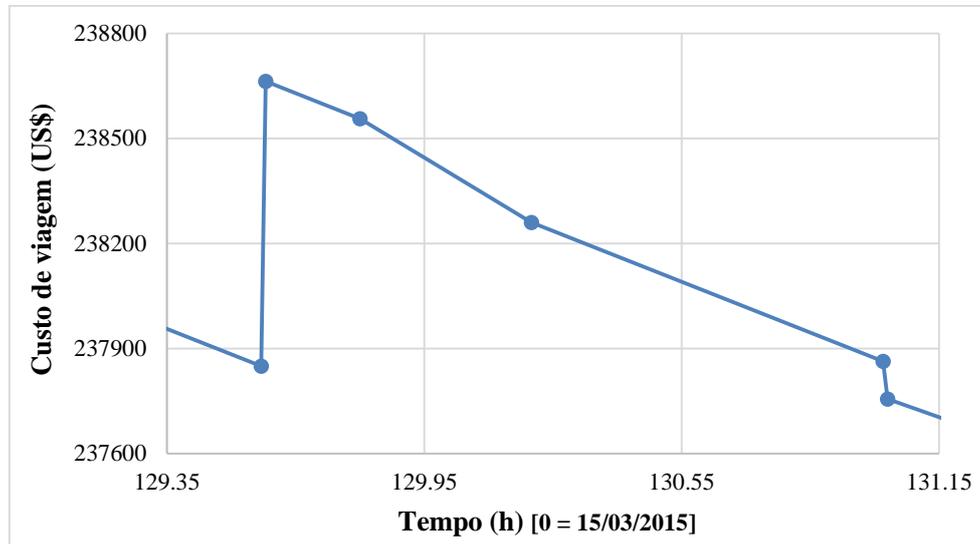


Figura 28 - Ilustração onde os custos de viagem são maiores ao custo no instante da quinta vazante, limite da elevação requerida.

A Figura 29 mostra um incremento de até US\$ 798,4 num intervalo de 2 horas 37 minutos e 12 segundos, instantes onde o custo de viagem é maior que o custo no instante da sexta vazante.

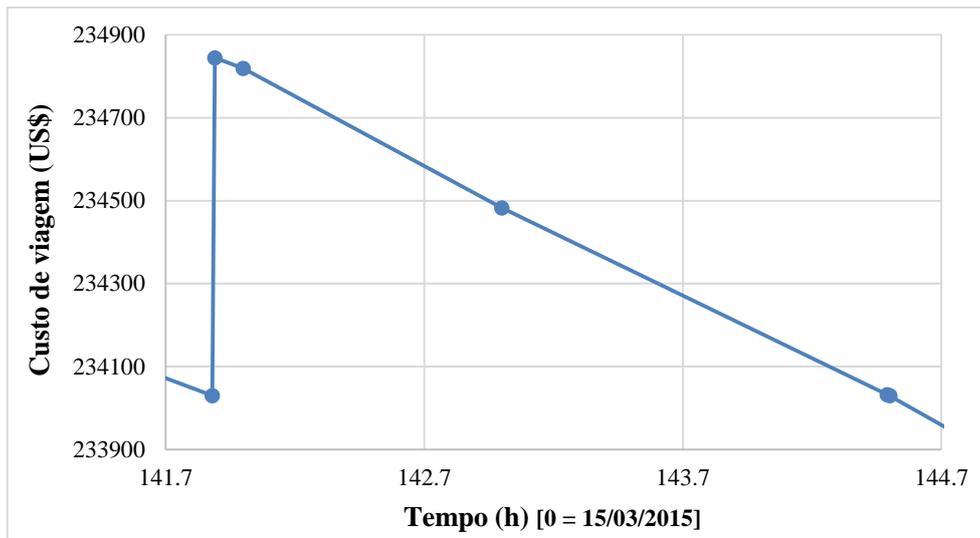


Figura 29 - Ilustração onde os custos de viagem são maiores ao custo no instante da sexta vazante, limite da elevação requerida.

A Figura 30 mostra um incremento de até US\$ 814,7 num intervalo de 2 horas 28 minutos e 12 segundos, instantes onde o custo de viagem é maior que o custo no instante da sétima vazante.

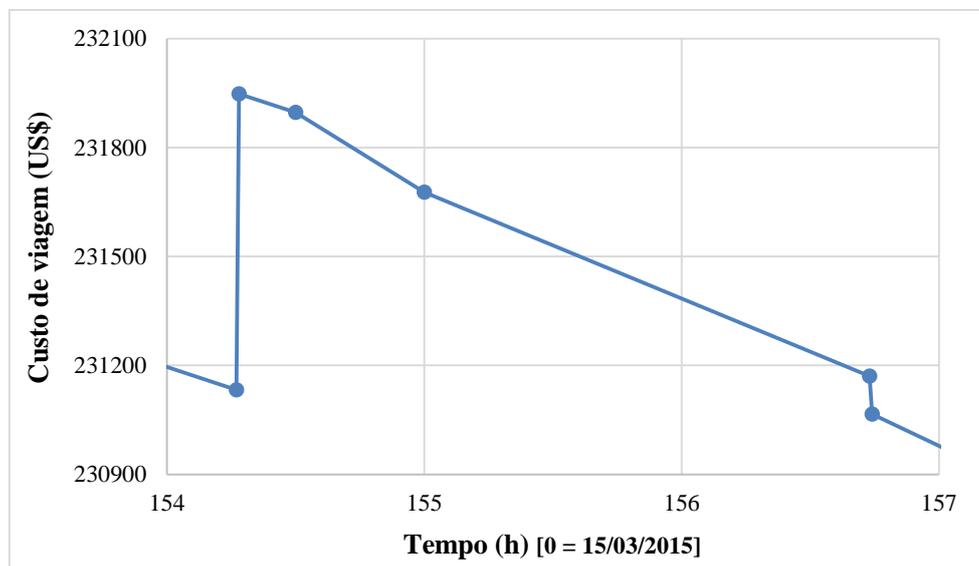


Figura 30 - Ilustração onde os custos de viagem são maiores ao custo no instante da sétima vazante, limite da elevação requerida.

A Figura 31 mostra um incremento de até US\$ 814,7 num intervalo de 8 minutos e 24 segundos, instantes onde o custo de viagem é maior que o custo no instante da oitava vazante. Neste último caso o navio chegará ao instante 166,67 horas, caso ele tivesse navegado a 12 nós em toda a viagem de 2000 mn.

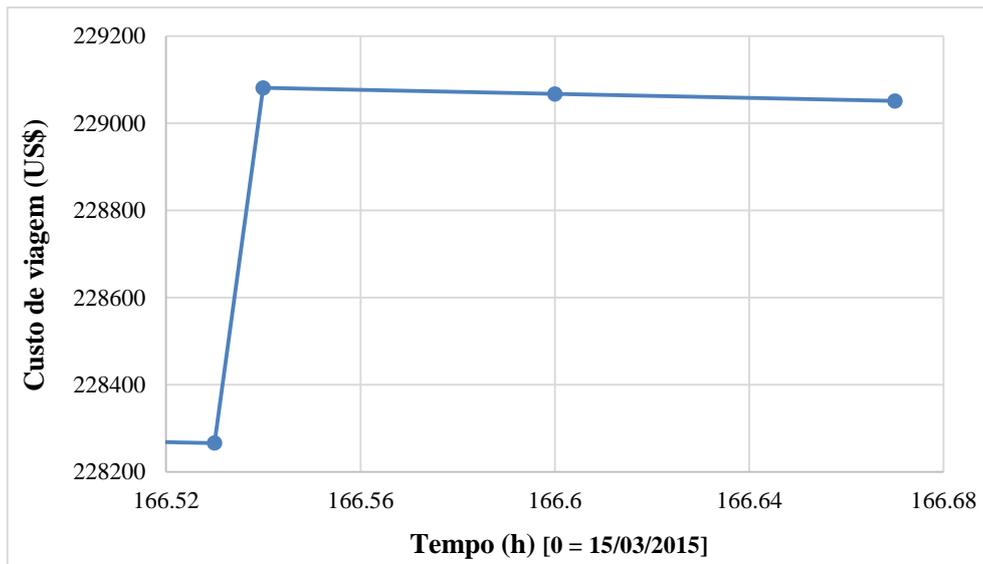


Figura 31 - Ilustração onde os custos de viagem são maiores ao custo no instante da oitava vazante, limite da elevação requerida.

As figuras mostraram os intervalos onde o custo incrementa-se, é por isso que esses intervalos devem ser evitados, porque da mesma maneira que os custos de viagem são maiores em relação ao instante final da elevação requerida, também deve esperar para o ingresso no porto, que repercute em outros custos do transporte marítimo, como são os custos operacionais.

6. Conclusões

Com o desenvolvimento deste trabalho, chegou-se às seguintes conclusões:

- Se provou que utilizar combinação de velocidades num modo de operação ou combinando dois modos obtém-se a redução de consumo de combustível do que se estivesse viajando a velocidade constante em todo o trajeto.
- Os intervalos de tempo imediatos aos instantes de vazante onde o navio começa o tempo de espera, devem ser evitados sob qualquer circunstância, dado que nesses intervalos o custo de viagem é maior pelo custo de espera, embora o custo do tempo de espera alcança como máximo 0,36% do custo de combustível.
- O *Slow Steaming* provou ser uma estratégia engenhosa, e eficaz a ser executada para conter os custos do consumo de combustível na viagem do navio, e de modo simultâneo está tendo um efeito positivo em termos de redução de poluição.
- Com a pesquisa operacional planifica-se o trânsito do navio e a flexibilidade da programação linear permite adaptar-se a novas limitações ou outras características de um problema que pode manifestar-se no futuro, assim a execução real não seja tão ideal como o plano.
- Quando é preciso misturar dois modos de operação, o capitão do navio escolhe a ordem dos modos por motivos táticos, sem sacrificar a economia ideal do combustível. Um capitão prudente pode navegar inicialmente com a maior velocidade da combinação ótima, isso oferece algum seguro contra atrasos imprevistos.
- O *Slow Steaming* garante um transporte mais pontual, embora seja mais lento e isso é um inconveniente para outros setores como o transporte de alimentos frescos, flores, etc.

- Recursos como as tabelas das elevações de maré e correntes de maré na Baía de São Marcos obtidos pelo estudo hidrodinâmico do projeto usando a ferramenta SisBaHiA fazem possível a análise do ingresso seguro do navio ao porto.
- Condições de macro-maré devem ser analisadas com maior detalhe devido que afetam o ingresso do navio pela restrição de profundidade requerida em relação à variação de maré.

7. Recomendações

A seguir são apresentadas algumas recomendações, com intuito de dar continuidade aos estudos elaborados por este trabalho:

- Para que os resultados cheguem o mais próximo da realidade, como obter intervalos de tempo mais precisos nas elevações requeridas é importante que os estudos desenvolvidos tenham dados suficientes à disposição, como por exemplo se os intervalos de tempo regulares que foram gravados no projeto fossem de 1 ou 2 minutos e não de 40 minutos, se aproximaria com uma acurácia maior aos instantes das fases de maré listadas nas Estação Porto.
- Usou-se as curvas de consumo específico de combustível do (BROWN, 2007) para fazer os cálculos de consumo de combustível na viagem, mas o ideal é obter as curvas do navio minério Aframax MINERVA ALEXANDRA, sendo uma embarcação típica que navega pela Baía de São Marcos.
- O caso de estudo desde mar adentro até o porto na Baía de São Marcos é simplificado porque a análise da logística portuária é de somente um navio, e no trajeto até a entrada da Baía não se consideram alguns fatores externos como sinistros naturais ou efeitos oceanográficos, entre eles correntes marinhas, ondas, etc.
- Para trabalhos futuros pode se usar uma frota de navios usando teoria de filas para determinar na média de em quanto tempo poderão ser atendidos até sua entrada no berço correspondente caso não esteja ocupado por outro navio, visando a incorporação de efeito de presença de outros navios a serem atendidos no porto.
- Outra sugestão para trabalhos futuros, é fazer uma otimização considerando diferentes roteiros do processo unitário do navio aos portos que não é necessariamente linear. Sabendo que as condições de navegação, de maré e entrada para cada porto podem mudar, esse resultado agregado deveria ser analisado para comparar com o resultado de múltiplos navios num porto só.

8. Referências bibliográficas

- ARTZ JUN, J.C., 1975. "The economics of tanker slowdown: An observation". *Maritime Policy Manager*, vol. 2, n 4, pp. 244–249.
- AVI-ITZHAK, J., 1974. "Speed, fuel consumption and output of ships: Some quantitative economical and national implications of the oil crisis". *Transportation Research*, vol. 10, n 3, pp. 221.
- BROWN, G., KLINE, J., ROSENTHAL, R., WASHBURN, A., 2007. "Steaming on Convex Hulls". *Interfaces*, vol. 37, pp. 342-352.
- BUNKER WORLD, "TI008 Bunker fuel prices". Disponível em: <<http://www.transport.govt.nz/ourwork/tmif/transportpriceindices/ti008/>>. Acessado em: 09/2017.
- CONRADO, D., MUNHOZ, D., SANTOS, M., MELLO, R., SILVA, V., 2004. "Vulnerabilidade às Mudanças Climáticas". Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd68/DConrado.pdf>>.
- DIETRICH, G., KALLE, K., KRAUSS, W., SIEDLER, G., 1975. *Introductory Oceanography*, 3 ed. Gebr. Borntraeger, Berlin.
- ESCAP, 2007. *Review of developments in transport in Asia and the Pacific 2007: Data and Trends*. 2 ed. Bangkok, China .UN. Economic and social commission for Asia and the Pacific.
- FEITOSA, A.C., 1989, *Evolução morfogenética do litoral norte da ilha do Maranhão*. M.Sc. dissertation, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, São Paulo.
- FORRESTER, W. D., 1983. *Canadian Tidal Manual*. Department of Fisheries and Oceans. Canadian Hydrographic Service. Ottawa, Ontario, Canada, pp. 183.
- GORBEÑA, E., WILSON, G., ROSMAN, P.C.C., QASSIM, R.Y., 2015. "Influence of hydrokinetic energy converter farms on sediment transport at idealized scenarios in São Marcos bay, MA". *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 20, pp. 379-393.
- IMO, 2014. "Third IMO GHG Study 2014. Executive Summary and Final Report". Londres, 2014.
- JIA, H., ADLAND, R., PRAKASH, V., SMITH, T., 2017. "Energy efficiency with the application of Virtual Arrival policy". *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 54, pp. 50-60.
- JORGENSEN, R., 2012. *Slow Steaming: The Full Story*. Copenhagen: Maersk.

- KONTOVAS, C., PSARAFTIS, H., 2011. “Reduction of emissions along the maritime inter modal container chain: Operational models and policies”. *Maritime Policy & Management*, vol. 38, pp. 451-469.
- MANNING, G., 1956. *The Theory and Technique of Ship Design*. 1 ed. The MIT Press, Cambridge.
- MINERVA MARINE INC. “Aframax: Minerva Alexandra” Disponível em: <<http://www.minervamarine.com/fleet/afamax/>>. Acessado em: 08/2017.
- MOON, D., WOO, J., 2014. “The impact of port operations on efficient ship operation from both economic and environmental perspectives”, *Maritime Policy & Management: The flagship journal of international shipping and port research*, vol. 41:5, pp. 444-461.
- NEWTON, I., 1867. *Philosophiae naturalis principia mathematica*.
- NONNEMAN, W., 1981. “Benefits of dredging through reduced tidal waiting”. *Maritime Policy & Management*, vol. 8, pp. 17-20.
- OLBA, X., DAAMEN, W., VELLINGA, T., HOOGENDOORN, S., 2015. “Simulating the Port Wet Infrastructure: Review and Assessment”. *Transportation Research Procedia*, vol. 10, pp. 683-693.
- PORT OF HAMBURG. “Access depth for the Port of Hamburg“.Disponível em: <www.hafen-hamburg.de>. Acessado em: 10/2017.
- PORTOBRÁS, 1988. “Parecer técnico hidráulico-sedimentológico referente as alternativas de solução para implantação do píer petrolífero do porto comercial do Itaquí”, vol. 1, pp. 55.
- RAMOS, V., CARBALLO, R., ALVAREZ, M., SANCHEZ, M., IGLESIAS, G., 2014. “A port towards energy self-sufficiency using tidal stream power”. *Energy*, vol. 71, pp. 432-444.
- RAMOS, V., CARBALLO, R., SANCHEZ, M., VEIGAS, M., IGLESIAS, G., 2014. “Tidal stream energy impacts on estuarine circulation”. *Energy Conversion and Management*, vol 80, pp. 137–149.
- REX, C., THORSEN, C., RASMUSSEN, K., NIELSEN, S., KRISTENSEN, N., 2013. “Shipping market review”. Disponível em: <www.shipfinance.dk/media/1048/shipping-market-review-april-2013.pdf>. Acessado em: 11/2017.
- ROSMAN, P.C.C., 2016. “Geração de campos de correntes 3D para planejamento de operações de navegação no terminal portuário WPR na dáia de São Marcos, MA”. *Relatório COPPETEC-PENO-20162*, 08/2016, COPPE/UFRJ.
- ROSMAN, P.C.C., 2017. “Referência técnica do SisBaHiA, Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental”. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pes-

quisa de Engenharia; Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em:
<http://www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V92.pdf>.

THE OBSERVATORY OF ECONOMIC COMPLEXITY. “What is the trade balance for a China? (1995-2016)”. Disponível em:
<https://atlas.media.mit.edu/pt/visualize/line/hs92/show/chn/all/all/1995.2016/>. Acesso em: 09/2017.

UNCTAD, 1977. *Port Development*, pp. 70, New York: United Nations.

UNCTAD, 2010. *Review of Maritime Transport*, pp. 85-89, New York and Geneva: United Nations.

WHALH, M.E.B., KRISTOFFERSEN, E, 2012. *Speed Optimization for Very Large Crude Carriers (VLCCs): Potential Savings and Effects of Slow Steaming*. M. Sc. dissertation, Norwegian School of Economics, Bergen, Norway.

WIESMANN, A., 2009, “Slow Steaming - a viable long-term option?”, *Wärtisilä Technical Journal*, pp. 49-55.

YIN, J., FAN, L., YANG, Z., LI, K., 2014. “Slow steaming of liner trade: its economic and environmental impacts”. *Maritime Policy & Management*, vol. 41, pp. 149-158.

ZHEN, L., LIANG, Z., ZHUGE, D., LEE, L.H., PENG, C., 2017. Daily berth planning in a tidal port with channel flow control”. *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 106, pp. 193-217.

Apêndice – A: Modelo Lingo

Apresenta-se o código utilizado para resolver o problema de otimização.

SETS:

!SETS (conjuntos) são grupos de objetos relacionados.

SL/1..26/: speed, HOURS, frate;

ENDSETS

!Finalização dos conjuntos.

DATA:

!A seção DATA permite isolar os dados do resto do modelo. Nesta seção são escritas as instruções que inicializam os atributos dos conjuntos, previamente instanciados na seção SETS.

```
distance, speed, frate, fuelcap, reserve_fuel,
fuelcost, hours_, anchorcost, ho, St, er, to, te1_, tv1_,
te2_, tv2_, te3_, tv3_, te4_, tv4_, te5_, tv5_, te6_, tv6_,
te7_, tv7_, te8_, tv8_, te9_
= @OLE('Navio e maré no porto.xlsx', 'distance',
'speed', 'frate', 'fuelcap', 'reserve_fuel', 'fuelcost',
'hours_', 'anchorcost', 'ho', 'St', 'er',
'to', 'te1_', 'tv1_', 'te2_', 'tv2_', 'te3_', 'tv3_',
'te4_', 'tv4_', 'te5_', 'tv5_', 'te6_', 'tv6_', 'te7_',
'tv7_', 'te8_', 'tv8_', 'te9_');
```

!Cabe ressaltar o uso da função de interface @OLE, usada para mover dados entre o LINGO e o Excel, a través de transferências baseadas em OLE (Object Linking and Embedding. Transferências realizadas diretamente pela memória e, por conseguinte, não fazem uso de arquivos intermediários.

ENDDATA

!Finalização da seção DATA.

MIN = FUELCOSTt + WAITCOST;

!Função objetivo, para minimizar o custo de viagem.

@sum(SL(s): speed(s)*HOURS(s)) >= distance;

@sum(SL(s): HOURS(s)) <= hours_;

FUELCONS >= @sum(SL(s): frate(s)*HOURS(s));

FUELCONS <= fuelcap - reserve_fuel;

!Limites do consumo de combustível.

```

FUELCOSTt = fuelcost * FUELCONS;
!Custo de combustível na viagem.

dt = @SQRT(St)+6.5;
!Cálculo da profundidade requerida para ingresso ao porto.

WAITTIME1 = @if((to # LE # hours_) # AND # (hours_ # LT #
te1_),te1_-hours_, 0);
WAITTIME2 = @if((tv1_ # LT # hours_) # AND # (hours_ # LT #
te2_),te2_-hours_, 0);
WAITTIME3 = @if((tv2_ # LT # hours_) # AND # (hours_ # LT #
te3_),te3_-hours_, 0);
WAITTIME4 = @if((tv3_ # LT # hours_) # AND # (hours_ # LT #
te4_),te4_-hours_, 0);
WAITTIME5 = @if((tv4_ # LT # hours_) # AND # (hours_ # LT #
te5_),te5_-hours_, 0);
WAITTIME6 = @if((tv5_ # LT # hours_) # AND # (hours_ # LT #
te6_),te6_-hours_, 0);
WAITTIME7 = @if((tv6_ # LT # hours_) # AND # (hours_ # LT #
te7_),te7_-hours_, 0);
WAITTIME8 = @if((tv7_ # LT # hours_) # AND # (hours_ # LT #
te8_),te8_-hours_, 0);
WAITTIME9 = @if((tv8_ # LT # hours_) # AND # (hours_ # LT #
te9_),te9_-hours_, 0);
!Cálculo do tempo de espera em cada intervalo, considerando
que só um deles poderá ser diferente de zero.

WAITTIME = WAITTIME1 + WAITTIME2 + WAITTIME3 + WAITTIME4 +
WAITTIME5 + WAITTIME6 + WAITTIME7 + WAITTIME8 + WAITTIME9;
!Cálculo do tempo de espera exato.

Hours_WAITTIME = @if(WAITTIME # EQ # 0, 0, @if(WAITTIME #
GT
#
@FLOOR(WAITTIME),@FLOOR(WAITTIME)+1,@FLOOR(WAITTIME)));
!Cálculo do número de horas inteiras do tempo de espera.

WAITCOST = anchorcost * Hours_WAITTIME;
!Cálculo do custo de espera.

```

Todos os dados das curvas de maré na estação Porto são inseridos no excel, e dessa forma são calculados cada instante da elevação mínima requerida, assim com cada um dos dados do navio inseridos é possível otimizar a função objetivo para cada instante de tempo que o usuário deseje conhecer.

Apêndice – B: Planilha de Excel

Speed(knots)	frate(GPH)
5	560
6	575
7	595
8	610
9	650
10	700
11	760
12	820
13	900
14	985
15	1060
16	1150
17	1240
18	1380
19	1510
20	1670
21	1860
22	2140
23	2340
24	2515
25	2735
26	3070
27	3450
28	4535
29	5135
30	5950

distance	2000
fuelcap	300000
reserve_fuel	30000
fuelcost	1,67
hours_	166,67
anchorcost	102,3
ho	15,5
St	104,64
er	1,23
to	73,32
te1	75,27
tv1	79,38
te2	87,51
tv2	92,19
te3	100,25
tv3	104,83
te4	112,36
tv4	116,94
te5	124,83
tv5	129,57
te6	137,03
tv6	141,88
te7	149,73
tv7	154,27
te8	161,74
tv8	166,53
te9	174,4

ENCHENTE									
eb1	ep	periodo	er	ce	re	we	tn		t enchente
-2,59	2,6	12	1,23	0,005	5,19	0,523599	77,33	te1	75,27
-2,62	2,94	13,33	1,23	0,16	5,56	0,471357	90	te2	87,51
-2,88	2,9	13,33	1,23	0,01	5,78	0,471357	102,66	te3	100,25
-2,88	3,18	12	1,23	0,15	6,06	0,523599	114,66	te4	112,36
-3,01	3,12	13,33	1,23	0,055	6,13	0,471357	127,33	te5	124,83
-3,05	3,25	12	1,23	0,1	6,3	0,523599	139,33	te6	137,03
-3,06	3,19	12	1,23	0,065	6,25	0,523599	152	te7	149,73
-3,08	3,17	12	1,23	0,045	6,25	0,523599	164	te8	161,74
-3	3,13	12	1,23	0,065	6,13	0,523599	176,66	te9	174,40

VAZANTE									
ep	eb2	periodo	er	cv	rv	wv	tn		t vazante
2,6	-2,62	12	1,23	-0,01	5,22	0,523599	77,33	tv1	79,38
2,94	-2,88	12	1,23	0,03	5,82	0,523599	90	tv2	92,19
2,9	-2,88	12	1,23	0,01	5,78	0,523599	102,66	tv3	104,83
3,18	-3,01	12	1,23	0,085	6,19	0,523599	114,66	tv4	116,94
3,12	-3,05	12	1,23	0,035	6,17	0,523599	127,33	tv5	129,57
3,25	-3,06	13,33	1,23	0,095	6,31	0,471357	139,33	tv6	141,88
3,19	-3,08	12	1,23	0,055	6,27	0,523599	152	tv7	154,27
3,17	-3	13,33	1,23	0,085	6,17	0,471357	164	tv8	166,53

_____Ω_____