

**Análise do Transporte Flúvio-Marítimo de Minério de Ferro
no Rio Douro**

Daniel André Merino Martins da Silva

Dissertação para a obtenção de Grau de Mestre em

Engenharia e Arquitectura Naval

Júri

Presidente: Professor Doutor Carlos António Pancada Guedes Soares

Orientador: Doutor Manuel Filipe Simões Franco Ventura

Vogal: Professor Tiago Alexandre Rosado Santos

Dezembro de 2014

Agradecimentos

Ao meu orientador Dr. Manuel Filipe Ventura por todo o acompanhamento e horas despendidas em explicações e revisões metódicas.

Ao meu pai, Manuel, e á minha mãe, Regina, por todo apoio incondicional que sempre me deram e por todos os sacrifícios que fizeram para eu conseguir chegar até aqui.

À minha irmã, Luísa e á minha avó Margarida por toda a ajuda e motivação.

À minha madrinha Natacha, pois sem ela nunca estaria neste curso.

Aos meus familiares, colegas e amigos.

Á minha rapaziada de Santo Amaro, em especial aos da minha “Ogalha”, Daniel, Filipe e Tiago.

Resumo

Nesta dissertação pretende-se realizar um estudo de viabilidade do transporte de minério de ferro através de navios graneleiros rio-mar desde um terminal fluvial no rio Douro até um terminal marítimo em Aveiro.

Neste estudo este problema de transporte é dividido em duas partes. A primeira é referente ao dimensionamento inicial destes navios de forma a obter as características principais, tais como: dimensões principais, capacidade de carga, potência necessária e velocidades de operação. Nesta primeira parte é feita a optimização de todos estes parâmetros através de um método de optimização não-linear considerando as limitações físicas da rota como a profundidade mínima no canal de navegação e as dimensões das eclusas existentes. A segunda parte é referente ao dimensionamento dos terminais. No caso do terminal fluvial, que ainda não existe, além do dimensionamento é elaborado um possível arranjo geral e uma localização. No caso do terminal marítimo são consideradas as alterações necessárias ao terminal de graneis sólidos já existente em Aveiro.

Para o dimensionamento inicial do navio são descritos os componentes principais que constituem o modelo de síntese do navio, o modelo de viagem e o procedimento de optimização.

A análise do sistema de transporte é feita através de métodos de simulação. Nesta parte o sistema de transporte é analisado como um todo, juntando todos os parâmetros que constituem e influenciam o sistema, tais como as eclusas e o tráfego fluvial existente. Pretende-se com isto reproduzir o sistema da forma mais real possível.

Para as simulações foram criados vários cenários com diferentes configurações dos terminais. Todos estes cenários são comparados através de indicadores de desempenho, tais como: fluxo anual de carga, tempo em porto, tempo de espera, tempo em cais e taxa de utilização dos recursos no terminal.

Através destes resultados é possível identificar os parâmetros que mais beneficiarão o sistema de transporte, tornando este modelo de simulação numa boa ferramenta para analisar este problema de transporte ou outros semelhantes.

Palavras-chave: projecto de navios, modelo de síntese do navio, vias navegáveis interiores, optimização, simulação, navios graneleiros rio-mar.

Abstract

In this thesis it is intended to do a feasibility study and analysis of the transport of iron-ore by river-sea bulk carriers from a river terminal in river Douro to a sea terminal in Aveiro.

In this study the transport problem is divided in two parts. First the preliminary ship design in order to obtain the river-sea bulk carrier main dimensions, cargo capacity, power requirements and design speed. This is made by means of non-linear optimization considering route limitations like the depth of the river and the dimensions of the floodgates. Secondly the terminals design, in the case of the river terminal, which doesn't exist, all the terminal specifications, characteristics and layout have to be design. In the case of the sea terminal it is conceived an upgrade to the already existing bulk terminal in Aveiro.

For the ship preliminary design the main components of the ship synthesis model, the voyage model and the optimization procedure are presented.

The analysis of the entire transport system is made by means of simulation were the two parts, ship and terminals, together with all the parameters that can influence the transportation such as the river locks and the existing river traffic gather allowing to mimic the reality as close as possible.

For the simulations, several scenarios of terminal configurations and cargo equipment were considered. All these scenarios were compared by analysis of performance measures such as annual cargo throughput, port time, waiting times, berth times and rate of equipment utilization in the terminals.

With these results it's possible to identify the parameters that can benefit these transport system, making this simulation model an excellent tool for analyzing this transport problem or others of the same kind.

Keywords: ship design, synthesis model, inland waterways, optimization, simulation, river-sea bulk carrier.

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo	iv
Abstract.....	v
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e Motivação.....	1
1.2 Objectivos e trabalho desenvolvido	3
1.3 Estrutura da dissertação.....	3
2. Revisão bibliográfica	4
3. Terminais de granéis sólidos.....	9
3.1 Considerações no dimensionamento dos terminais.....	9
3.1.1 Sistemas de carga/descarga	9
3.1.2 Sistemas e área de armazenamento.....	11
3.1.3 Cais.....	14
3.1.4 Bacia de manobra.....	14
3.2 Terminal fluvial no Douro.....	14
3.2.1 Comprimento do cais.....	15
3.2.2 Sistema de carga.....	15
3.2.3 Área de armazenamento	15
3.2.4 Bacia de manobra.....	16
3.2.5 Proposta de um arranjo geral para o terminal fluvial.....	16
3.3 Terminal marítimo em Aveiro	17
3.3.1 Restrições do porto de Aveiro	17
3.3.2 Alterações ao terminal actual	17
3.3.3 Comprimento do cais.....	17
3.3.4 Sistemas de carga/descarga	18
3.3.5 Área de armazenamento	18
3.3.6 Bacia de manobra.....	18
4. Projecto do navio e frota	20
4.1 Navios rio-mar	20
4.2 Modelo de síntese do navio	20
4.2.1 Forma do casco e compartimentação	21
4.2.2 Bordo livre.....	22
4.2.3 Distribuição do peso leve	23
4.2.4 Previsão de potência	23

4.2.5	Sistema propulsivo	26
4.2.6	Índice de eficiência energética (EEDI) para navios.....	27
4.2.7	Estrutura dos custos e custo de construção	28
4.2.8	Validação	29
4.3	Modelo da viagem.....	32
4.4	Optimização.....	36
4.4.1	Parâmetros	36
4.4.2	Cenários	37
4.4.3	Resultados.....	39
5.	Desenvolvimento do modelo de simulação.....	42
5.1	Trajeto e terminal fluvial.....	43
5.1.1	Operação de acostagem e desatracação	44
5.1.2	Operação de carga	45
5.1.3	Eclusas e percurso fluvial.....	46
5.1.4	Tráfego fluvial existente.....	47
5.2	Trajeto marítimo costeiro e operação no terminal de Aveiro	47
5.2.1	Entrada em porto e operação no terminal.....	47
5.2.2	Processo de carga e descarga.....	48
5.2.3	Navio <i>Handysize</i>	49
6.	Simulação.....	52
6.1	Indicadores de desempenho	52
6.2	Considerações da simulação	53
6.3	Verificação e validação	54
6.4	Cenários.....	56
6.5	Análise dos Resultados	56
7.	Conclusões.....	63
	Bibliografia	66
	ANEXO A1. Relatório SSM/Modelo Viagem/Otimização	71
	ANEXO A2. Modelo de Simulação em ARENA	96

Índice de Tabelas

Tabela 1.1: Distâncias dos troços do percurso fluvial (IPTM 2013)	2
Tabela 3.1: Resumo das características dos sistemas de carga/descarga (Van Vianen et al. 2011)..	11
Tabela 3.2: Capacidades dos sistemas de armazenamento	12
Tabela 3.3: Dimensões Típicas das pilhas de carga (Van Vianen et al. 2011)	13
Tabela 3.4: Capacidade de armazenamento em percentagem do fluxo de carga anual	13
Tabela 3.5: Comprimento do cais do terminal fluvial	15
Tabela 3.6: Características do monte de carga genérico considerado.....	15
Tabela 4.1: Classificação da profundidade da água	23
Tabela 4.2: Comparação e correcção dos valores do peso leve	30
Tabela 4.3: Características dos segmentos de viagem considerados.....	34
Tabela 4.4: Características consideradas para os terminais	35
Tabela 4.5: Sumário dos custos do porto de marítimo (Aveiro).....	35
Tabela 4.6: Variáveis de projecto.....	37
Tabela 4.7: Restrições Principais	37
Tabela 4.8: Características dos motores considerados	38
Tabela 4.9: Características do navio óptimo	39
Tabela 4.10: RFR e índices EEDI obtidos para os cenários LNG e MDO	41
Tabela 5.1: Parâmetros da distribuição <i>Gamma</i>	45
Tabela 5.2: Parâmetros da distribuição Normal	47
Tabela 6.1: Cenários de simulação	56
Tabela 6.2: Factores de ocupação recomendados em (UNCTAD 1985) e em (Memos 2000).....	59
Tabela 6.3: Ocupação do espaço de armazenamento dos terminais.....	61
Tabela 7.1: Características do navio rio-mar LNG	63
Tabela A.1: Elementos do modelo de simulação	97

Índice de Figuras

Figura 1.1: Mapa rio Douro.....	1
Figura 1.2: Eclusa Carrapatelo.....	2
Figura 2.1: Tipos de embarcações para transporte fluvial	4
Figura 3.1: Sistemas de carga (Ligteringen & Velsink 2012)	11
Figura 3.2: Secção e vista longitudinal de um monte de carga (<i>stockpile</i>).....	12
Figura 3.3: Proposta para um arranjo geral do terminal fluvial	16
Figura 3.4: Sugestão para um possível arranjo da área de armazenamento no terminal de Aveiro....	18
Figura 4.1: Componentes do Modelo de síntese do navio (SSM)	21
Figura 4.2: Plano geométrico de um possível casco	22
Figura 4.3: Esboço da configuração da secção mestra	22
Figura 4.4: Comparação dos métodos de previsão do <i>squat</i>	24
Figura 4.5: Comparação dos métodos de previsão de resistência em águas pouco profundas	26
Figura 4.6: Preços dos combustíveis em 2013 (Fearnleys, 2013).....	29
Figura 4.7: Interpolação do factor correctivo do peso leve	30
Figura 4.8: Comparação dos resultados do peso leve.....	31
Figura 4.9: Comparação dos valores de peso bruto	32
Figura 4.10: Classes Principais de dados	32
Figura 4.11: Classe <i>Leg</i>	33
Figura 4.12: Classe Navio (<i>Ship</i>)	34
Figura 4.13: Arquitectura da ferramenta de <i>software</i> (Merino da Silva & Ventura 2014)	36
Figura 4.14: Arranjo da zona de armazenamento de LNG	38
Figura 4.15: Tanque contentorizado de LNG (Wartsila LNG PAC)	39
Figura 4.16: Decomposição dos custos de viagem (Cima- MDO, Baixo-LNG)	40
Figura 5.1: Formas de estudar um sistema (Law & Kelton 2000).....	42
Figura 5.2: Funcionamento do Terminal Fluvial.....	44
Figura 5.3: Função de probabilidade <i>Gamma</i>	46
Figura 5.4: Funcionamento do Terminal de Aveiro (navios rio-mar).....	49
Figura 5.5: Funcionamento do Terminal de Aveiro (Navio Handysize)	51
Figura 6.1: Animação do Modelo de Simulação (Rockwell Automation 2010)	52
Figura 6.2: Tempo de viagem e parado, em horas, com restrição (à esquerda). Tempo de viagem, em horas, sem restrição (à direita).....	53
Figura 6.3: Resposta do modelo á variação da capacidade do sistema de descarga no terminal marítimo.....	55
Figura 6.4: Resposta do modelo á variação do número de postos de amarração	55
Figura 6.5: Tempo em Porto.....	57
Figura 6.6: Toneladas por navio-hora em porto	58
Figura 6.7: Tempo de espera por cais	58
Figura 6.8: Factor de ocupação dos postos de amarração e dos sistemas carga/descarga	60
Figura 6.9: Percentagem de utilização das eclusas.....	62
Figura 6.10: Tempo de espera nas eclusas	62
Figura A.1: Estrutura básica de um modelo	96
Figura A.2: Modelo de simulação	98
Figura A.3: Terminal Fluvial-Modelo de Simulação	100
Figura A.4: Percurso entre terminais - Modelo de simulação	101
Figura A.5: Entrada no terminal marítimo- Modelo de Simulação	102
Figura A.6: Navios rio-mar no terminal marítimo - Modelo de Simulação	103
Figura A.7: Navios <i>Handysize</i> no terminal marítimo - Modelo de Simulação	104
Figura A.8: Tráfego fluvial - Modelo de simulação.....	105

Índice de Abreviaturas/Símbolos

\bar{L}_{vessel}	Média dos comprimentos dos navios [m]
h_{pile}	Altura do monte de carga [m]
A_C	Área da secção do canal [m ²]
A_S	Área da secção mestra submersa do navio [m ²]
$A_{crosspile}$	Área da secção transversal de um monte de carga [m ²]
$A_{storage}$	Área de armazenamento [m ²]
C_B	Coefficiente de finura total
F_{nh}	Número de <i>Froude</i> de profundidade
L_{OA}	Comprimento fora a fora [m]
L_{pp} ou L	Comprimento entre perpendiculares [m]
L_q	Comprimento do cais [m]
Q_{anual}	Carga transportada anualmente [ton/ano]
$R_T(\infty)$	Resistência em águas profundas [kN]
$R_T(h)$	Resistência em águas pouco profundas [kN]
S_{MAX}	<i>Squat</i> máximo [m]
S_b	<i>Squat</i> à popa [m]
T_{det}	Tempo de serviço determinístico, em condições normais [min]
T_{det}	Valor determinístico do tempo de carga ou descarga [horas]
T_{stoc}	Tempo de serviço estocástico sob condições perturbadas [min]
T_{stoc}	Valor estocástico do tempo de carga ou descarga [horas]
V_S	Velocidade do navio [m/seg]
V_g	Volume específico da garra [m ³]
$Vol_{máx,pile}$	Volume máximo de um monte de carga [m ³]
Z_S	<i>Sinkage</i> do navio [m]
b'	Distância entre montes de carga [m]
b_{pile}	Largura do monte de carga [m]
l_{pile}	Comprimento do monte de carga [m]
n_{berth}	Número de postos de amarração
$t_{retorno}$	Tempo de retorno do investimento [anos]
$\Delta Investmento$	Investimento adicional [\$]
B	Boca [m]
BOF	Factor de ocupação do posto de amarração
BTU	Unidade Térmica Britânica
CDW	Capacidade de carga do navio (<i>Cargo deadweight</i>) [ton]
C_v	Coefficiente de variação para a função <i>Gamma</i>
D	Pontal [m]
DWT	Porte bruto, <i>Deadweight</i> [ton]
EEDI	Índice de eficiência energética para navios (<i>Energy Efficiency Design Index</i>)
GT	Arqueação bruta do navio
H	Profundidade da via de navegação [m]
IMO	<i>International Maritime Organization</i>
Leg	Segmento de viagem
LNG	<i>Liquidified Natural Gas</i> (Gás Natural liquefeito)
LWT	Peso leve do navio [ton]
MDO	<i>Marine Diesel Oil</i>
PPI	Indicador de desempenho portuário (<i>Port Performance Indicator</i>)
QT	Quantidade de carga carregada ou descarregada [ton]
RFR	Frete mínimo requerido (<i>Required Freight Rate</i>) [\$/ton]
S	Coefficiente de bloqueio
SSM	Modelo de Síntese do Navio
T	Calado [m]
TAB	Tonelagem de Arqueação Bruta
TUP	Tarifa de uso de porto [\$]
UKC	Espaço livre abaixo da quilha (<i>Under Keel Clearance</i>)[m]
$V_{carregado}$	Velocidade do navio carregado [nós]
V_k	Velocidade do navio [nós]

Vlastro	Velocidade do navio em lastro [nós]
W	Largura do canal de navegação [m]
A	Factor de forma da função <i>Gamma</i>
B	Factor de escala da função <i>Gamma</i>
M	Média
Σ	Desvio padrão
T	Tempo total da operação [horas]
d	Caimento do navio [m]

1. Introdução

1.1 Enquadramento e Motivação

Ao longo dos últimos anos o Governo Português tem vindo a negociar a exploração das jazidas de minério de ferro localizadas no concelho de Torre de Moncorvo, sub-região do Douro. Uma das questões associadas à exploração da mina é o transporte do minério desde as imediações da mina até a um porto de exportação, no caso, Aveiro ou Leixões. Algumas das opções de transporte que podem ser tidas em consideração são: o transporte flúvio-marítimo, o transporte ferroviário ou o transporte através de um mineroduto. Contudo, esta dissertação debruçar-se-á sobre a primeira opção, o transporte flúvio-marítimo.

Apesar de ser um dos mais antigos modos de transporte e de ser altamente dependente de condições ambientais tais como a profundidade e a largura da via de navegação, correntes, variações dos níveis de água, etc. o transporte fluvial ou *Inland* (navegação em vias interiores) em conjunto com a tecnologia contemporânea permite uma total integração deste modo de transporte com todos os outros, inclusive com a navegação de longo curso, tornando-o num modo de transporte de carga bastante competitivo.

De acordo com a Comissão Económica para a Europa- *Inland Transport Committee* (ITC) as principais vantagens associadas a este modo de transporte são: a relação custo-eficiência, menor consumo de energia de propulsão, segurança, eficiência ambiental e a menor utilização de terra (solo). Contudo também existem desvantagens tais como as já anteriormente referidas limitações geográficas e a influencia de factores hidrológicos, como cheias ou correntes (UNECE - ITC 1996).

No caso do rio Douro a sua navegabilidade é uma realidade, no entanto o aproveitamento das suas potencialidades, enquanto via de transporte, está longe de ser atingido. O canal de navegação tem uma extensão total de cerca de 200 km, contudo, o percurso fluvial considerado no transporte de minério de ferro tem extensão total de 176 Km, ou aproximadamente 95 milhas (entre a localização do terminal fluvial (ver Secção 3.2) e a barra do Douro). O percurso entre a foz do Douro e o terminal marítimo em Aveiro tem cerca de 32 milhas.



Figura 1.1: Mapa rio Douro

O canal de navegação apresenta uma largura mínima de 40 metros em leito rochoso e 60 metros em leito aluvial.

Local	Distância desde o terminal fluvial	
	Milhas	Km
Eclusa da Valeira	17	31
Eclusa da Régua	38	71
Eclusa do Carrapatelo	60	111
Eclusa da Crestuma	83	154.5
Barra do Douro	95	176

Tabela 1.1: Distâncias dos troços do percurso fluvial (IPTM 2013)

Eclusas

O percurso fluvial é dividido em cinco troços que são delimitados por quatro eclusas (Tabela 1.1 e Figura 1.1). Todas as eclusas têm características semelhantes, 12 metros de largura e entre os 86 e os 92 metros de comprimento. De acordo com (IPTM 2013) um navio com cerca de 83 metros fora a fora consegue passar por todas as eclusas.



Figura 1.2: Eclusa Carrapatelo

Profundidade

Actualmente o canal permite profundidades mínimas de 4.20 metros desde a foz do Douro até à localidade de Pinhão (situada entre a eclusas da Régua e da Valeira) e de 2.50 metros desde esse local até à eclusa do Pocinho.

Altura máxima

Ao longo do canal de navegação existem várias pontes e outras obstruções sendo que a altura máxima livre (*Air draft*) é de cerca de 7 metros, devido à entrada a jusante da eclusa de Crestuma.

Condições hidrológicas

Existem algumas condicionantes hidrológicas impostas pelo regime de cheias. De acordo com (Peixeiro 2012) no período de Dezembro a Fevereiro o caudal máximo para navegar em segurança é ultrapassado obrigando à paragem da navegação durante 38 dias, em média, dentro desse período.

Ao seleccionar esta solução de transporte é necessário considerar todas estas condicionantes que são impostas e estão inerentes a este canal de navegação. É necessário também considerar o tráfego fluvial já existente, nomeadamente a actividade marítimo-turística, pois representa grande parte do tráfego actual e encontra-se em franca expansão.

1.2 Objectivos e trabalho desenvolvido

Pretende-se com esta dissertação desenvolver um estudo de viabilidade para esta alternativa de transporte que permita analisar as características óptimas da frota de navios necessária para responder a este problema de transporte, bem como dimensionar as características principais dos dois terminais envolvidos.

Este estudo é dividido em duas áreas, que apesar de distintas, estão interligadas neste problema de transporte. A primeira está ligada ao dimensionamento inicial do navio rio-mar que realizará o transporte do minério de ferro do terminal fluvial até ao terminal marítimo. A segunda é a análise de todo o sistema de transporte (terminais, navios, percurso, etc.) e a determinação das características principais dos dois terminais envolvidos.

Para o dimensionamento do navio pretende-se desenvolver uma metodologia para determinar as características principais de um navio adequado (óptimo) para este problema de transporte, tendo em conta todos os aspectos técnicos, económicos e ambientais envolvidos. O dimensionamento será feito com base num modelo de síntese do navio desenvolvido por Ventura (2013). Este modelo de síntese será adaptado de forma a conseguir suportar e considerar todos os aspectos relacionados com a navegação *inland* (calados e canais restritos, velocidades reduzidas, eclusas, etc.) bem como considerar as emissões geradas pelo navio. Para além destas adaptações será desenvolvido um modelo de viagem que permite dividir o percurso a realizar em vários troços (rio e mar, por exemplo) associando diferentes custos, modos de operação e velocidades a cada um deles.

A análise do sistema de transporte será feita através de métodos de simulação. Através desta análise será possível determinar as características principais óptimas para cada terminal. Para tal será desenvolvido o modelo de simulação de eventos discretos onde estão englobadas todas as características e limitações do percurso fluvial e marítimo, anteriormente descritas, bem como os procedimentos de entrada nos respectivos terminais.

O modelo desenvolvido neste estudo permitirá no final não só obter a solução tida como óptima para este problema de transporte mas também aferir a interligação que existe entre as características dos terminais, os aspectos logísticos e o projecto preliminar do navio.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação tem a seguinte estrutura: no segundo capítulo encontra-se a revisão bibliográfica onde é analisada a actividade de investigação mais relevante na área de optimização não-linear do navio e na área de logística e dimensionamento de terminais de carga; no terceiro capítulo são apresentadas as características da rota de transporte; o quarto capítulo incide exclusivamente sobre o dimensionamento dos terminais de carga e descarga; o quinto capítulo é dedicado apenas ao dimensionamento inicial do navio, modelo de síntese do navio, modelo de viagem, processo de optimização e serão apresentadas as características tidas como óptimas de um navio graneleiro rio-mar para este problema de transporte; no sexto capítulo é apresentado o modelo de simulação desenvolvido; no sétimo capítulo é implementado e testado todo o modelo de simulação e são apresentados resultados; no oitavo e último capítulo são apresentadas as conclusões finais.

2. Revisão bibliográfica

O papel da navegação fluvial como meio de transporte económico e seguro será sempre significativo para o transporte de todos os tipos de carga, sendo um dos principais meios de transporte para graneis sólidos e líquidos em grande quantidade. Os tipos de navios que operam em vias fluviais podem ser divididos de acordo com a tecnologia/sistema de transporte que utilizam (Radmilovi & Mara 2011).

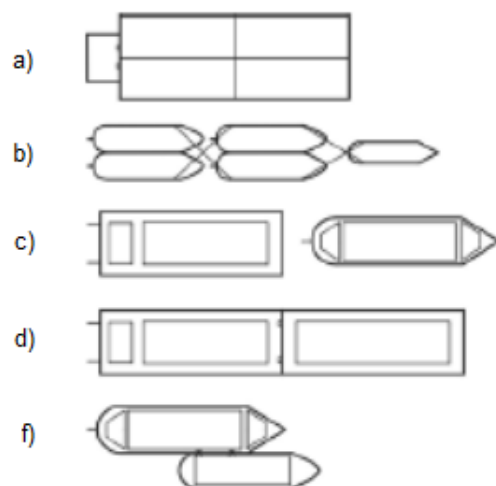


Figura 2.1: Tipos de embarcações para transporte fluvial

a) Barcaças empurradas por rebocador; b) barcaças puxadas por rebocador; c) barcaças autopropulsionadas e navios flúvio-marítimos; d) barcaça autopropulsionada em conjunto com barcaça empurrada; e) barcaça autopropulsionada em conjunto com barcaça rebocada (puxada).

Todos os tipos de embarcações representados na Figura 2.1 existem e operam nas vias fluviais europeias. De um ponto de vista logístico e de simplicidade de operação as barcaças autopropulsionadas e os navios flúvio-marítimos são os tipos de embarcação mais simples e versáteis. Tendo em conta a existência de eclusas, a morfologia da via de navegação do Douro e o facto de no problema de transporte em estudo existir um percurso de navegação marítimo-costeira considerou-se que este tipo de embarcação, o navio flúvio-marítimo, será a melhor opção relativamente aos outros tipos.

Um dos objectivos desta dissertação é determinar as características principais de um navio adequado (ótimo) para este problema de transporte. A optimização no âmbito do projecto preliminar de navios não é recente, existem nesta área inúmeros estudos para determinar as dimensões e características óptimas dos navios. Em (Kendall 1972), define-se tamanho óptimo de um navio como aquele que consegue minimizar o custo total de transporte. Kendall divide os custos de transporte em duas subcategorias, custo do navio (*Ship Costs*) em que estão incluídos encargos de capital e custos de funcionamento, e custos nos terminais (*Terminal costs*) onde estão compreendidos taxas portuárias, custos de carga/descarga e ainda custos relacionados com o armazenamento da carga. O método utilizado para obter a dimensão ou tamanho óptimo do navio é gráfico, traçando rectas e intersecções.

Jansson & Shneerson (1982) definem navio óptimo como um navio que consegue transportar carga ao menor custo por tonelada de carga (custo ao armador). A dimensão óptima para um navio é então determinada minimizando os custos relativos à sua operação, quer durante a viagem quer em porto. Neste estudo o modelo de optimização desenvolvido é feito para um caso geral, não especificando o tipo de carga transportada nem o tipo de rota. Estes aspectos específicos relativos à rota e às

características do navio em conjunto com os coeficientes “gerais” obtidos através deste modelo determinarão a dimensão óptima para um navio num caso específico. O custo por tonelada de carga é definido por uma função matemática dada pela soma dos custos por tonelada em porto e em a viagem com os custos de carga, tendo como variável a dimensão do navio, nomeadamente o *deadweight*. Estes custos além de dependerem da dimensão do navio dependem também da capacidade de carga e descarga nos terminais (custos em porto) e da capacidade de carga do navio (custos de viagem). O coeficiente referente à capacidade de carga e descarga do porto deriva de dados estatísticos (neste caso referentes aos portos de Haifa e Ashdod entre 1969 e 1970). O mínimo custo por tonelada será então o zero da primeira derivada da função acima descrita, de onde se obtém a dimensão “óptima” do navio, a dimensão para a qual o custo é mínimo. Garrod & Miklius (1985) revisitam a abordagem feita em (Jansson & Shneerson 1982) modificando-a assumindo a taxa de carga e descarga nos terminais como função do tamanho do navio ao invés de ser considerada constante.

Em (Ray et al. 1995) é desenvolvido um modelo de optimização global para projecto preliminar de navios. Este modelo procura a solução óptima global e não apenas uma solução óptima local, isto é, a aplicação de um método de optimização não linear consegue apenas assegurar uma solução óptima local e no caso de a função objectivo ser não convexa (caso comum neste tipo de problemas) essa solução óptima local não será necessariamente a solução óptima global. Para tal, neste estudo são comparados dois métodos: O método *Multistart* com duas variantes, utilizando o método *Hooke and Jeeves* e o *Rosenbrock* (Gottfried & Weisman 1973) e o método *Simulated Annealing* (Bertsimas & Tsitsiklis 1993) em conjunto com o método *Hooke and Jeeves*. Os métodos *Hooke and Jeeves* e *Rosenbrock* são métodos de pesquisa (*Search Methods*). Estes métodos são baseados em optimização local e requerem algum tipo de diversificação, sem diversificação estes métodos apenas “trabalharão” numa pequena área da solução, tornando-se impossível encontrar a solução óptima global. Uma das formas de alcançar a diversificação necessária é reiniciar os métodos de procura a partir de uma nova solução aumentando assim o campo de soluções explorado ou a explorar. Os métodos *MultiStart* e *Simulated Annealing* podem ser utilizados na construção de novas soluções, aumentando o “horizonte” do processo de busca (Martí 2003).

As variáveis de projecto seleccionadas por Ray et al. (1995) foram: L, B, T, D, Cb, Cm e Cw. Tendo como objectivos a minimização dos custos de construção, a minimização dos requisitos de potência e a minimização do peso de aço necessário. As formulações empíricas utilizadas para a estimativa do peso e outros factores foram retiradas de (Schneekluth & Bertram 1987) e de (Watson & Gilfillan 1977). Os autores concluíram que em termos computacionais (velocidade do processo) o método *Multistart* em conjunto com o método de procura *Hooke and Jeeves* é mais eficiente que o *Rosenbrock* chegando ambos a soluções óptimas bastante próximas. O método *Simulated Annealing* encontra a solução óptima num intervalo de tempo comparável ao método *Hooke and Jeeves*. Concluíram ainda que a solução óptima depende bastante dos valores iniciais que são introduzidos no modelo.

Em (Artana et al. 2002) é desenvolvido um modelo que determina as dimensões principais óptimas de um navio, bem como os requisitos necessários de potência na fase de projecto básico. Este problema de optimização foi desenvolvido numa folha de cálculo no *Microsoft Excel* utilizando a aplicação *Premium Solver Platform*, uma versão avançada do solver existente no *Excel*. Os autores justificam a utilização do *Microsoft Excel* afirmando que “este tipo de processos de optimização não necessita de esforços exaustivos na elaboração de códigos de programação, se o problema e o modelo de optimização estiverem bem definidos”. A aplicação *Premium Solver Platform* utiliza dois métodos de optimização. O método *Simplex*, no caso de um problema linear e o método GRG (*Generalized Reduced Gradient*), no caso de um problema não linear, ambos os métodos estão descritos em (Rao 2009). O modelo desenvolvido divide-se em cinco partes principais: argumentos de entrada, equações, restrições, argumentos de saída e função objectivo. A previsão de potência é baseada no método de *Harvald*. O projecto do hélice e a previsão de cavitação foram baseados na série

Wageningen B-series (Carlton 1994). Neste modelo de otimização foram também considerados factores relacionados com a fiabilidade da máquina principal, utilizando uma distribuição de *Weibull*. Os resultados da otimização são obtidos através da resolução de cada modelo várias vezes e com diferentes valores iniciais de decisão variáveis, mantendo constante o valor máximo e mínimo das restrições. Os resultados foram comparados com dados de navios já existentes e mostraram-se em concordância com estes.

Saha & Sarker (2010) elaboram um modelo de otimização (modelação paramétrica) para os parâmetros do casco em projecto preliminar considerando as limitações impostas pelas vias fluviais no Bangladesh. A função objectivo neste estudo é a resistência do casco, tendo como variáveis de projecto o comprimento do casco, a boca, o calado e a velocidade. Para a determinação inicial dos parâmetros do casco os autores recorrem a algumas formulações empíricas. No caso do comprimento do navio são mencionados três métodos, *Posdunine*, *Schneekluth* e a simples utilização do rácio entre comprimento e boca seguindo alguns valores recomendados por *Watson e Gilfillan*. O calado também é representado por um rácio, entre boca e calado, considerando um valor máximo segundo (Roseman et al. 1974). Outros parâmetros da forma do casco são calculados segundo as seguintes formulações: Coeficiente de finura total calculado pela fórmula de *Alexander*, coeficiente de secção mestra, coeficiente de área de flutuação e centro de flutuação longitudinal (LCB) calculados de acordo com (Schneekluth & Bertram 1987). Para a previsão da resistência do casco são enumerados três métodos: *Holtrop&Mennen*, *Hollenbach* e *Oortmerssen*. O algoritmo de otimização utilizado foi o SQP (*Sequential Quadratic Programming*).

Em Chen et al. (2011) é criado um modelo logístico interactivo que relaciona três sistemas, o projecto de navio (projecto preliminar), o sistema de transporte e sistema logístico. O objectivo deste estudo de otimização é minimizar o custo logístico por tonelada, o que garante uma solução óptima que engloba não só as dimensões óptimas dos navios, que irão ser utilizados no sistema de transporte, mas também as características óptimas de todo o plano logístico, nomeadamente as características dos terminais envolvidos. O modelo é implementado numa folha de cálculo e integra um módulo de simulação com o método Monte Carlo. A simulação servirá para variar o tempo de viagem, o tempo despendido em porto e a procura de minério de ferro no mercado, tornado assim todo o modelo de otimização mais realista. As distribuições probabilísticas utilizadas na simulação foram determinadas tendo como referência Assumma & Vitetta (2006). A otimização do navio é feita através do método GRG (Rao 2009) os valores obtidos desta otimização (deadweight, velocidade, etc.) são introduzidos como argumentos de entrada no módulo de simulação.

Tal como em Chen et al. (2011) esta dissertação também engloba a análise de todo um sistema de transporte. No âmbito da modelação matemática um sistema pode ser classificado como: Contínuo, Discreto ou de Eventos Discretos. Num sistema contínuo o seu estado varia continuamente no tempo e pode ser determinado através de um conjunto de equações diferenciais. Um sistema discreto é um sistema que é analisado apenas em alguns pontos regulares e fixos no tempo. Em relação a sistemas de eventos discretos a sua principal característica é o facto de estes sistemas serem completamente determinados por uma sequência de eventos que acontecem em pontos aleatórios no tempo e por alterações do seu estado nesses instantes de tempo. A área de investigação operacional é amplamente utilizada neste tipo de estudos através de métodos que vão desde a tradicional formulação matemática da teoria das filas de espera até á simulação. As soluções analíticas de modelos de fila de espera desempenham um papel importante na determinação e na análise de sistemas. Contudo, as soluções analíticas são possíveis apenas para uma porção limitada deste tipo de problemas. Para sistemas com alguma complexidade de redes e sistemas de fila de espera a simulação torna-se no método mais utilizado (Özgün & Barlas 2009).

Na análise de sistemas de transporte marítimo e operações portuárias existem vários estudos realizados com base nas metodologias acima descritas. Contudo, serão aqui referidos apenas aqueles que, de acordo com o autor, representam um bom exemplo da relação entre o sistema em análise e o método utilizado e que são utilizados como base de referência não só para esta

dissertação mas para outros estudos idênticos. Um bom exemplo é o modelo desenvolvido em (Case & Lave 1971) para determinar a capacidade óptima de um porto genérico. É utilizada a teoria das filas de espera para determinar o tempo médio de espera dos navios como função das distribuições das taxas de chegada e de serviço, distribuições de *Poisson* e exponencial respectivamente. A capacidade óptima do terminal é determinada em termos económicos, isto é, comparando o custo de construir um novo posto de amarração com o custo de atrasar um navio (custo associado ao tempo de espera).

Ergin & Yalciner (1991) estudam o problema de optimização para dois terminais: um terminal de contentores e um terminal de carga geral. Os modelos numéricos utilizados neste estudo consideram que os navios têm uma taxa de chegada que assume uma distribuição de *Poisson* e o tempo de serviço uma distribuição de *Erlang*. Os terminais são caracterizados pelo comprimento do cais e pelo número e capacidade dos equipamentos de carga e descarga. O terminal óptimo é determinado como aquele que tem o menor custo anual, que é dado pela soma dos custos do porto (custo dos cais e dos equipamentos) com os custos associados aos tempos de espera dos navios. O mesmo tipo de estudo é realizado em (Dundović & Zenzerovic 2000) para um terminal de carga geral. Para este estudo foi desenvolvido um modelo de filas de espera para os custos do terminal, este custo é obtido em função dos custos dos postos de amarração, dos equipamentos, das áreas de armazenamento, do navio e da carga em si.

O problema de optimização de um terminal pode ser também abordado pelo ponto de vista operacional através de indicadores de desempenho que caracterizam a eficiência e qualidade de serviço do terminal. Em (Wadhwa et al. 1990) é desenvolvido um modelo de simulação para ser utilizado como um instrumento de decisão para um terminal de granel. Este modelo concentra-se apenas nos navios e nas operações de carga e descarga, não considerando o espaço de armazenamento. São analisados vários cenários, com diferentes configurações do terminal (número de postos de amarração, de equipamentos de carga/descarga e respectivas capacidades) e é determinada a relação entre a capacidade do terminal e vários indicadores de desempenho.

Em (Kia et al. 2002) é avaliado o desempenho de um terminal de contentores considerando diferentes técnicas de operação. O modelo de simulação desenvolvido neste estudo é constituído por: chegadas de navios, carga/descarga de contentores, movimentação dos contentores dentro do terminal e a ligação da área de armazenamento com a saída de contentores por comboio ou camião. São analisadas duas técnicas diferentes de operação e o desempenho do terminal é avaliado através de três indicadores: tempo em cais, ocupação da área de armazenamento e a taxa de ocupação do cais.

Cortés et al. (2007) desenvolvem um modelo de simulação de eventos discretos para simular tráfego do porto de Sevilha. O modelo de simulação considera os seguintes elementos: chegadas de navios, operação de eclusagem (necessária para a entrada no porto), atribuição de cais, terminal de contentores, terminais de granel (cimento e cereais), terminal de carga geral e chegadas e partidas de camiões. As chegadas dos navios seguem uma distribuição baseada em dados reais do porto. O modelo produz como *outputs* vários indicadores de desempenho: tempo em cais, tempo de espera e taxa de ocupação da área de armazenamento.

Em (Ambrosino & Tánfani 2010) é apresentado um modelo de simulação de eventos discretos para apoio no plano de expansão do terminal de contentores do porto de Génova. O modelo é constituído por três módulos: o fluxo de navios, o fluxo de importação e o fluxo de exportação de contentores. Estes módulos gerem a sequência de acções de todos os "objectos" intervenientes no modelo (navios e contentores) ao longo de uma série de processos logísticos. Foram utilizados dados reais para estimar o tempo entre chegadas dos navios, o tempo de serviço, o tempo entre chegadas dos camiões e comboios e o tempo de serviço no transporte interno e na área de armazenamento. Para analisar os factores críticos do plano de expansão foram testados vários cenários diferentes. A análise destes cenários foi feita através de vários indicadores de desempenho, tais como: tempo em

cais, a permanência média dos contentores no terminal (*dwell time*), fluxo de importação/exportação, taxa de utilização de cais, etc.

Sheikholeslami et al. (2013) desenvolvem também um modelo de simulação de eventos discretos para analisar o problema de atribuição de cais e de equipamento de carga/descarga no porto de Rajae. O modelo é dividido em três partes principais: a operação em cais, operação dos equipamentos de carga/descarga e a atribuição de rebocadores. Este modelo tem em consideração o tráfego dos navios na entrada em porto e o efeito das marés. A influência nas diferentes estratégias de atribuição de cais e de equipamentos é avaliada de acordo com dois indicadores de desempenho, o tempo médio de serviço e o tempo médio de espera do navio.

Considerando os exemplos aqui referidos e os métodos existentes para lidar com este tipo de sistemas (problemas de transporte) pode-se concluir que no caso de existir uma solução analítica para um modelo matemático que seja computacionalmente eficiente é preferível realizar a análise do sistema através dessa solução em vez da simulação. Contudo, a complexidade do sistema de transporte aqui em análise (navio, eclusa, tráfego fluvial, terminais, etc.) eleva também a complexidade do modelo matemático impedindo assim a possibilidade de desenvolver uma solução analítica válida (Bichou et al. 2013). Considera-se assim que a melhor forma de analisar este sistema de transporte é através da simulação de eventos discretos.

3. Terminais de granéis sólidos

De acordo com (Lodewijks et al. 2007) um terminal de granéis sólidos é utilizado como um *buffer* entre o transporte internacional ou intercontinental e o transporte interior ou terrestre e vice-versa. Estes terminais são sistemas de transbordo e transporte, compostos por diferentes subsistemas que permitem uma divisão de funções de acordo com o lugar, o tempo, o pessoal e os meios.

Um terminal exerce duas funções principais: o manuseamento de carga e o seu armazenamento. Estas duas funções podem ser divididas em várias subfunções ou processos. Para cada um destes processos são utilizados diferentes componentes, equipamentos e meios de transporte. Dependendo da direcção do fluxo de carga um terminal pode ainda ser designado como um terminal de importação ou de exportação. Este facto e o tipo de carga movimentada influenciam o tipo de sistemas e equipamentos utilizados no terminal.

O manuseamento de carga é caracterizado pelos sistemas de carga/descarga, o armazenamento é caracterizado por dois factores preponderantes: o espaço e os sistemas de armazenamento. Para além destes dois factores existem ainda outros dois que são fundamentais ao funcionamento do terminal: as características do cais e da bacia de manobra.

3.1 Considerações no dimensionamento dos terminais

Neste estudo estão sob consideração dois terminais: um terminal fluvial (não existente) e um terminal marítimo. O terminal fluvial é um terminal de exportação, enquanto o terminal marítimo é caracterizado por uma actividade de transbordo (*Transshipment*): descarrega o minério transportado pelos navios rio-mar e carrega-o para navios de maior porte. Estes aspectos influenciam a escolha do tipo de sistemas de manuseamento de carga e as áreas e sistemas de armazenamento. Os subcapítulos que se seguem expõem as considerações que foram feitas relativamente a estes aspectos.

3.1.1 Sistemas de carga/descarga

Existe uma ampla variedade de sistemas de carga/descarga. Estes sistemas podem ser divididos em duas classes relativamente à forma como operam, podendo ser contínuos ou descontínuos.

Sistemas de descarga

Os principais sistemas de descarga existentes são: garras (*grabs*), sistemas pneumáticos, elevadores de balde (*bucket elevator*), transportadores verticais (*vertical conveyor*), sistemas de lamas (*slurry*) e navios com meios próprios de descarga. Os sistemas pneumáticos são utilizados apenas para cargas com um baixo peso específico e viscosidade, como é o caso do cimento, cereais, carvão em pó, etc. Os sistemas de transporte vertical são indicados para lidar com cargas friáveis ou quebradiças. Os elevadores de balde são um sistema contínuo com uma capacidade que pode variar entre as 1000 e as 5000 toneladas por hora, contudo, são menos eficientes em termos de custo por tonelada descarregada, comparativamente com os sistemas de garra.

De acordo com (UNCTAD 1985) o sistema mais utilizado em operações de descarga (principalmente no caso de minério de ferro) é o sistema de garras que consiste apenas em recolher material do porão do navio e descarregá-lo numa tremonha de recepção, localizada no cais, que alimenta um sistema de *conveyor* que fará o transporte da mercadoria do cais para o espaço de armazenamento.

Existem três tipos de guindastes ou gruas que operam este sistema de garras:

- **Guindaste de translação (*travelling overhead trolley crane*):** que se desloca paralelamente ao cais trabalhando ao longo de todo o comprimento do navio fazendo a garra deslocar-se por cima de cada porão de carga. A capacidade de descarga deste tipo de guindaste varia entre as 500 e as 2000 toneladas por hora;
- **Guindaste giratório (*revolving grabbing crane*):** é o tipo de guindaste mais utilizado podendo descarregar material directamente em camiões e vagões de comboios, para além da tremonha de recepção, isto é possível porque este guindaste, tal como o próprio nome indica, consegue girar cerca de 90°. A capacidade pode variar entre as 500 e 700 toneladas, o movimento de rotação de 90° pode limitar essa capacidade para cerca de 180 a 250 toneladas por hora;
- **Guindaste móvel:** que costuma ser utilizado em terminais mais pequenos. A capacidade tem valores idênticos aos praticados pelo guindaste giratório.

Sistemas de carga

Os sistemas de carga são mais simples que os sistemas de descarga e são na sua maioria sistemas do tipo contínuo. As capacidades destes sistemas podem variar entre as 1,000 e as 10,000 toneladas por hora (como é o caso do terminal de carvão na Baía Richard na África do Sul). Este tipo de capacidade consegue ser atingido devido à simplicidade técnica deste sistema, que necessita apenas ser alimentado com carga através de um sistema de *conveyor belts*, descarregando-a para o porão do navio através de uma “manga” de alimentação utilizando apenas a força da gravidade. As mangas de alimentação podem ser em espiral ou telescópicas e podem ter um lançador de centrifugação para distribuir uniformemente a carga no porão.

Os sistemas de carga podem ser classificados em três categorias de acordo com o modo como se deslocam ou movimentam (Figura 3.1):

- **Guindastes móveis (*travelling shiploader*):** que se deslocam ao longo de todo o cais paralelamente ao navio;
- **Sistemas de carga radiais (*radial shiploader*):** mais utilizados em unidades *offshore*, que consistem num guindaste capaz de girar cerca de 90°, deslocando-se num carril circular;
- **Sistemas de carga lineares (*linear shiploader*):** que tal como os sistemas radiais conseguem girar em torno de si próprios (também cerca de 90°) mas estando estes apoiados em carris em linha recta, conseguindo conciliar assim movimentos de rotação e de translação.

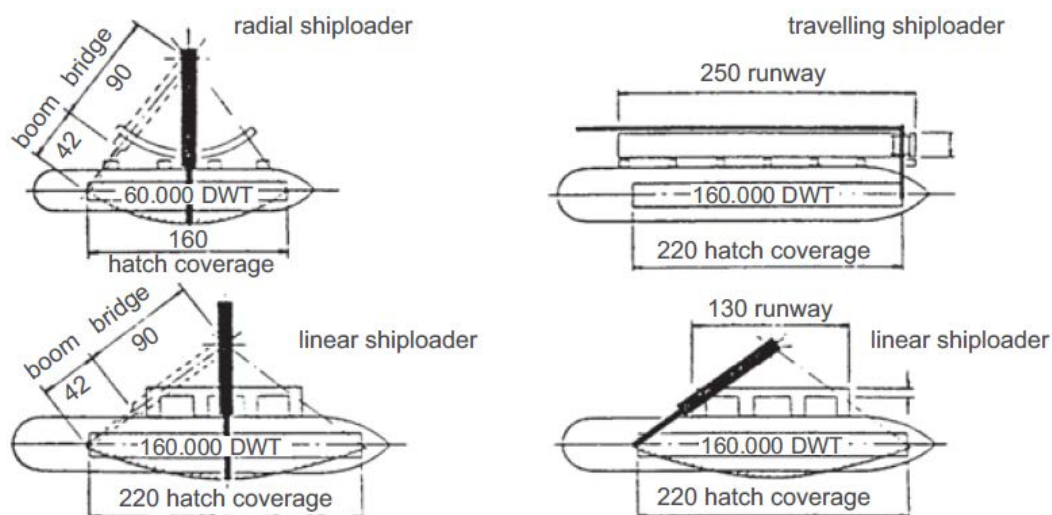


Figura 3.1: Sistemas de carga (Ligteringen & Velsink 2012)

Na Tabela 3.1 estão resumidas as principais características dos sistemas de carga/descarga. Estes valores têm como base um estudo feito por Van Vianen et al. (2011) onde são analisadas as características de cerca de 49 terminais de graneis sólidos.

Tabela 3.1: Resumo das características dos sistemas de carga/descarga (Van Vianen et al. 2011)

	Capacidade [ton/h]		Número de Sistemas		Factor de carga/descarga
	Variação	Valores Típicos	Variação	Valores Típicos	
Sistemas de Carga	1000 - 20000	3000	1 - 16	2 - 4	1.5 - 2.5
Sistemas de Descarga	500 - 5000	2200	2 - 11	3 - 6	3 - 4.5

De acordo com (Van Vianen et al. 2011) define-se factor de carga/descarga como o rácio entre a capacidade total (de carga/descarga) instalada e a capacidade mínima necessária (necessária para o fluxo de carga anual).

3.1.2 Sistemas e área de armazenamento

Os espaços ou áreas de armazenamento podem estar expostos ao meio-ambiente, agrupados em pilhas de carga (*stockpiles*), ou abrigados dentro de armazéns ou silos. No caso do minério de ferro o armazenamento é feito em pilhas. Geralmente estas pilhas são organizados de duas formas, longitudinalmente (em linhas, paralelas umas às outras) ou no caso de terminais mais pequenos num monte circular.

As pilhas de carga são criadas por empilhadores (*stackers*), que recebem a carga do sistema de transporte horizontal (*conveyor belts*) e a amontoam de uma forma contínua. Na operação inversa a carga é recolhida e colocada no sistema de transporte horizontal através de máquinas de recolha (*reclaimers*). Existem ainda sistemas mistos que funcionam como empilhadores e máquinas de recolha. Todos estes sistemas deslocam-se no sentido longitudinal dos montes através carris localizados nos espaços (ou corredores) entre as pilhas de carga. Na Tabela 3.2 estão representados os valores típicos das capacidades dos sistemas de armazenamento, de acordo com (Kleinheerenbrink 2012).

Tabela 3.2: Capacidades dos sistemas de armazenamento

	Máximo [ton/h]	Média [ton/h]
<i>Stackers</i>	10000	3500
<i>Reclaimers</i>	15000	2500

As dimensões das pilhas de carga longitudinais tais como a altura e largura dependem das características dos equipamentos utilizados, neste caso empilhadores e máquinas de recolha. O comprimento dependerá das limitações geométricas do espaço reservado para a carga no terminal. Na Tabela 3.3 estão representadas as dimensões típicas dos montes de carga, de acordo com a análise feita em Van Vianen et al. (2011).

Se consideramos que o monte de carga na sua capacidade máxima tem uma secção transversal triangular, o seu volume e respectivas dimensões relacionam-se da seguinte forma:

$$Vol_{máx,pile} = l_{pile} \times b_{pile} \times h_{pile} \times \frac{1}{2} \quad 3.1$$

Onde l_{pile} é o comprimento da pilha, b_{pile} a largura, h_{pile} a altura e $Vol_{máx,pile}$ o volume máximo de carga. Esta situação acontece quando a altura h for igual à altura máxima permitida ($h_{máx}$), valor que advém da limitação imposta pelas características do empilhador, tal como já foi referido. O ângulo α que o monte de carga faz com o plano horizontal é o ângulo de repouso do material armazenado.

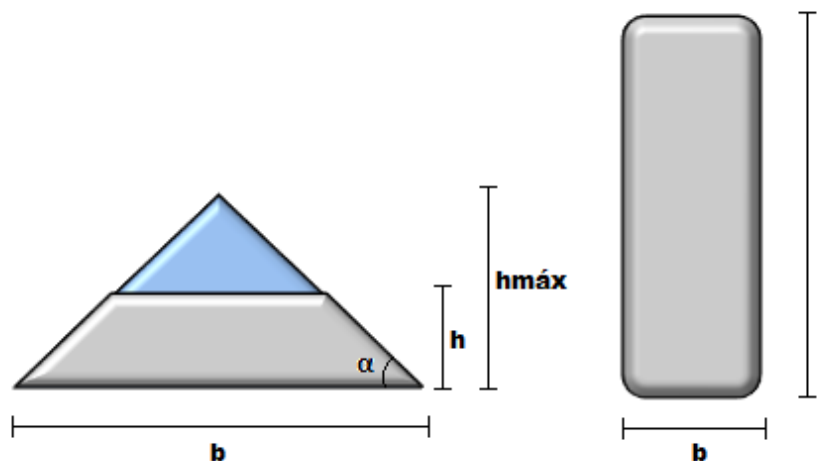


Figura 3.2: Secção e vista longitudinal de um monte de carga (*stockpile*)

Em (UNCTAD 1985) é proposto um método de cálculo que permite determinar todos os parâmetros dimensionais relacionados com a pilha de carga. Este método exige o conhecimento de algumas propriedades do material armazenado, tais como o ângulo de repouso e o factor de estiva (*stowage factor*). No caso do minério de ferro, de acordo com (Ligteringen & Velsink 2012), o ângulo de repouso é de cerca de 40° e o factor de estiva $0.4 \text{ m}^3/\text{ton}$, em média.

Tabela 3.3: Dimensões Típicas das pilhas de carga (Van Vianen et al. 2011)

	Terminal de Exportação	Terminal de Importação
Comprimento dos montes de carga [m]	300 - 1300	300 - 1200
Valores Típicos [m]	665	800
Largura dos montes de carga [m]	30 - 75	30 - 85
Valores Típicos [m]	45	50

A área de armazenamento deve ser projectada de forma a conseguir acomodar a maior quantidade de material no menor espaço possível, tendo em conta diversos factores, tais como:

- Capacidade de carga do solo;
- Capacidade de cada monte de carga;
- Distribuição da chegada dos navios;
- Dimensão dos navios;
- Capacidade dos sistemas carga e descarga.

A capacidade de armazenamento de um terminal é um parâmetro complexo de ser determinado porque depende em grande parte de parâmetros que variam bastante, como é o caso da distribuição da chegada de navios. No entanto a determinação deste parâmetro é de extrema importância, isto porque o objectivo é ter uma capacidade que corresponda exactamente à necessidade do terminal caso contrário corre-se o risco de ter uma área sobredimensionada, o que implica um investimento em terreno que na verdade nunca será utilizado, ou no caso contrário uma área subdimensionada que poderá por em causa todo o funcionamento do terminal congestionando todo o sistema de carga e descarga.

De acordo com (Lodewijks et al. 2007) uma área de armazenamento com capacidade para cerca de 10% do fluxo anual de carga que passa pelo terminal é considerada um valor aceitável. Por outro lado, segundo (UNCTAD 1985) um terminal de importação de minério de ferro deve ter uma área de armazenamento com capacidade 50% maior do que a do maior navio que pode vir a receber. Em (Van Vianen et al. 2011) é concluído que um terminal de importação tende a ter mais capacidade de armazenamento do que um terminal de exportação (Tabela 3.4).

Tabela 3.4: Capacidade de armazenamento em percentagem do fluxo de carga anual

	Terminal de importação	Terminal de exportação
Capacidade de armazenamento [%]	5 - 22	3 - 10

Para o cálculo do espaço de armazenamento, este estudo assume que as pilhas de carga têm uma largura constante de 20 metros, são cheias até à sua altura máxima e têm sempre uma distância de 20 metros entre elas. Considera-se também que as capacidades dos empilhadores e das máquinas de recolha não afectam o desempenho dos sistemas de carga e descarga.

Sistema de *Conveyor Belts*

O transporte de carga desde o cais para a área de armazenamento e no sentido contrário, da área de armazenamento para o cais, é feito através de um sistema de transporte horizontal. O sistema mais utilizado para este efeito é sistema de *conveyor belts*. De acordo com (Ligteringen & Velsink 2012) estes sistemas são simples de implementar, eficientes e de manutenção económica. Uma das desvantagens destes sistemas é o limite do ângulo vertical até ao qual conseguem operar. Os sistemas de tapetes rolantes podem ter vários formatos, podem ser fechados como é o caso dos *pipe conveyors* ou dos *hose belt conveyor*, ou como na maioria dos casos, abertos. Existem também sistemas que permitem dobrar o tapete rolante em U (uma espécie de sistema fechado) impedindo assim a libertação de pó que a própria carga pode libertar ao ser transportada. A transposição de

carga de um tapete para outro, como no caso de uma mudança de direcção, é feita num ponto de transferência que é fechado impedindo assim também a libertação de pó.

3.1.3 Cais

O comprimento acostável do cais é um parâmetro que também está relacionado com o dimensionamento de um terminal. De acordo com (Velsink 1994) o comprimento de um cais deve ser o mesmo do que o do maior navio que o terminal recebe com a adição de 10 a 15 metros para vante e para ré. Esta formulação funciona apenas se o cais tiver um único posto de acostagem (*Berth*), para o caso de vários postos o comprimento do cais deve ser dado segundo a seguinte expressão (Kleinheerenbrink 2012):

$$L_q = 1.1 \times n_{berth} \times (\bar{L}_{vessel} + 15) + 15 \quad 3.2$$

Onde L_q é o comprimento do cais em metros, n_{berth} o número de postos de amarração e \bar{L}_{vessel} a média dos comprimentos dos navios em metros. Nesta formulação é considerado um espaçamento de 15 metros entre cada navio. A constante de valor igual 1.1 resulta de um estudo realizado pela UNCTAD que determina que para um comprimento médio de cais 1.1 vezes maior que o comprimento médio dos navios não ocorrem tempos de espera adicionais (UNCTAD 1985).

3.1.4 Bacia de manobra

Uma bacia de manobra é parte integrante de um canal de navegação ou de uma zona portuária. Entende-se bacia de manobra como um espaço com dimensões suficientes para que um navio consiga mudar direcção ou proceder ao posicionamento para a manobra de acostagem. De acordo com (Memos 2000) para um navio com apenas um leme o diâmetro da bacia de manobra deverá ser de cerca de $4L_{OA}$ (quatro vezes o comprimento fora a fora do navio), em condições favoráveis e com o navio equipado com sistemas de navegação mais recentes um diâmetro de $3L_{OA}$ deverá ser suficiente. A bacia de manobra poderá também ter um formato elíptico, ao invés de circular, com os eixos principais com $3L_{OA}$ e $2L_{OA}$.

Se a manobra for realizada com a ajuda de rebocadores este diâmetro pode ser reduzido até cerca $2L_{OA}$. Se o navio estiver equipado com um segundo leme ou com um propulsor de proa o mesmo diâmetro de manobra poderá ser utilizado.

3.2 Terminal fluvial no Douro

O terminal fluvial ainda não existe, contudo, de acordo com (Peixeiro 2012) a sua localização será na margem direita do rio imediatamente a jusante da eclusa do Pocinho. Com base nesta localização será aqui elaborado um esboço de um possível arranjo geral para este terminal.

O arranjo geral não tem grande impacto neste estudo uma vez que para o modelo de simulação os parâmetros relevantes respeitantes ao terminal são o número de postos de amarração, o número de sistemas de manuseamento de carga e a capacidade de armazenamento e não a forma como estes parâmetros estão posicionados ou configurados entre si. Contudo considerou-se que apresentar uma possível localização e configuração para este terminal acrescentaria valor a este estudo, apresentando-a também como uma possível solução (Secção 3.2.5)

Todos os parâmetros acima referidos variam de acordo com cada cenário de simulação (ver Secção 6.4) e devido a este facto o arranjo geral do terminal será apresentado de uma forma genérica, isto é,

será apresentado com todos estes parâmetros mas de forma a que seja possível comportar as alterações dos mesmos.

3.2.1 Comprimento do cais

De acordo com a expressão 4.2 o comprimento do cais depende do número de postos de amarração e da média dos comprimentos dos navios que visitam o terminal. Considerando que todos os navios graneiros rio-mar, que constituem a frota que visitará este terminal, têm um comprimento fora a fora igual, a média dos comprimentos será igual ao próprio comprimento fora a fora que é de cerca de 84 metros. Os valores na Tabela 3.5 foram obtidos de acordo com a equação 3.2.

Tabela 3.5: Comprimento do cais do terminal fluvial

Nº de Postos	Comprimento do cais L_q [m]
1	124
2	233
3	342
n_{berth}	$108.9 \times n_{berth} + 15$

3.2.2 Sistema de carga

O sistema de carga considerado para este terminal é do tipo contínuo e deslocar-se-á paralelamente ao cais (ver Secção 3.1.1). A capacidade deste sistema e o número de guindastes são variáveis dos já referidos cenários de simulação.

3.2.3 Área de armazenamento

Para efeitos de modelo de simulação (Capítulo 5) a capacidade é tida apenas como um valor em toneladas, contudo na realidade e tal como já foi referido o armazenamento do minério é feito em pilhas de carga. Com base nas considerações feitas na secção 3.1.2 uma pilha de carga tem as seguintes características:

Tabela 3.6: Características do monte de carga genérico considerado

Largura [m]	20
Altura máxima [m]	8.39
Área da secção [m²]	83.90
Intervalo entre montes [m]	20

A capacidade de uma determinada área de armazenamento pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$Capacidade = \frac{A_{storage} \times A_{crosspile}}{(b_{pile} + b') \times Stowage} \quad 3.3$$

Onde a *Capacidade* é dada em toneladas, $A_{storage}$ é área de armazenamento considera, em m², $A_{crosspile}$ a área da secção transversal da pilha de carga, em m², b_{pile} a largura da pilha de carga, b' o intervalo entre pilhas de carga, ambos em metros e *Stowage* o factor de estiva que aqui se considera igual a 0.4 m³/ton.

Considerando a localização para o terminal fluvial que é proposta neste estudo e que está representada na secção seguinte, o terminal fluvial tem uma área disponível para armazenamento de

cerca de 115,000 m². Esta área, de acordo com a expressão 3.3, tem aproximadamente uma capacidade de armazenamento de 603,102 toneladas de minério de ferro.

O número de pilhas de carga pode ser determinado em função da capacidade de armazenamento. Neste capítulo são feitas muitas considerações mas mais uma vez relembra-se que para efeitos de simulação o valor de interesse é o da capacidade de armazenamento do terminal, o facto de esta capacidade ser dividida em um ou mais pilhas de carga servirá apenas para completar este estudo com uma sugestão para um possível arranjo geral do terminal.

3.2.4 Bacia de manobra

Uma vez que se trata de um terminal fluvial não se pode negligenciar a corrente existente no rio, por este motivo a bacia de manobra deverá ter um formato elíptico com os eixos principais iguais a $3L_{OA}$ e $2L_{OA}$ (ver Secção 3.1.4). Considerando o comprimento fora a fora dos navios graneleiros rio-mar, estas dimensões traduzem-se numa elipse com os eixos principais com 252 e 168 metros.

3.2.5 Proposta de um arranjo geral para o terminal fluvial

A localização para o terminal fluvial proposta neste estudo é a cerca de 3 milhas a jusante da eclusa do Pocinho, na margem direita do rio, e ocupa uma área total de 140,000 m². Na Figura 3.3 está representado o arranjo geral proposto para o terminal. Elementos como os postos de amarração, montes de carga e bacia de manobra estão representados com as dimensões estabelecidas nos capítulos anteriores.

A título de exemplo o arranjo geral está representado com quatro postos de amarração e uma área de armazenamento com três montes de carga. Contudo, tal como já foi referido, estes parâmetros serão variáveis e dependem de cada cenário de simulação.

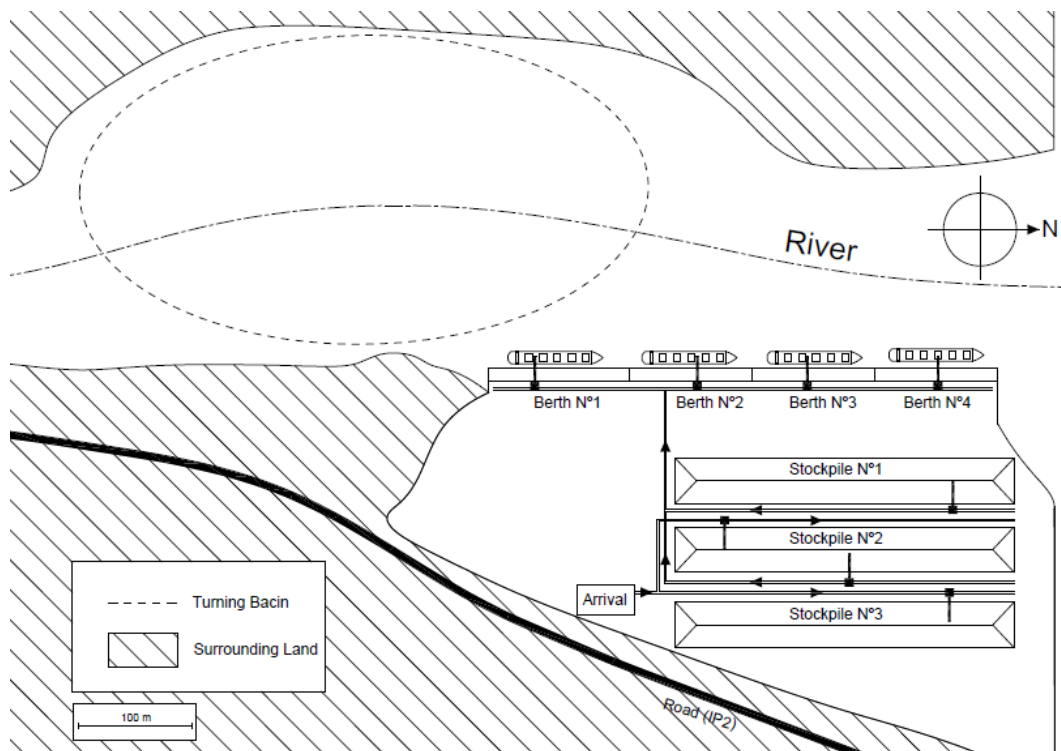


Figura 3.3: Proposta para um arranjo geral do terminal fluvial

3.3 Terminal marítimo em Aveiro

O terminal marítimo de granéis sólidos de Aveiro, contrariamente ao terminal fluvial, já existe. Actualmente esse terminal tem as seguintes características: 450 metros de cais e cerca de 151,000 m² de terraplenos dispendo de uma área adjacente disponível para investimento com cerca de 67,000 m².

Neste estudo o terminal de Aveiro actua como um terminal de importação e exportação.

3.3.1 Restrições do porto de Aveiro

De acordo com a APA (Administração do Porto de Aveiro) o calado máximo praticável é de 9 metros e a entrada no porto só pode ser feita por navios com um comprimento fora a fora menor ou igual a 150 metros (APA 2014). O serviço de pilotagem é obrigatório para todos os navios e o serviço de rebocadores é obrigatório para navios com mais de 95 metros de comprimento fora a fora.

Em termos de horário de navegação não existe nenhuma referência feita por (APA 2014), contudo de acordo com (Socarpor 2013), empresa que tem a concessão de parte do terminal, o horário de funcionamento do porto é das 8:00 às 00:00 e a navegação é apenas diurna. A questão do horário será abordada na Secção 6.2.

3.3.2 Alterações ao terminal actual

Apesar do terminal já existir é necessário considerar algumas alterações para que as operações de carga/descarga e armazenamento sejam exequíveis, ou seja, actualmente o terminal não tem equipamentos de carga, de descarga e armazenamento que consigam responder a este problema de transporte. Relativamente à área de armazenamento e comprimento do cais será considerado o espaço actualmente disponível e uma expansão do mesmo.

No caso deste terminal é necessário fazer algumas considerações para a determinação dos parâmetros acima referidos, isto porque contrariamente ao terminal fluvial, que será criado especificamente para implementar este sistema de transporte, o terminal de Aveiro é um terminal público, ou seja, não prestará serviços exclusivamente à rota de transporte de minério de ferro considerada neste estudo. Contudo será considerado que tanto a área de terraplenos já existente como a expansão da mesma poderão ser utilizadas na totalidade, não havendo qualquer limitação de espaço causada pelo armazenamento de outros granéis alheios a este estudo.

3.3.3 Comprimento do cais

Tal como já foi referido, actualmente o terminal dispõe de 450 metros de cais. Ao comparar este comprimento com os obtidos na Secção 3.2.1 verifica-se que seria suficiente para albergar 4 postos de amarração para o caso dos navios graneleiro rio-mar. No entanto é necessário considerar que não são apenas estes navios que utilizarão este terminal, isto porque no âmbito deste estudo também é considerada a exportação do minério de ferro do terminal de marítimo e esta exportação será feita por navios *Handysize*.

De acordo com (Kristensen & Lützen 2012) um navio *Handysize* tem um comprimento entre perpendiculares entre os 110 metros e os 150 metros, considerando estas dimensões e a limitação imposta pelo porto de Aveiro o maior navio que poderá operar no terminal de granéis não poderá exceder os 150 metros fora a fora. Este facto implica que terá que ser considerado pelo menos um posto de amarração que consiga comportar um navio destas dimensões que, de acordo com a expressão 3.2 terá que ter cerca de 180 metros de comprimento.

Tal como acontece com o terminal fluvial o número de postos de amarração no terminal de Aveiro também variará de acordo com cada cenário de simulação (ver Secção 6.4).

3.3.4 Sistemas de carga/descarga

O sistema de carga utilizado no terminal será do tipo contínuo e o sistema de descarga será com garras. Ambos os sistemas funcionarão em guindastes de translação deslocando-se paralelamente ao cais. Este tipo de sistema é o mais eficiente para realizar operações de carga e descarga, a mão-de-obra necessária para operar o sistema é reduzida devido à posição estática do navio durante todo o processo, i.e. o sistema permite que a lança seja posicionada sobre cada porão do navio e sem necessidade de reposicionar o navio.

O número e capacidades destes sistemas ou equipamentos serão uma variável de estudo.

3.3.5 Área de armazenamento

A área de armazenamento será projectada com o mesmo objectivo e da mesma forma que no terminal fluvial (ver Secção 3.2.3). As considerações feitas para o cálculo da capacidade do espaço de armazenamento também são as mesmas. De acordo com a expressão 3.3 os 150,000 m² de área de armazenamento actualmente disponíveis têm capacidade para aproximadamente 786,000 toneladas de minério de ferro e 1,138,000 toneladas se forem considerados os 67,000 m² de área disponível para investimento.

Na Figura 3.4 está representado um possível arranjo para o terminal marítimo de Aveiro.

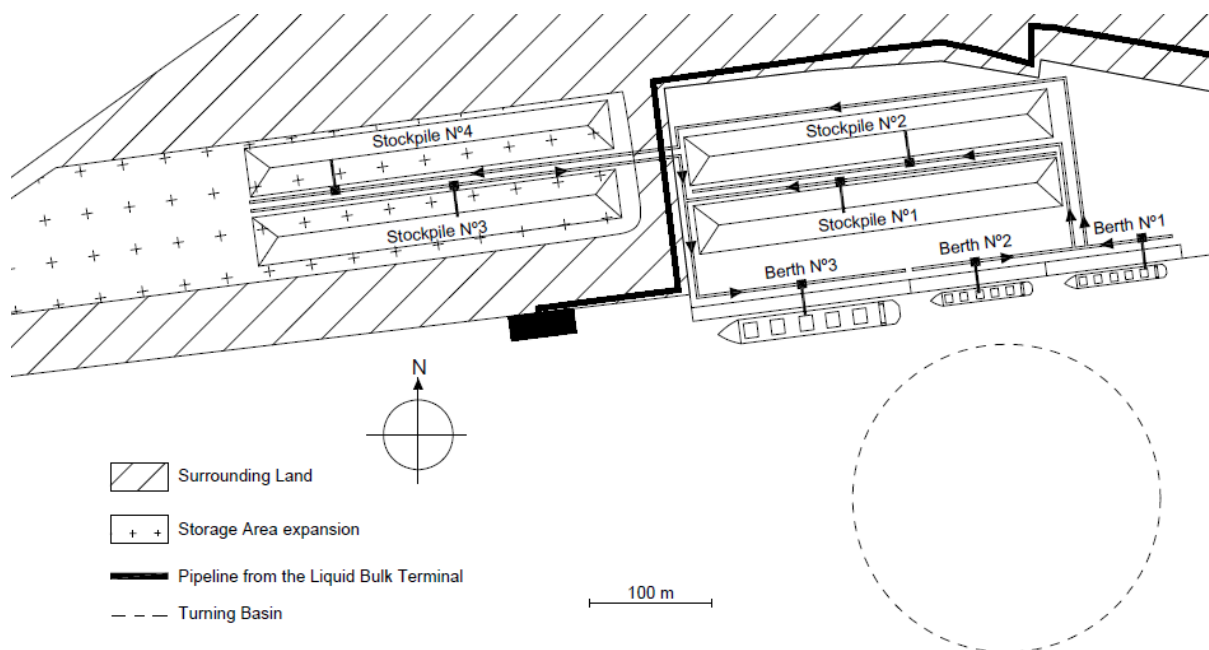


Figura 3.4: Sugestão para um possível arranjo da área de armazenamento no terminal de Aveiro

Nesta representação estão incluídos dois postos de amarração para navios graneleiro rio-mar e um posto exclusivo para os navios *Hanysize*.

3.3.6 Bacia de manobra

A bacia de manobra necessária para o navio *Handysize*, de acordo com a Secção 3.1.4, será um círculo com cerca de $2L_{OA}$ uma vez que a utilização de rebocadores é obrigatória para navios com

mais de 95 metros de comprimento. Esta bacia também será suficiente para os navios graneleiros rio-mar.

4. Projecto do navio e frota

Neste capítulo são analisadas e determinadas as características principais dos navios rio-mar incluídos neste problema de transporte. É explicado o conceito de navio rio-mar, o modelo de síntese do navio, modelo de viagem, optimização e resultados.

4.1 Navios rio-mar

A especificação da missão de um navio é o ponto de partida para o seu projecto. Neste caso, com um troço de viagem em rio, que representa cerca de 75% da viagem total e onde existem quatro eclusas, e um outro de viagem costeira o navio não é bem o típico navio de navegação fluvial (*inland*) nem o convencional navio de navegação marítima/costeira. Trata-se portanto de um navio “híbrido”, rio-mar, projectado para operar nestes dois meios.

Algumas das características específicas deste tipo de navios tais como, o calado, o comprimento e a altura acima da linha de água (*Air draft*) estão relacionadas com as limitações impostas pelas vias ou canais fluviais onde estes navios operam. Estas e outras limitações influenciam as características do navio em vários aspectos, tais como:

- **Dimensões:** pelo facto de a navegação ser feita em águas pouco profundas este tipo de navios tem calados muito baixos e são caracterizados por terem rácios B/T muito elevados e rácios T/L muito baixos. O comprimento e a boca podem ser limitados pelas dimensões máximas de eclusas. Os coeficientes de finura total costumam ser elevados quando comparados com os de navios marítimos;
- **Apêndices:** frequentemente os navios rio-mar estão equipados com tubeiras e *skeg*;
- **Águas restritas:** águas pouco profundas e canais estreitos influenciam o escoamento em torno do casco aumentando a resistência do navio e reduzindo a eficiência propulsiva. Outro tipo de influência associada a águas restritas é o efeito de submersão (*squat*) descrito em detalhe na secção 4.2.4;
- **Corrente:** em rios e canais a corrente (curso da água), por mais pequena que seja, está sempre presente. Navegar na presença de corrente(s) altera a resistência e a manobrabilidade do navio.

Nas vias navegáveis europeias existem vários tipos de configurações que são adoptadas para este tipo de transporte: navios autopropulsionados, barcaças acopladas em comboio a outro navio (*coupled barges*) e barcaças empurradas por um rebocador próprio (*pushed barges*). Na europa, este último conceito de *pushed barges* substituiu quase por completo os comboios de barcaças porque têm melhor manobrabilidade. No caso deste estudo devido à morfologia da via navegável do Douro, e ao facto de existirem eclusas e um troço de navegação marítimo/costeira introduzem-se vários constrangimentos que tornam a escolha de um navio autopropulsionado a solução mais óbvia.

4.2 Modelo de síntese do navio

O conceito de Modelo de síntese do navio (*Ship Synthesis Model – SSM*) data dos anos 70 (Reed 1976) com o desenvolvimento do *software* ASSET- *Advanced Surface Ship Evaluation Tool*, em português, Ferramenta Avançada de Avaliação de Navios de Superfície. Este *software* consegue determinar a viabilidade de um determinado projecto, alterando as características do navio até chegar a um ponto de equilíbrio.

O SSM é uma sequência de métodos numéricos que integra os diferentes aspectos inerentes ao projecto de um navio (Figura 4.1). Mesmo com a constante evolução da capacidade de cálculo dos computadores e dos *softwares* técnicos, o desenvolvimento e análise de um grande número de alternativas de um projecto não é compatível com a utilização extensiva dos métodos básicos. Portanto, numa fase inicial do projecto do navio os métodos utilizados são essencialmente baseados em fórmulas empíricas que advêm de análises de regressão a bases de dados de navios semelhantes ou fórmulas semi-empíricas obtidas através de análises estatísticas. No entanto, a tendência é desenvolver o SSM para que os vários módulos possam ser actualizados com cálculos ou valores mais precisos á medida que se vai evoluindo na espiral de projecto.

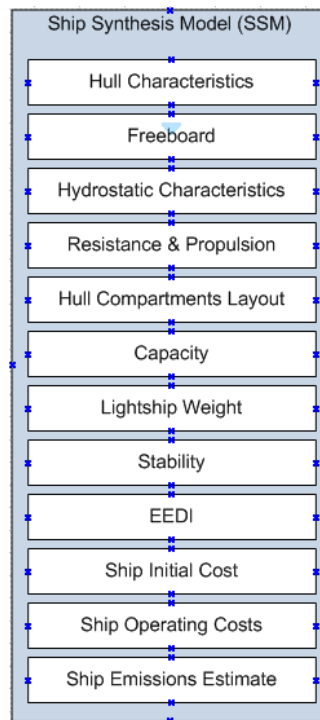


Figura 4.1: Componentes do Modelo de síntese do navio (SSM)

O modelo de síntese utilizado nesta dissertação foi realizado na ferramenta de *software* desenvolvida em (Ventura 2013) que foi alargada para conseguir lidar com o caso específico de navios rio-mar. Nas secções seguintes serão apenas abordados e descritos os módulos do SSM alterados para este caso específico.

4.2.1 Forma do casco e compartimentação

Uma vez que 75% da rota considerada neste estudo é feita em rio, em águas calmas e protegidas, a forma do casco adoptada tem coeficiente de finura total (C_b) elevado. Esta característica é típica em navios *inland* para que consigam atingir maiores deslocamentos com calados muito reduzidos, a forma do casco deve ser simplificada utilizando superfícies planificáveis por forma a reduzir os custos de construção.

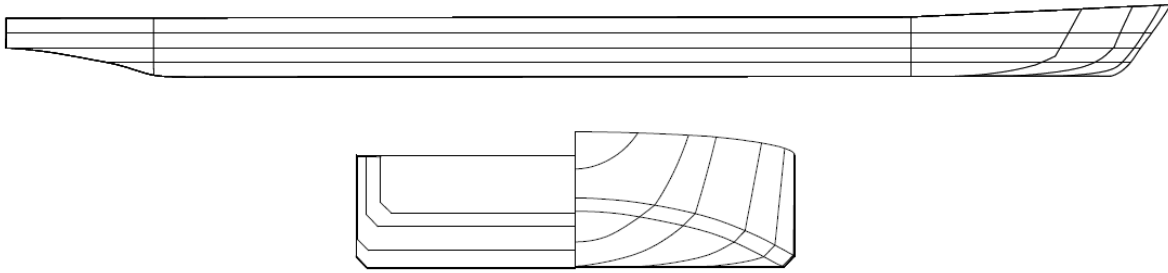


Figura 4.2: Plano geométrico de um possível casco

Tipicamente o arranjo do espaço de carga de um navio graneleiro é caracterizado por um casco simples (*single hull*) com tanques *hopper* e *wing*. No caso de um navio graneleiro para navegação em águas fluviais a configuração adoptada é um pouco diferente, com casco duplo (*double-skin*) e com porões de carga paralelepípedicos. Este tipo de configuração permite que este tipo de navios possa ter um tipo de utilização mais polivalente tornando possível não só o transporte de graneis mas também o transporte de contentores e outros tipos de carga unitizada.

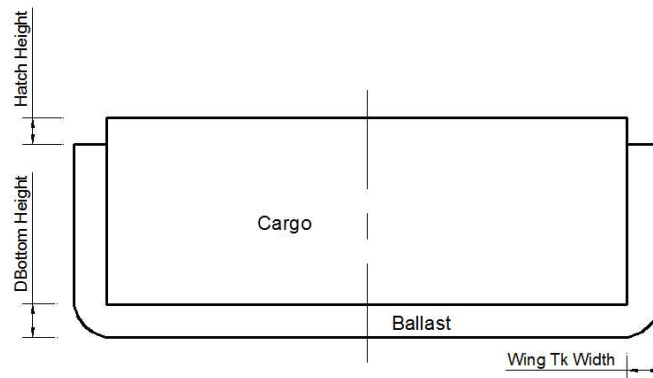


Figura 4.3: Esboço da configuração da secção mestra

O cálculo da capacidade de carga pode ser feito baseado na configuração da secção mestra (Figura 4.3) e no comprimento da zona de carga. Este último depende dos comprimentos do pique tanque de vante, da casa da máquina e do pique tanque de ré. No Capítulo II-1 da SOLAS (*Safety of Life at Sea*) é especificado que a localização da antepara de colisão, para um navio sem bolbo, deve ser a uma distância da perpendicular de vante nunca inferior a $0.05L$ ou 10 metros, aquela que for menor, e nunca mais de $0.08L$ (IMO 2012a). Contudo, o cumprimento da SOLAS não é obrigatório para navios projectados para operar em pequenas viagens domésticas. Tal como já foi referido, o percurso a efectuar por este navio é constituído na sua maior parte por navegação fluvial e por uma pequena parte de navegação costeira, por este motivo adoptou-se um posicionamento da antepara de colisão menos conservador e é utilizado o valor de $0.04L$, da perpendicular de vante, recomendado pela Directiva Europeia 2006/87 (EC 2006).

O comprimento da casa da máquina é obtido em função do sistema de propulsão e da potência instalados. A localização da antepara a ré da casa da máquina é considerada igual a $0.04L$ tal como no caso da antepara de colisão. Finalmente, o comprimento do espaço de carga é obtido subtraindo todos estes comprimentos ao comprimento total do navio.

4.2.2 Bordo livre

Um navio graneleiro, de transporte de minério, é um navio de deslocamento o que significa que devido à elevada densidade dos materiais que transporta o volume de carga disponível não é um

factor limitativo. Por este motivo, o pontal do navio pode ser reduzido desde que o bordo livre resultante cumpra com requisitos de segurança.

A Convenção Internacional das Linhas de Carga, aplica-se apenas a navios com mais de 24 metros e que realizem viagens internacionais (IMO 2005). Contudo, no caso do rio Douro e de acordo com as autoridades responsáveis esta convenção também é adoptada.

4.2.3 Distribuição do peso leve

O peso leve é calculado através de fórmulas empíricas considerando três componentes principais: Estruturas, maquinaria e equipamentos (*outfitting*). As estruturas dividem-se ainda em outros dois componentes, o casco e a superestrutura.

A densidade do minério de ferro é aproximadamente igual a 2.2 ton/m^3 o que implica um peso adicional no casco devido aos reforços necessários no duplo fundo para que a estrutura consiga suportar este tipo de carga. De acordo com as *Common Structural Rules* (CSR) os navios graneleiros podem ser classificados em três classes, dependendo da densidade da carga que transportam (IACS 2012). Para carga com densidade superior a 1 ton/m^3 as classes existentes são: carga carregada em porões alternados (Classe BC-B) ou carga em todos os porões (Classe BC-A). Contudo as regras CSR não se aplicam a navios com comprimento inferior a 80 metros, então neste caso assume-se que todos os porões de carga são carregados com minério.

Os resultados obtidos para o peso leve serão verificados e validados na Secção 4.2.8.

4.2.4 Previsão de potência

O cálculo da resistência ao avanço do navio e conseqüentemente da potência propulsiva necessária para navegar a uma velocidade predefinida é parte integrante do projecto preliminar. Neste estudo o cálculo da potência tem como base o método (Holtrop & Mennen 1982), amplamente utilizado. Apesar de este método ter como base navios de grandes dimensões é comum utiliza-lo para a previsão de potência de navios mais pequenos.

A resistência e a manobrabilidade de um navio dependem da profundidade da zona de navegação. Em (PIANC 1992) é feita uma classificação da profundidade da águas com base no rácio profundidade/calado do navio (h/T), tal como na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Classificação da profundidade da água

Águas profundas	$h/T > 3.0$
Águas de profundidade média	$1.5 h/T < 3.0$
Águas pouco profundas	$1.2 < h/T < 1.5$
Águas muito pouco profundas	$h/T < 1.2$

Os efeitos da profundidade podem ser notados em águas de profundidade média e tornam-se bastante evidentes em águas pouco profundas. No caso da via navegável em estudo (rio Douro) os valores de (h/T) estão entre os 1.60 e os 1.13, com uma profundidade máxima de 4.20 metros. Nestas condições existem três efeitos que têm que ser tidos em conta: a resistência adicionada causada pela pouca profundidade, a resistência adicionada causada pela navegação num canal restrito e o *squat* do navio.

O navio ao deslocar-se imerge devido ao aumento da velocidade do escoamento abaixo do casco o que faz com que exista uma perda de pressão e o navio afunde um pouco. Este fenómeno produz uma força vertical descendente (que provoca uma imersão vertical, *sinkage*) e um momento em torno

do eixo transversal (que provoca uma caimento, *trim*), à resultante destes dois parâmetros chama-se *squat*. O *squat* acontece quer em águas profundas quer em águas pouco profundas, sendo que em águas pouco profundas e restritas (rios e canais, por exemplo) este efeito é acentuado (Briggs & Vantorre 2009).

A análise e determinação do *squat* têm sido alvo de vários estudos devido à sua importância no encalhamento de navios. Existem portanto vários métodos para analisar este fenómeno sendo que os mais conhecidos e utilizados são: *Barras* e *Eryuzlu* (Briggs & Vantorre 2009).

Fórmula de Barras:

$$S_{MAX} = \frac{5.74S^{0.76} C_B V_k^2}{100} \quad 4.1$$

Onde S_{MAX} é o *squat* máximo em metros, S o coeficiente de bloqueio, C_B o coeficiente de finura total do navio e V_k a velocidade do navio em nós.

Fórmula de Eryuzlu:

$$S_b = a \frac{h}{T} (F_{nh})^b \left(\frac{h}{T}\right)^c K_b \quad 4.2$$

Onde S_b é o *squat* à popa em metros, as constantes são $a = 0.298$, $b = 2.289$ e $c = -2.972$. O coeficiente K_b depende do rácio entre a largura do canal (W) e a boca do navio e é obtido através da expressão:

$$K_b = \frac{3.1}{\sqrt{\frac{W}{B}}}, \text{ se } W < 9.61B \quad 4.3$$

Caso contrário $K_b = 1$.

Estes dois métodos estão comparados na Figura 4.4 para um canal com uma largura de 40 metros e uma profundidade de 4.20 metros e um navio com 11 metros de Boca, 3.7 metros de calado e com um C_b de 0.85.

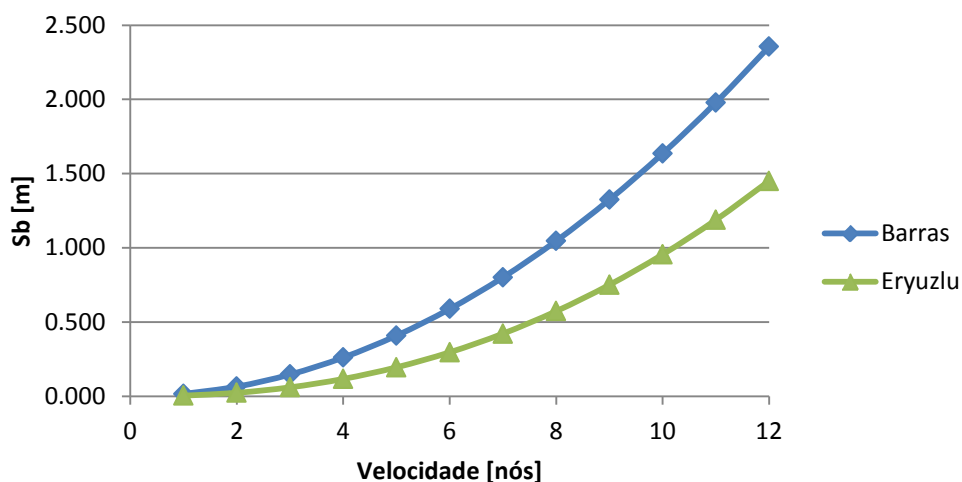


Figura 4.4: Comparação dos métodos de previsão do *squat*

Neste modelo o *squat* do navio é determinado através da fórmula de *Eryuzlu* que já foi adoptada pela Guarda Costeira do Canadá (CWNMG 1999) e aplicada no canal de St. Lawrence.

A resistência de um navio é bastante sensível aos efeitos causados por águas pouco profundas existindo um aumento considerável na resistência de onda e de fricção. De acordo com (Molland

2008) a influência na resistência de onda torna-se relevante para valores de *Froude* de profundidade maiores que $F_{nh}=0.7$, sendo $F_{nh}=1$ o valor crítico. O número de *Froude* de profundidade é dado por:

$$F_{nh} = \frac{V_s}{\sqrt{gh}} \quad 4.4$$

onde V_s é a velocidade do navio em metros por segundo, g a aceleração da gravidade em m/seg^2 e h a profundidade em metros.

As características do canal podem também influenciar a resistência ao avanço do navio. Esta influência torna-se relevante quando a razão entre a área da secção do canal e a área da secção mestra submersa do navio (A_c/A_s) é menor que 15 (Molland 2008). O inverso desta razão é conhecido como coeficiente de bloqueio (S).

$$S = \frac{A_s}{A_c} \quad 4.5$$

Existem vários métodos para calcular a resistência do navio em águas pouco profundas, e na sua maioria são uma combinação entre métodos de previsão de resistência em águas profundas com um certo factor de correcção. O resultado pode ser expresso em resistência adicional ou em perda de velocidade.

Schlichting em (Lewis 1988) desenvolveu um diagrama de onde é possível obter a correcção da velocidade em águas pouco profundas, este método é apenas válido para velocidades abaixo da velocidade crítica, ou seja, para valores de F_{nh} menores que um. O método de *Lackenby* (Lackenby 1974) é uma extensão do método desenvolvido por *Schlichting*. *Lackenby* derivou uma expressão (4.6) que pode ser utilizada para determinar a perda de velocidade em águas pouco profundas comparada com a velocidade em águas profundas.

$$V_s(h) = V_s(\infty) - (0.1242 \left(\frac{A_s}{h^2} - 0.05 \right) + 1 - \left(\tanh \left(\frac{gh}{V_s^2(\infty)} \right) \right)^{\frac{1}{2}}) V_s(\infty) \quad 4.6$$

Esta equação pode ser resolvida por forma a obter o valor $V_s(\infty)$ e em seguida utilizar esse valor no método *Holtrop & Mennen*, por exemplo, para obter o valor da resistência do navio. Basicamente o navio em águas pouco profundas atinge um valor de resistência a uma velocidade mais baixa do que em águas profundas, daí ser calculada a redução de velocidade.

Estes dois métodos apesar de não serem muito recentes são bastante utilizados e obtêm boas aproximações. Por exemplo, em (Senthil Prakash & Chandra 2013) são comparados resultados obtidos através do método de *Schlichting* com resultados obtidos através de CFD e é concluído que estes apresentam uma boa aproximação.

O método de *Jiang* (Jiang 2001) permite também obter a correcção da resistência em águas pouco profundas tendo em consideração o fenómeno de *sinkage*.

$$V_s(\infty) = V_s(h) \sqrt{\left(1 + \frac{2gZ_s}{V_s^2(h)}\right) / \left(1 - \frac{Z_s}{h}\right)} \quad 4.7$$

Onde Z_s é o *sinkage* do navio em metros.

Em (Rotteveel & Quadvlieg 2013) é utilizado outro método de correcção de resistência. Este método calcula o factor de correcção através da seguinte expressão:

$$\frac{R_T(h)}{R_T(\infty)} = 0.125 + 0.875(K_{WD0} + 0.4 \frac{B}{T} K_{WD1}) \quad 4.8$$

Onde K_{WD0} e K_{WD1} são parâmetros que dependem da profundidade h e do calado do navio T .

De acordo com (Rotteveel & Quadvlieg 2013) não se conhece ao certo a origem deste factor de correcção mas o comportamento desta correcção está muito próximo do método de *Lackenby*. Este método é utilizado no software de simulação SURSIM.

Na Figura 4.5 estão comparados os vários métodos até agora descritos, todos eles foram utilizados em conjunto com o método *Holtrop&Mennen*. O método SURSIM utiliza um factor de correcção que apenas depende da profundidade da água e do calado do navio o que acontece também no método de *Lackenby* que é concebido para águas pouco profundas mas sem qualquer tipo de restrições. O método de *Jiang* para além da profundidade da água considera também o fenómeno de *sinkage*, contudo este método foi desenvolvido para águas relativamente pouco profundas, mais precisamente para $h/T > 1.5$.

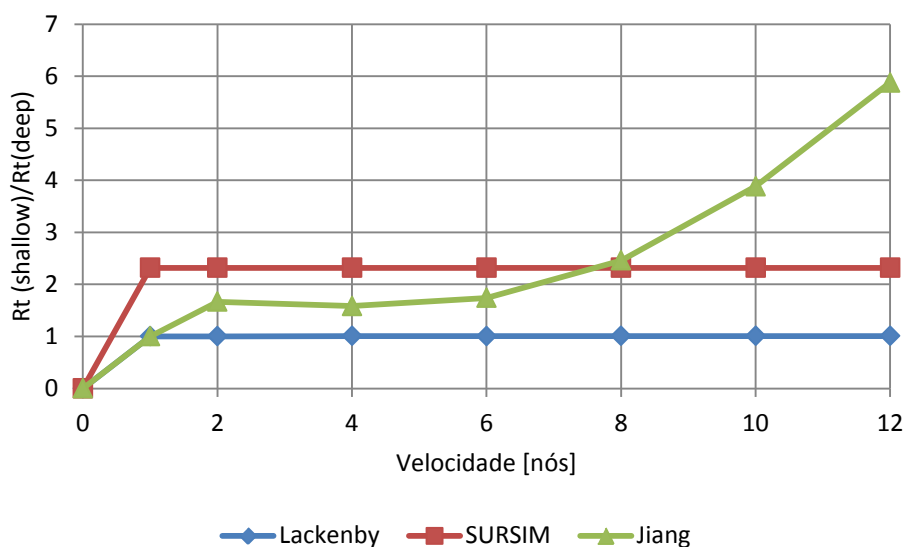


Figura 4.5: Comparação dos métodos de previsão de resistência em águas pouco profundas

Neste estudo o método de *Lackenby* é adoptado para determinar a correcção da resistência para águas pouco. Este método é amplamente utilizado e recomendado pela ITTC (1995) e está a ser considerado na revisão da norma ISO 15016 *Standard Methodology for EEDI verification procedure*. Esta correcção é aplicada ao valor da resistência, em águas profundas, obtido pelo método *Holtrop&Mennen*.

4.2.5 Sistema propulsivo

Os sistemas de propulsão mais utilizados neste tipo de navios são os motores Diesel a quatro tempos, semi-rápidos, Diesel-eléctricos ou, mais recentemente, motores *dual-fuel* com capacidade para operarem com dois combustíveis diferentes, nomeadamente *Marine Diesel Oil* (MDO) ou gás natural liquefeito (LNG- *Liquefied Natural Gas*).

Operações com LNG têm um bom registo de segurança com navios tanque, que operam à mais de 50 anos, e com LNG como combustível desde 2001 (DNV 2011) . No caso de uma fuga, por exemplo, o gás evapora-se devido à diferença de temperatura entre o meio-ambiente, ou à própria temperatura da casa da máquina, e a temperatura a que é armazenado o LNG. A mistura resultante, à pressão

atmosférica, não é combustível e não representa perigo nem para o navio, nem para o meio ambiente. Um sistema a LNG produz também menos emissões que o comum sistema a Diesel. As emissões de óxidos de enxofre (SO_x) e de partículas (PM) são praticamente eliminadas, as de óxidos de azoto (NO_x) são reduzidas em cerca 90% e as de dióxido de carbono (CO₂) em cerca 20 a 25%.

Por outro lado, o LNG não pode ser armazenado em tanques estruturais tal como o MDO. Geralmente o armazenamento é feito em tanques cilíndricos, que podem ser integrados em contentores ISO de 20 pés para facilitar a troca e o reabastecimento. Este tipo de sistema não só consome mais espaço como também necessita de estar relativamente perto da casa da máquina e do convés principal para que possa ser facilmente substituído.

A questão das emissões do navio em áreas ambientalmente sensíveis e os actuais preços dos combustíveis suscitam o estudo e análise de duas alternativas de sistemas propulsivos: o sistema comum a Diesel com um motor a quatro tempos e um sistema *dual-fuel* com capacidade para operar a LNG.

Apesar das velocidades de operação do navio em carga e em lastro serem muito baixas, assume-se que o sistema propulsivo instalado tem que ter potência suficiente para garantir uma velocidade mínima de 13 km/h (7 nós). Esta velocidade é um requisito da Directiva 2006/87 (EC 2006) que se aplica a todas as vias internas navegáveis da Europa.

4.2.6 Índice de eficiência energética (EEDI) para navios

O EEDI (*Energy Efficiency Design Index*) é, como o próprio nome indica, um índice que quantifica a eficiência energética de um navio. Esta medida foi desenvolvida com pela MEPC- *Marine Environment Protection Committee* (IMO, 2012b), com o objectivo de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa.

O EEDI é determinado com base numa expressão para o cálculo das emissões de dióxido de carbono (CO₂) e é expresso em gramas de CO₂ por milha-capacidade do navio, ou seja, quanto menor for o índice EEDI mais eficiente é o navio. Uma versão completa dessa expressão está representada em (IMO, 2012b; IMO, 2012c) e inclui vários factores ajustáveis para poder ser adaptada e implementada em navios de diferentes classes, contudo, uma versão simplificada desta expressão pode ser dada por:

$$EEDI = \frac{P \times SFC \times C_f}{DWT \times V_{ref}} \quad 4.9$$

Onde P é 75% da potência instalada ao veio, SFC o consumo específico da máquina principal, C_f a taxa de emissão do tipo de combustível, DWT o *deadweight* do navio e V_{ref} a velocidade de projecto do navio. O EEDI calculado (*Attained EEDI*) tem que ser menor do que o valor de referência (*Required EEDI*). Este último é obtido com base em regressões de valores de EEDI obtidos para navios já existentes que foram construídos entre 1999 e 2009.

A determinação deste índice é obrigatória para todos os navios que sejam construídos após dia 1 de Janeiro de 2013 mas não é obrigatória para navios que circulem em vias de navegação interna. Contudo, considerando o número elevado de embarcações que irá circular por esta rota e o facto de que esta rota conter zonas de vinha e zonas ambientalmente sensíveis torna-se de extrema importância contabilizar o índice EEDI de forma a controlar e minimizar a quantidade total de emissões de CO₂. O índice é estimado de acordo com os requisitos da IMO (IMO 2012b; IMO 2012c).

4.2.7 Estrutura dos custos e custo de construção

A avaliação das várias alternativas no projecto do navio não pode ser baseada exclusivamente em aspectos técnicos, os aspectos económicos são essenciais a qualquer projecto de engenharia. O custo de construção do navio será obviamente um dos critérios a ser avaliado, contudo, existem alguns aspectos do projecto que só se conseguem avaliar numa duração a longo prazo. Devido a este facto desenvolveu-se um modelo de viagem para que os custos operacionais possam ser determinados.

Para os custos associados ao navio adoptou-se a seguinte estrutura dividida em cinco categorias (Stopford 2009):

- **Custos de operação:** onde são incluídas todas as despesas que envolvam a operação do navio. Essencialmente estas despesas estão relacionadas com o custo da tripulação, mantimentos e manutenção;
- **Custos de manutenção periódica:** estes custos ocorrem quando o navio está em doca para reparação e inspecção;
- **Custos de viagem:** custos associados com a rota específica na qual o navio opera e que incluem combustível, tarifas portuárias, tarifas de circulação em canais, etc.;
- **Custo capital:** depende de como o navio foi financiado, seja empréstimo bancário ou outro tipo de investidores;
- **Custos de movimentação de carga:** nesta categoria estão incluídos todos os custos relacionados com carga, estiva e descarga de mercadoria;
- **Custos de capital:** dependem do financiamento feito para o navio. Podem tomar a forma de dividendos patrimoniais ou de pagamentos de juros e de capital no financiamento da dívida.

O custo inicial do navio é determinado através de fórmulas empíricas que consideram três componentes principais, estruturas, maquinaria e outros equipamentos. Os resultados obtidos foram comparados com preços de navios existentes e com base nesta comparação foram introduzidos no modelo alguns factores de correcção. Para tornar este estudo mais realista considerou-se que o capital para o investimento advém de um empréstimo ao banco que financia 70% do investimento necessário para o navio.

O custo de combustível depende do consumo específico da máquina principal, da distância percorrida e velocidade, que se traduzem no tempo de viagem e finalmente do preço do combustível. Os preços do combustível foram baseados na média dos valores praticados em 2013 (Fearnleys 2013).

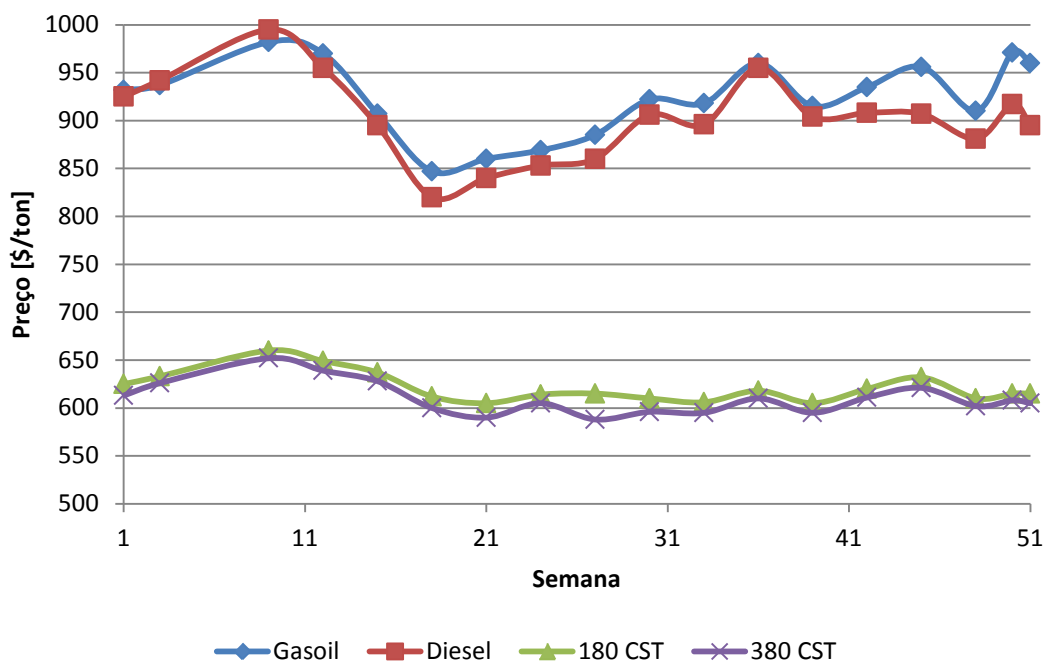


Figura 4.6: Preços dos combustíveis em 2013 (Fearnleys, 2013)

O preço do LNG é geralmente especificado com referência ao seu valor calorífico (\$/ Milhões BTU). BTU é um acrônimo para *British Thermal Unit*, em português Unidade Térmica Britânica. Para simplificar a comparação com o combustível MDO, neste estudo, assume-se como aproximação que o custo do LNG é 35% mais baixo do que o HFO 380 CST (Invensys 2013).

4.2.8 Validação

Devido à natureza genérica e empírica dos diversos métodos implementados no modelo de síntese SSM, o modelo tem que ser validado e eventualmente calibrado/corrigido antes de iniciar o processo de otimização. A validação é feita comparando os valores obtidos através do modelo com valores existentes de navios similares. Desta forma é possível aferir o grau de proximidade com a realidade com que se está a trabalhar.

A validação vai incidir essencialmente sobre o peso leve do navio e sobre o volume de carga, grandezas que condicionam a quantidade de carga transportada.

Não existe muita informação disponível relativamente ao peso leve de navios. Neste estudo, conseguiu-se compilar alguma informação relevante para o peso leve (Egorov 2014), (Egorov 2007). Contudo, toda a informação compilada é referente a navios *Ice Class* cujos cascos são devidamente reforçados para lidarem com gelo. Estes reforços do casco têm obviamente impacto no próprio peso leve do navio.

De forma a fazer uma comparação razoável entre os valores obtidos pelo modelo e a informação compilada, o peso extra que advém dos reforços inerentes à *Ice class* tem que ser subtraído. Para o caso destes navios, classificados com *Ice class* LU1 e LU2 da *Russian Maritime Register of Shipping*, considerou-se que os reforços representam um aumento de cerca de 1% no peso leve do navio (Dvorak 2009).

Na Tabela 4.2 encontram-se os resultados obtidos para o peso leve, calculado pelo modelo, para os navios da base de dados e a comparação com os valores reais. Na tabela também se encontram os

valores obtidos através da fórmula (linha de tendência) de *Hoffman/Heuser* utilizada num trabalho recente focado em navios *inland* (Hekkenberg 2013).

Tabela 4.2: Comparação e correcção dos valores do peso leve

LOA [m]	B [m]	D [m]	Peso leve [ton]					
			Real	Modelo	Erro %	Modelo Corrigido	Erro %	Hoffman/Heuser
108.4	15.00	5.00	1200.00	1123.00	6.4%	1284.24	-7.0%	1294.52
138.3	16.70	5.50	2090.00	1388.00	33.6%	2068.59	1.0%	1767.06
140.00	16.70	6.00	2610.00	1434.00	45.1%	2359.70	9.6%	1869.61
114.02	13.20	5.50	1270.00	1125.00	11.4%	1293.99	-1.9%	1312.68
129.05	15.80	6.00	2120.00	1325.00	37.5%	1909.73	9.9%	1727.07
93.00	13.00	5.50	1044.00	958.00	8.2%	1048.10	-0.4%	1102.10
106.03	14.80	5.00	1198.00	1036.00	13.5%	1172.45	2.1%	1259.13
110.69	13.00	5.50	1140.00	1043.00	8.5%	1183.23	-3.8%	1267.69
80.51	11.60	4.00	992.00	858.00	13.5%	931.95	6.0%	667.05
92.99	13.00	5.50	1380.00	958.00	30.6%	1048.08	24.0%	1102.01
			Média		20.8%		3.9%	

Os primeiros resultados obtidos pelo modelo, como se pode observar na coluna Modelo, contêm erros muito grandes, sendo o valor médio do erro de 20.8% o que se considerou ser demasiado. Como as diferenças obtidas entre o modelo e os dados reais não são constantes decidiu-se determinar uma linha de tendência (neste caso, polinomial de grau 2) com o valor de LBD como variável e que se ajuste ao desvio entre o modelo e os dados reais (Figura 4.7).

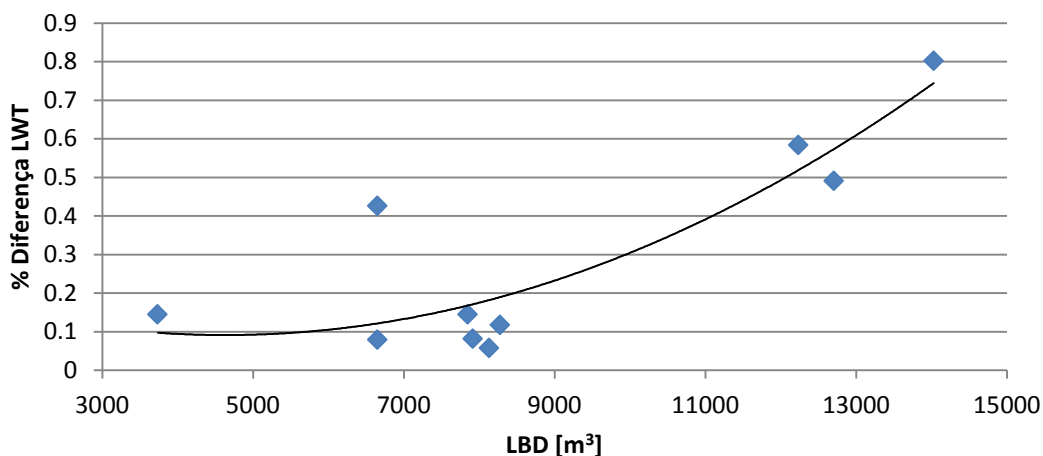


Figura 4.7: Interpolação do factor correctivo do peso leve

A expressão que representa a linha de tendência apresentada no gráfico e que interpola o desvio entre os valores reais e os do modelo é:

$$LWT_{Correction}[\%] = 7 \times 10^{-9} \times (LBD)^2 - 7 \times 10^{-5} \times (LBD) + 0.25 \quad 4.10$$

em que $LWT_{Correction}$ é o factor correctivo, em percentagem, a ser aplicado directamente no modelo e LBD a multiplicação do comprimento fora a fora com a boca e o pontal, em m^3 .

A introdução desta correcção traz uma melhoria significativa nos resultados, o erro médio passa para 3.97%. Os resultados obtidos estão também na mesma gama de resultados obtidos através do método de *Hoffman/Heusser*. Na Figura 4.8 estão representados os resultados da Tabela 4.2 em conjunto com os valores obtidos através do método de *Michalski* (Michalski 2005). Este último método subdimensiona ligeiramente os valores de peso leve.

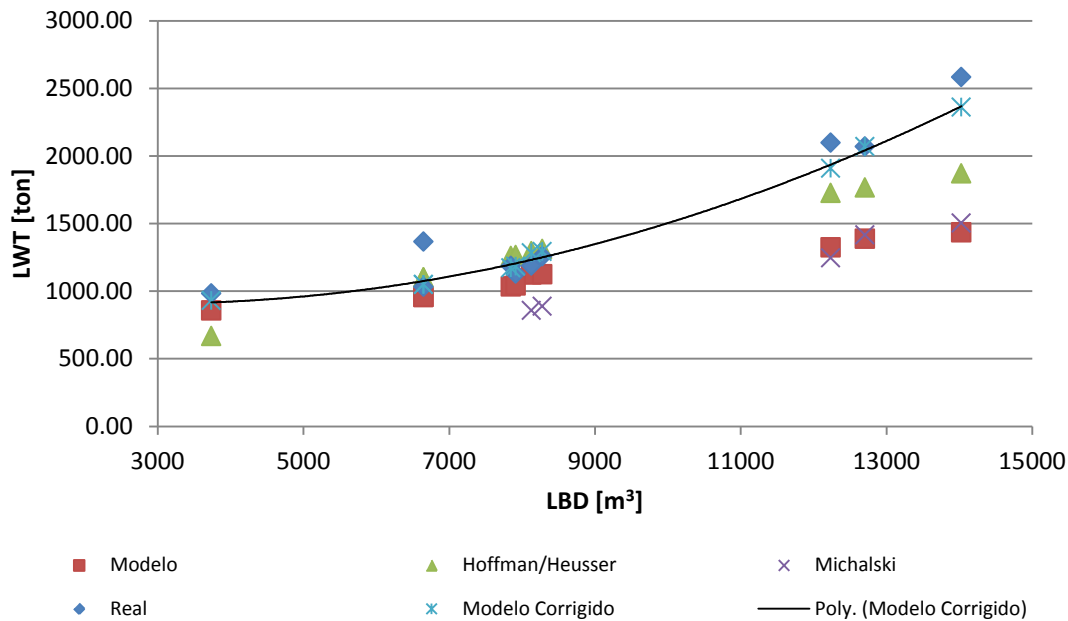


Figura 4.8: Comparação dos resultados do peso leve

No modelo SSM o volume de carga é calculado com base na configuração da secção mestra e no comprimento do espaço de carga, que depende do comprimento do pique tanque de vante, da casa da máquina e do pique tanque de ré (ver Capítulo 4.2.1).

Para validar o cálculo do volume de carga foi calculado o volume real de um modelo desenvolvido em 3D de acordo com as formas do casco apresentadas na Figura 4.2. Esta comparação revelou que o modelo sobre dimensionava cerca de 6% o valor da capacidade de carga, o que se considerou aceitável.

O porte bruto do navio (*deadweight – DWT*) é dado pela diferença entre o deslocamento do navio e o peso leve. O peso leve já foi analisado, melhorado e validado. Esta análise ao peso bruto funcionará então como uma outra forma de verificar o desempenho do modelo na determinação da distribuição dos pesos do navio.

Como se pode observar na Figura 4.9 os resultados obtidos pelo modelo estão na mesma gama de valores dos dados de navios existentes. Contudo para valores mais elevados de LBD existe um pequeno desvio do modelo.

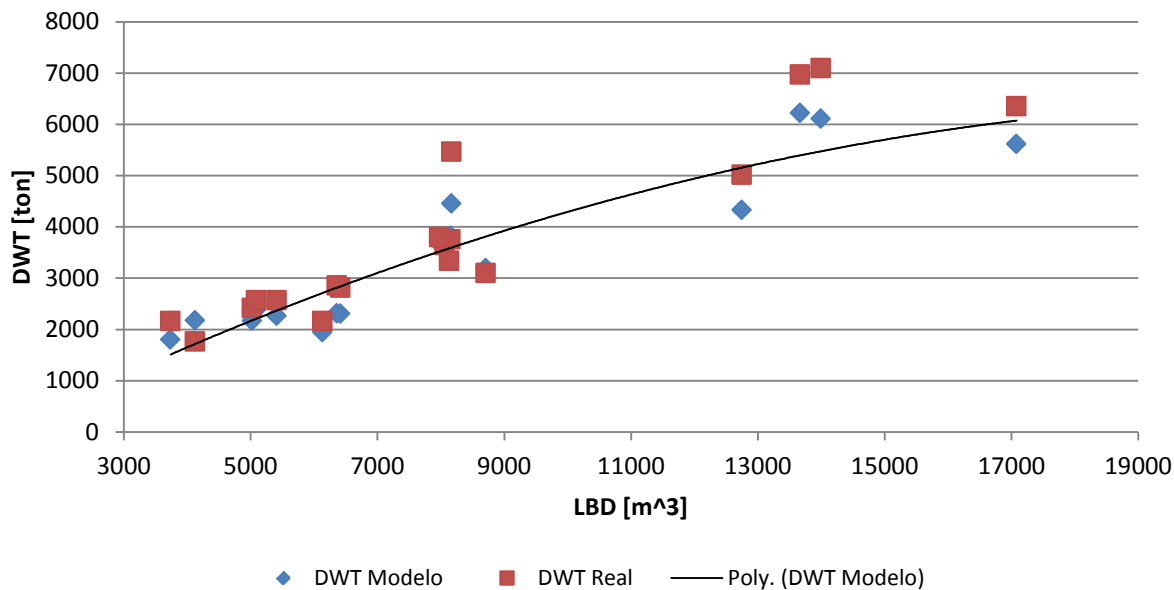


Figura 4.9: Comparação dos valores de peso bruto

4.3 Modelo da viagem

O SSM define as características principais de um navio, contudo, o objectivo desta dissertação é obter as características principais óptimas para o problema de transporte em estudo. Este tipo de análise está intimamente ligada ao frete, ou transporte de carga, realizado pelo navio.

Este transporte pode incluir diferentes meios de transporte e nesse caso é designado de multimodal. Podem ser necessários vários sistemas de transferência (de transbordo) e vários sistemas de armazenamento provisórios quando se utiliza mais do que um meio de transporte diferente ou quando existe a necessidade de combinar pequenas parcelas de carga em parcelas maiores ou vice-versa.

Um modelo de domínio consegue estabelecer conceitos e relacioná-los entre si dentro do âmbito de um problema. No contexto de uma metodologia orientada por objectos do mundo real, os conceitos são representados por classes e o relacionamento através de associações.

Foi desenvolvido um modelo de dados que especifica as várias classes de entidades utilizadas num problema de transporte marítimo, os seus atributos e as suas associações entre elas. Uma viagem é composta por vários segmentos ou *Legs* (Figura 4.10).

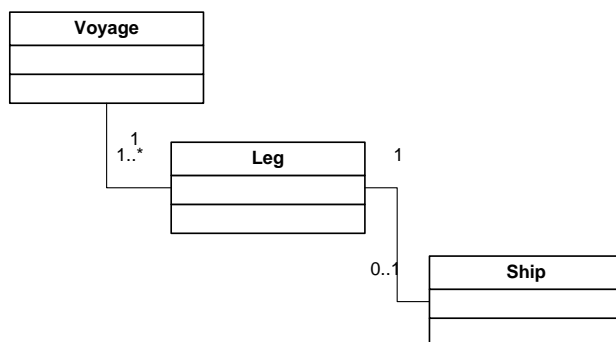


Figura 4.10: Classes Principais de dados

Cada objecto da classe *Leg* pode estar associado a zero ou mais objectos Navio (*Ship* na Figura 4.10). Neste contexto zero significa que a viagem ao longo desta *Leg* não é realizada pelo meio aquático, ou seja, é realizada por comboio ou camião numa viagem multimodal. *Legs* que envolvam o meio aquático (marítimo ou fluvial) são associadas a um ou mais Navios que podem ter várias características diferentes, como por exemplo em viagens que envolvam o transbordo entre vários navios diferentes.

Os objectos da classe *Leg* são utilizados para modelar os vários segmentos da viagem com características diferentes e não correspondem necessariamente a um segmento entre dois portos. Por exemplo, uma *Leg* pode ser utilizada para modelar um troço em que estejam contidas eclusas ou canais, ou uma região onde seja utilizado um tipo de combustível diferente (zonas protegidas) ou uma região onde a profundidade da água seja diferente (Figura 4.11).

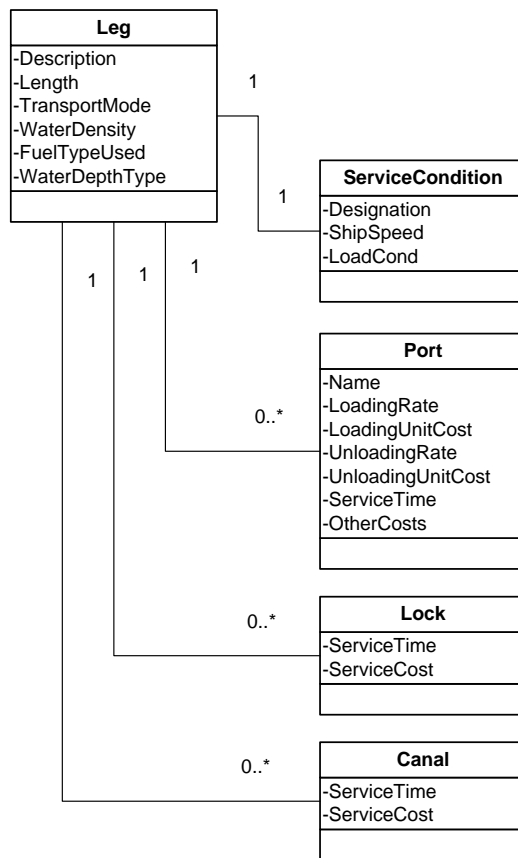


Figura 4.11: Classe Leg

A cada *Leg* está associada uma condição de serviço (*ServiceCondition*) e a cada condição de serviço está associada uma velocidade de serviço e uma condição de carga (totalmente carregado, em lastro, etc.). A informação associada a cada *Leg* contém a determinação do tempo despendido nessa mesma *Leg*, os custos associados e também as emissões produzidas. O somatório de todas as *Legs* produz resultados para a viagem completa.

Um objecto da classe Navio (*Ship*) é associado a um ou mais objectos do tipo Máquina Principal (*PrimeMover*). Os objectos desta classe podem ser de vários tipos (Motor a Diesel, Turbina a gás, Turbina a vapor).

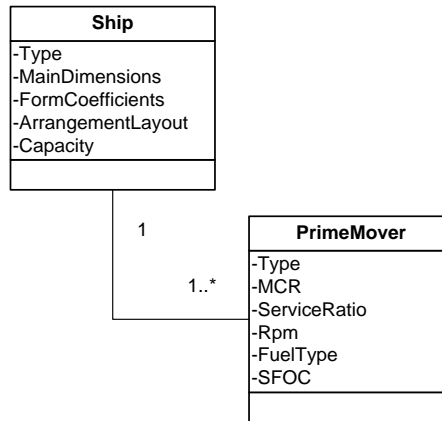


Figura 4.12: Classe Navio (*Ship*)

Neste estudo em particular, a viagem “redonda” (do terminal fluvial ao terminal marítimo e volta) está dividida em quatro *Legs*. Na Tabela 4.3 está representada toda a informação associada a cada uma das *Legs* da viagem.

Tabela 4.3: Características dos segmentos de viagem considerados

Segmentos da viagem (<i>Legs</i>)	Características
1. Pocinho-Foz	Comprimento: 95 milhas Navegação em rio Água doce Águas pouco profundas Navio totalmente carregado Eclusas
2. Foz-Aveiro	Comprimento: 32 milhas Navegação Costeira Água salgada Águas profundas Navio totalmente carregado
3. Aveiro-Foz	Comprimento: 32 milhas Navegação Costeira Água salgada Águas profundas Navio em lastro
4. Foz-Pocinho	Comprimento: 95 milhas Navegação em rio Água doce Águas pouco profundas Navio em lastro Eclusas

Neste caso foram apenas consideradas duas condições de serviço: totalmente carregado e em lastro. Aos segmentos com navegação em rio estão associadas as limitações enumeradas no Capítulo **Error! Reference source not found..**

Para cada *Leg* os portos visitados (se houver) são identificados e caracterizados com informação específica em relação, às capacidades de carga/descarga, taxas portuárias e tempos de serviço. A viagem considerada neste estudo liga dois terminais, um terminal fluvial (ainda não existente) onde os navios serão carregados a um terminal marítimo onde o minério será descarregado.

Na Tabela 4.4 estão compiladas as características consideradas para os dois terminais intervenientes neste estudo. O parâmetro Tempo de Serviço contempla a operação de aproximação ao cais e todo o

processo de atracagem e amarração (Secção 5.1.1). O tipo e capacidade dos sistemas de carga/descarga estão fundamentados no Secção 3.1.1.

Tabela 4.4: Características consideradas para os terminais

	Fluvial	Marítimo
Carga Movimentada	100%	100%
Equipamento de carga/descarga	<i>Ship-loader</i>	Sistema de garras
Capacidade de carga/descarga [ton/h]	2000	500
Tempo de Serviço [h]	0.5	1

Relativamente às taxas portuárias e às taxas associadas á circulação e utilização das eclusas no rio Douro foram consideradas as tarifas actualmente praticadas:

Terminal marítimo e fluvial

De acordo com (APA 2013b) a tarifa de uso do porto (TUP) integra duas componentes designadas de TUP/Navio e TUP/Carga. Para além da tarifa de uso de porto também são necessárias considerar as taxas relativas ao serviço de pilotagem, que é obrigatório, e ao serviço de amarração e desamarração. A soma de todos estes componentes dará então o custo total no terminal marítimo de Aveiro.

Tabela 4.5: Sumário dos custos do porto de marítimo (Aveiro)

		Condição
TUP/Navio	$0.4605\text{€} \times GT$	$; R \geq 1.33$
	$0.1961\text{€} \times GT + 0.1989 \text{€} \times QT$	$; 0 < R < 1.33$
TUP/Carga	0.0886€ por tonelada de carga	
Pilotos	$8.5736\text{€} \times \sqrt{GT}$	
Classe de GT		
	Até 999	126.5943€
Amarração	De 1000 a 4999	177.2320€
	De 5000 a 9999	227.8697€
	De 10000 a 19999	253.1886€
	≥ 20000	303.8263€

Onde GT é a arqueação bruta (*Gross tonnage*), QT a quantidade de carga carregada ou descarregada em toneladas e R a razão entre QT e GT.

Como o terminal fluvial não existe considerou-se que as taxas praticadas são as mesmas do terminal marítimo, nomeadamente o TUP/Navio e o TUP/Carga.

Navegação fluvial

De acordo com (IND 1998) a circulação de embarcações de carga na via navegável está sujeita à taxa de €0,15 por Tonelagem de Arqueação Bruta (TAB), tendo como montante mínimo a quantia de €74,82. Sendo a tonelagem de arqueação bruta, para efeitos de cálculo da taxa, equivalente a 80% da capacidade de transporte da embarcação em toneladas. A circulação de uma embarcação de carga em lastro está sujeita à taxa de €74,82.

4.4 Optimização

O procedimento de optimização foi feito de acordo com a seguinte configuração: um objectivo, seis variáveis de projecto e dezasseis restrições.

A optimização é realizada através de um algoritmo não-linear bastante eficiente, GRG2 - *Generalized Reduced Gradient* (Lasdon et al. 1978). Para lidar com o comportamento local deste algoritmo, de forma a obter soluções óptimas globais e não só as locais, consideraram-se 100 pontos de partida gerados aleatoriamente dentro do espaço do projecto. Este espaço é criado/determinado através de limites máximos e mínimos que tem que ser definidos para cada variável de projecto.

O modelo SSM, o modelo de viagem e o procedimento de optimização foram realizados na ferramenta de *software* apresentada em (Ventura 2013). Esta ferramenta executa um conceito de prototipagem rápida do modelo SSM (Figura 4.13). De acordo com os dados de configuração inseridos pelo utilizador, os diferentes tipos de componentes são seleccionados de acordo com o tipo de navio, tipo de propulsão etc. É então gerado um ficheiro *Excel* no qual toda a informação inicial pode ser inserida.

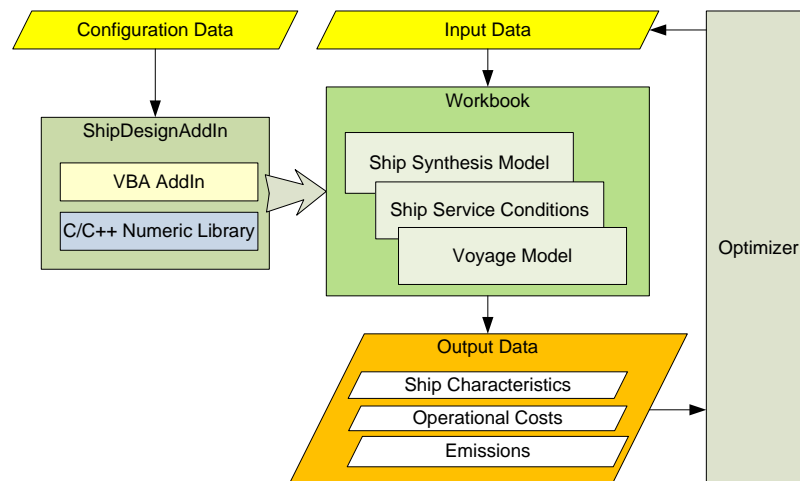


Figura 4.13: Arquitectura da ferramenta de *software* (Merino da Silva & Ventura 2014)

O modelo SSM é executado uma primeira vez para determinar a potência propulsiva necessária para que o navio consiga atingir os 7 nós de velocidade mínima requerida, na condição de serviço Totalmente carregado. O valor de potência obtido é utilizado para escolher a máquina principal.

4.4.1 Parâmetros

Geralmente os problemas de engenharia são na sua essência multiobjectivo. Contudo, num grau de decisão elevado, e para que os tempos de computação sejam aceitáveis, os vários objectivos existentes neste tipo de problemas podem ser substituídos adequadamente por restrições adequadas. Neste estudo considera-se apenas um objectivo, a minimização do *Required Freight Rate* (RFR), em português frete mínimo requerido, ou seja, a taxa de frete mínima que deve ser cobrada pelo armador do navio para que suportar os seus custos.

As variáveis de projecto consideradas estão representadas na tabela abaixo.

Tabela 4.6: Variáveis de projecto

Lpp [m]
D [m]
T [m]
Cb
Vcarregado [nós]
Vlastro [nós]

Relativamente às restrições, consideraram-se de dois tipos: limitações físicas e requisitos técnicos. As limitações físicas resultam da configuração do rio (calado máximo), do tamanho das eclusas (comprimento fora a fora e boca máximos), pontes existentes (altura máxima – *Air draft*). As restrições técnicas estão relacionadas com o bordo livre, o EEDI, o volume de carga e o espaço livre abaixo da quilha (*under keel clearance – UKC*). Não foram considerados parâmetros relacionados com a estabilidade devido ao tipo de carga que está a ser transportado e devido ao tipo de rota, maioritariamente em rio com águas calmas.

O espaço livre abaixo da quilha (UKC) é obtido através da expressão:

$$UKC = h - T - d - s \quad 4.11$$

Onde h é a profundidade da água, T o calado do navio, d o caimento do navio e s o *squat*, todos em metros. O valor de UKC mínimo aceitável depende da morfologia do fundo, mas 0.50 metros é um valor geralmente utilizado. Apesar do rio ter algumas zonas com profundidade máxima de 4.20 metros, a extensão dessas zonas não justifica a utilização do UKC como restrição. As principais restrições estão representadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Restrições Principais

LOA	<= 83.00 m
Calado (T)	<= 3.70 m
Pontal (D) – Calado (T)	>= Bordo livre de verão IMO
Volume de carga	>= CDW/Densidade da carga
EEDI atingido	<= EEDI exigido

4.4.2 Cenários

São considerados dois cenários: no primeiro, o navio está equipado com um motor a quatro tempos que consome MDO como combustível, no segundo o motor consome LNG. Para a solução a LNG são necessárias algumas considerações técnicas e económicas.

Do ponto de vista técnico a configuração da casa da máquina tem que ser reconsiderada. O sistema de propulsão a LNG tem que cumprir com algumas normas e regulamentos de segurança. De acordo com *Interim Guidelines on Safety for Natural Gas-fuelled Engine*, em português Directrizes Provisórias sobre Segurança para Motores Alimentados a Gás Natural (IMO 2009), o armazenamento de LNG pode definido em dois géneros: armazenamento em zonas fechadas e armazenamento e decks ou espaços abertos.

Para o armazenamento em espaços fechados é necessário criar um espaço especial, uma sala tanque (*tank room*), isto é, uma sala estanque circundante ao tanque, válvulas e ligações. O tanque dentro deste espaço deverá estar localizado o mais próximo possível do eixo de simetria do navio a uma distância menor do que B/5 (sendo B a boca do navio) dos bordos do navio e nunca menos que 760 mm.

Neste estudo considera-se que o armazenamento do LNG é feito num deck/espço aberto. Esta solução não implica nenhuma alteração no modelo SSM, a compartimentação do casco pode ser feita da mesma forma (ver secção 4.2.1) não sendo necessária a criação de uma sala tanque. O armazenamento do LNG será feito em tanques contentorizados (Figura 4.15) localizados no deck principal. Este tipo de tanque pode ser transportado e reabastecido em terra evitando assim a dependência de que existam postos de abastecimento de LNG nas proximidades. Este tipo de tanques tem dois tamanhos típicos, contentores ISO de 20 e de 40 pés com capacidades de armazenamento de LNG de aproximadamente 16 e 32 m³, respectivamente. Na Figura 4.14 está representado um possível arranjo da zona da casa da máquina e da zona de armazenamento feito com dois tanques de 20 pés.

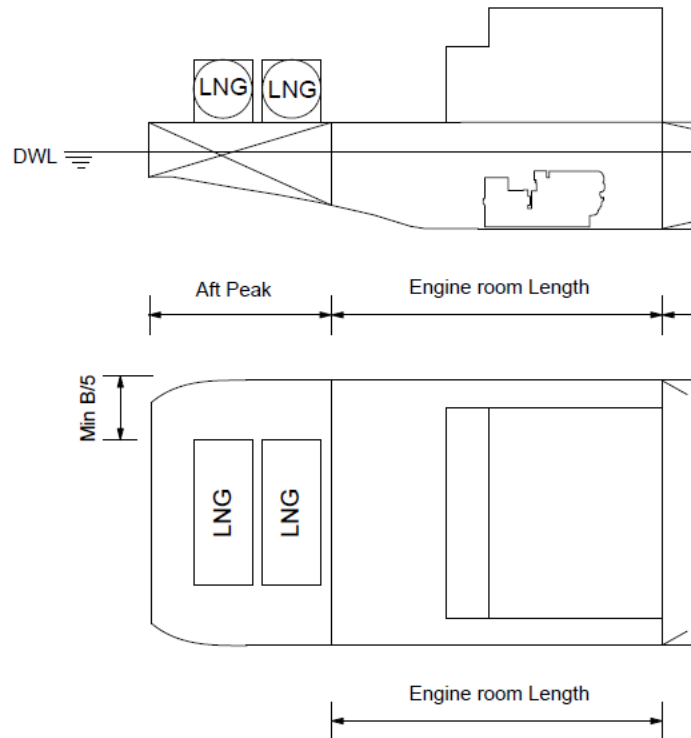


Figura 4.14: Arranjo da zona de armazenamento de LNG

Para os dois cenários são considerados motores (máquinas principais) com características reais, isto é, as potências e os consumos considerados são baseados em catálogos existentes.

Tal como já foi referido no final da secção 4.2.5 considera-se que o sistema propulsivo instalado tem potência suficiente para garantir uma velocidade mínima de 7 nós. Considerando este factor e de acordo com uma primeira análise concluiu-se que a potência necessária está entre os 700 e os 800 kW. As características dos motores considerados neste estudo estão indicadas na Tabela 4.8

Tabela 4.8: Características dos motores considerados

	MDO LNG	
Potência [kW]	800	
Consumo específico [g/kW/h]	198	153

Para a avaliação económica assume-se que a alternativa a LNG representa um acréscimo de 20% no custo total da maquinaria (Anon 2013).



Figura 4.15: Tanque contentorizado de LNG (Wartsila LNG PAC)

Considerando as características apresentadas na Tabela 4.8 e que o LNG tem uma densidade de 464 Kg/m^3 (Gumpel 2012), um tanque contentorizado de 20 pés terá capacidade para aproximadamente 3 ciclos de viagem (saída do terminal fluvial e regresso).

4.4.3 Resultados

As características principais que foram obtidas após o processo de optimização são bastante similares para os dois cenários considerados (Tabela 4.9).

Tabela 4.9: Características do navio óptimo

		MDO	LNG
Loa	[m]	83.00	
Lpp	[m]	80.50	
Boca	[m]	11.00	
Pontal	[m]	4.76	
Calado	[m]	3.70	
Cb	[--]	0.85	
Deadweight	[ton]	1,910	
Cargo Deadweight	[ton]	1,711	1,775
Velocidade de Serviço (carregado)	[nós]	10.59	10.04
Velocidade de Serviço (em lastro)	[nós]	9.41	10.16

As principais diferenças entre os dois tipos de sistemas propulsivos considerados reflectem-se na parte económica. O LNG é um combustível mais barato e o consumo específico do motor é mais baixa quando comparada com a versão a MDO. Estes dois factos são perceptíveis nos custos da viagem apresentados na Figura 4.16, onde se pode verificar que os custos de combustível representam 54% do custo total da viagem, para o caso da versão a MDO, enquanto para a versão a LNG o custo do combustível representa apenas 28%.

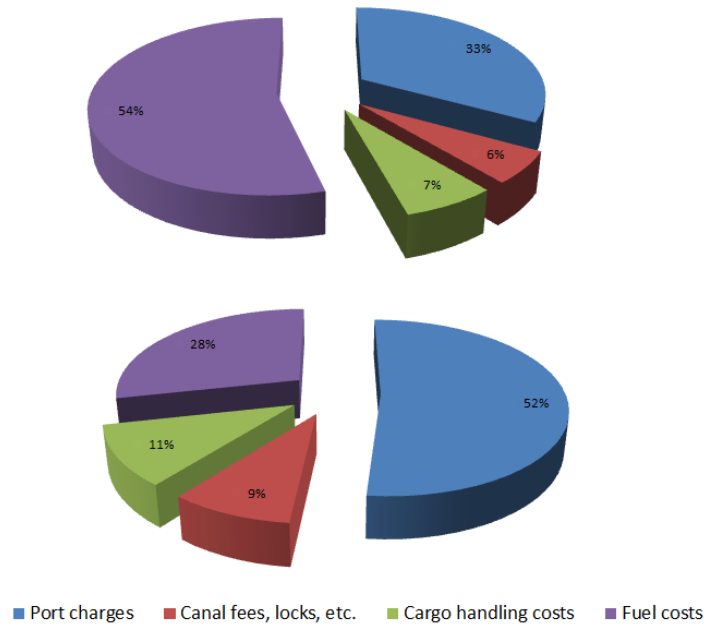


Figura 4.16: Decomposição dos custos de viagem (Cima- MDO, Baixo-LNG)

Apesar do custo adicional que o sistema de LNG representa, o RFR obtido para esta alternativa é muito menor do que o obtido para a versão MDO (Tabela 4.10).

Com base nos RFRs é possível calcular o tempo necessário para reaver o custo adicional que o sistema a LNG acarreta (Tempo de retorno ou *payback time*). O tempo de retorno é obtido através da expressão:

$$t_{\text{retorno}} = \frac{\Delta \text{Investimento}_{LNG,MDO}}{Q_{\text{anual}} \times \Delta RFR_{LNG,MDO}} \quad 4.7$$

Onde t_{retorno} é o tempo necessário para recuperar o investimento em anos, $\Delta \text{Investimento}$ o investimento adicional, Q_{anual} a carga transportada anualmente em ton/ano, ΔRFR a diferença de RFR em \$/ton.

De acordo com a expressão 4.10 o tempo de retorno para o investimento adicional do sistema LNG é menor do que um ano ($t_{\text{retorno}} \sim 0.62$ anos).

Outro parâmetro que diferencia estes dois sistemas de propulsão é o índice EEDI. Tal como já foi dito, as regras IMO em relação às emissões não se aplicam a vias internas navegáveis mas como estes navios vão navegar em zona ambientalmente sensíveis (vinhas, zonas turísticas, áreas protegidas, etc.) as emissões devem ser minimizadas.

Ambas as alternativas cumprem com os requisitos da IMO mas as emissões apresentadas pelo motor a MDO são mais elevadas. Se compararmos os dois sistemas o LNG representa uma redução de 33% nas emissões anuais de CO₂. Considerando que esta linha de transporte de minério de ferro será operada por uma frota considerável (7 a 8 navios, se considerarmos uma produção anual de 3 milhões de toneladas) a solução a LNG representa uma redução total de aproximadamente 4,800 toneladas de CO₂.

Tabela 4.10: RFR e índices EEDI obtidos para os cenários LNG e MDO

		MDO	LNG
RFR	[\$/ton]	5.644	4.705
EEDI	[g CO2/ton/milha]	26.183	21.086
CO2 emissão	[ton/ano]	1,847	1,238
CO2 redução	[%]	-	33%

Tal como já foi referido, as dimensões obtidas para os dois cenários são bastante similares, incluindo as velocidades de operação. Contudo, o baixo RFR e índice de emissões EEDI obtido na solução a LNG em conjunto com o reduzido tempo de retorno necessário para transpor o investimento inicial, tornam a alternativa a LNG a melhor solução. As conclusões sobre este e outros aspectos serão aprofundadas no Capítulo 7.

Nos capítulos seguintes, referentes à simulação, serão utilizados apenas três parâmetros provenientes deste problema de optimização: as duas velocidades de serviço (carregado e em lastro) e a capacidade de carga do navio (*cargo deadweight*).

5. Desenvolvimento do modelo de simulação

O comportamento de um sistema pode ser estudado de várias formas tal como está esquematizado na Figura 5.1. No caso do sistema de transporte em estudo nesta dissertação, experiências com o sistema real são impossíveis de realizar uma vez que o sistema não existe, experiências com modelos físicos não se enquadram neste tipo de sistemas, resta portanto a análise através de um modelo matemático.

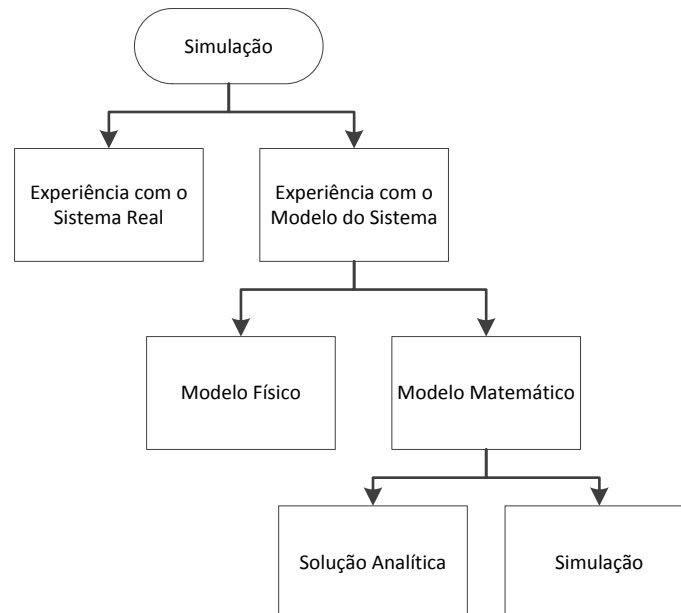


Figura 5.1: Formas de estudar um sistema (Law & Kelton 2000)

No caso de existir uma solução analítica para um modelo matemático que seja computacionalmente eficiente é preferível realizar a análise do sistema através dessa solução em vez da simulação. Contudo, a complexidade do sistema de transporte aqui em análise eleva também a complexidade do modelo matemático impedindo assim a possibilidade de desenvolver uma solução analítica válida. Considera-se assim que a melhor forma de analisar este sistema de transporte é através da simulação.

Simulação refere-se a um vasto conjunto de métodos e técnicas para emular o comportamento de sistemas, ou processos, reais e é geralmente feita em computador. Para que estes sistemas possam ser estudados cientificamente é necessário realizar um conjunto de considerações de como o sistema funciona. Estas considerações, que são geralmente relações matemáticas ou lógicas, constituem o modelo simulação que é utilizado para analisar o comportamento do sistema correspondente (Law & Kelton 2000).

Um sistema é definido por uma coleção de entidades que actuam e interagem em conjunto para a realização de um fim lógico (Schmidt & Taylor 1970). Os sistemas podem ser categorizados em dois tipos, contínuos ou discretos. Num sistema contínuo as variáveis de estado (conjunto variáveis necessárias descrever o sistema num determinado ponto no tempo) mudam continuamente ao longo do tempo. Num sistema discreto as variáveis de estado mudam em diferentes pontos do tempo. Estes pontos no tempo são onde ocorrem Eventos, definindo-se evento como uma ocorrência instantânea que pode mudar o estado do sistema. O sistema de transporte aqui em estudo é considerado um sistema discreto.

Neste capítulo é feita uma descrição de como foi desenvolvido o modelo de simulação. Esta descrição divide o modelo em duas partes, que estando interligadas, representam dois ambientes distintos. A primeira parte é referente a toda a área fluvial que inclui as operações no terminal fluvial no Pocinho, todo o percurso compreendido entre o terminal e a barra do Douro, eclusas e tráfego fluvial existente. A segunda parte cobre tudo o que está relacionado com a área marítima, ou seja, o trajecto marítimo-costeiro, compreendido entre a barra do Douro e o porto de Aveiro, bem como toda a operação no terminal marítimo em Aveiro.

O modelo engloba todo o sistema de transporte, seus integrantes e operações desde a chegada do minério de ferro ao terminal fluvial até a exportação deste a partir do terminal de Aveiro. Sendo estes os limites do campo de acção deste estudo.

A descrição é feita seguindo todo o percurso do minério de ferro desde a sua chegada ao terminal fluvial até ao terminal de Aveiro e posterior exportação desde esse mesmo terminal.

5.1 Trajecto e terminal fluvial

A forma como o minério de ferro é transportado até ao terminal fluvial está fora do âmbito deste modelo. De qualquer forma considerando casos semelhantes de terminais de granel que são alimentados directamente a partir de uma mina, nas suas imediações, pode-se concluir que este transporte é feito maioritariamente de duas formas, através de um sistema de correia transportadora (*conveyor belt system*) ou por intermédio de transporte ferroviário.

Neste modelo a chegada de minério de ferro ao terminal fluvial é modelada através de uma distribuição de *Poisson* com uma média de chegada de 400 toneladas de minério de ferro por hora. Este tipo de distribuição é muitas vezes utilizado para modelar o número de chegadas, ou entradas, num sistema durante um período de tempo específico (Gallager 2014). Assume-se que o minério de ferro chega ao terminal já processado sob a forma de *pellets*, processo que poderá ser efectuado na mina, tal como é proposto em (Mota 2012).

As limitações da área de armazenamento do terminal são determinadas no Capítulo 3.2.3. As características do(s) navio(s) graneleiros rio-mar relevantes para o modelo de simulação, nomeadamente a capacidade de carga e a velocidade, estão determinadas no Capítulo 4.4.3. O número de navios que constituem a frota de transporte toma vários valores, sendo uma variável incluída nos diferentes cenários de simulação (ver Capítulo 4.4.2).

O funcionamento do terminal fluvial no modelo está esquematizado na Figura 5.2.

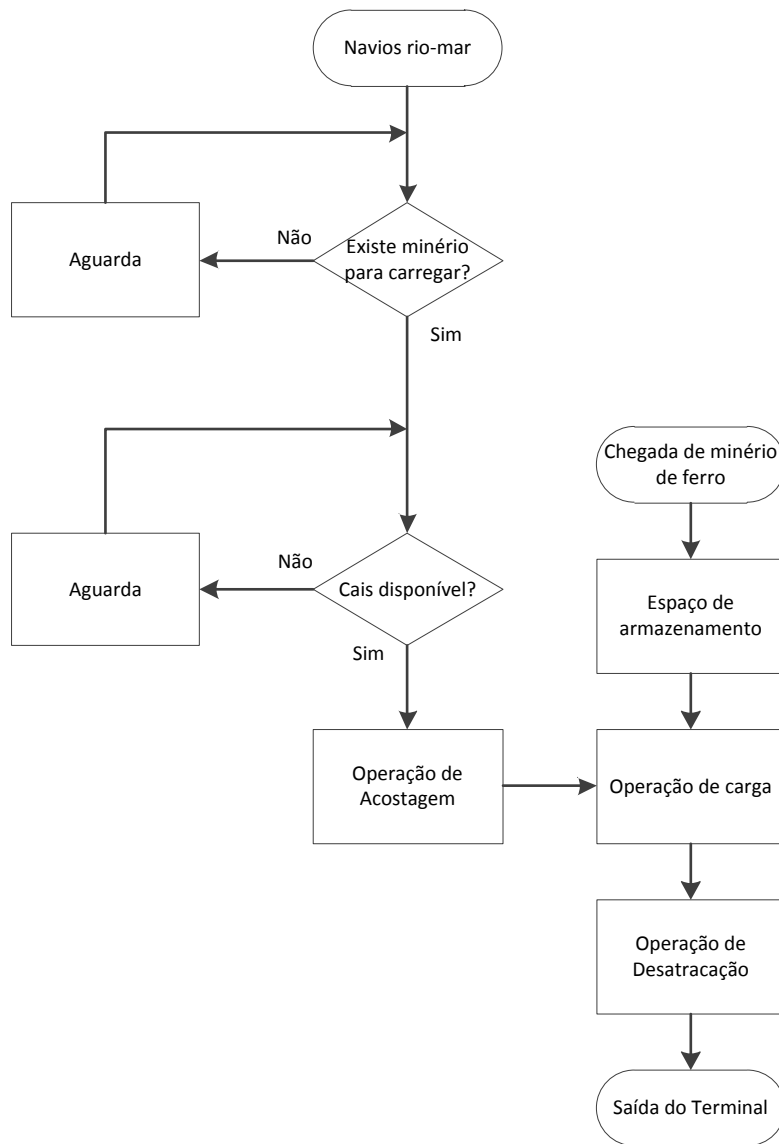


Figura 5.2: Funcionamento do Terminal Fluvial

5.1.1 Operação de acostagem e desatracação

As operações de acostagem e desatracação também estão contempladas no modelo de simulação. De acordo com (UNCTAD 1985) estas operações juntas têm uma duração de aproximadamente 2 horas, contudo considerando que os navios rio-mar são navios relativamente pequenos e com uma boa manobrabilidade assume-se que estas operações têm uma duração de 1 hora.

Os cais e os equipamentos de carga são considerados como um recurso que é ocupado pelo navio durante todo o tempo serviço. Estes recursos têm uma certa capacidade que dependerá da configuração do terminal, i.e., se o terminal for constituído por dois cais então o “recurso cais” tem capacidade de operar dois navios em simultâneo e assim sucessivamente.

5.1.2 Operação de carga

Num cenário realista o tempo despendido numa operação de carga de um navio não tem um valor constante. Considerando um sistema de carga para esta operação, pode-se tentar estimar o tempo médio necessário para a completar com base na capacidade de carga nominal desse mesmo sistema. Contudo, esse tempo é susceptível a variações se considerarmos por exemplo, que o sistema em questão é operado por pessoas, que não trabalham todas ao mesmo ritmo, que as operações estão sujeitas a atrasos devido a condições climatéricas, etc. Para tentar reproduzir este grau de realismo no modelo de simulação o tempo despendido pelo navio no terminal terá que ser variável.

A duração deste tipo de operações (carga e descarga) pode ser representada por uma distribuição probabilística de *Erlang*, tal como é proposto em (UNCTAD 1985). Esta distribuição é utilizada em vários artigos de simulação e modelação de terminais, tais como: (Kia et al. 2002) e (El-Naggar 2010).

De outra forma em (Assumma & Vitetta 2006) é considerado que o tempo de serviço do navio em cais é dado pela soma de duas parcelas. Uma referente ao tempo de serviço em condições normais, ou não perturbadas, e outra que considera um acréscimo de tempo devido a possíveis perturbações na operação, isto é, situações de avaria, desaceleração da operação, etc. O tempo total de serviço é então dado pela expressão:

$$T = T_{det} + T_{stoc} \quad 5.1$$

Onde T é o tempo total da operação, T_{det} o valor determinístico do tempo de carga ou descarga, calculado para condições normais de funcionamento, e T_{stoc} o valor estocástico do tempo calculado sob condições perturbadas. Este valor é representado através de uma variável estocástica distribuída de acordo com uma função de densidade probabilística Gamma, $f(T, \alpha, \beta)$.

$$f(T, \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} T^{\alpha-1} e^{-\frac{T}{\beta}} \quad 5.2$$

Onde α é factor de forma e β o factor de escala.

Há que referir que a distribuição probabilística *Gamma* para valores de α inteiros e positivos é muitas vezes referida como uma distribuição de *Erlang*, ou seja, a distribuição de *Erlang* utilizada no método proposto em (UNCTAD 1985) na verdade é um caso especial da distribuição *Gamma* (Walck & Group 2007).

Neste modelo de simulação o tempo de serviço é representado tal como é proposto em (Assumma & Vitetta 2006). Ao utilizar este método não nos estamos a afastar do método amplamente utilizado que é proposto em (UNCTAD 1985), uma vez que os valores de α utilizados para a determinação do parâmetro T_{stoc} neste estudo são inteiros e positivos. Na Tabela 5.1 estão representados os parâmetros utilizados na distribuição *Gamma* para a modelação de T_{stoc} e na Figura 5.3 a respectiva função de probabilidade.

Tabela 5.1: Parâmetros da distribuição *Gamma*

Factor de escala - β	Factor de forma - α
1	1

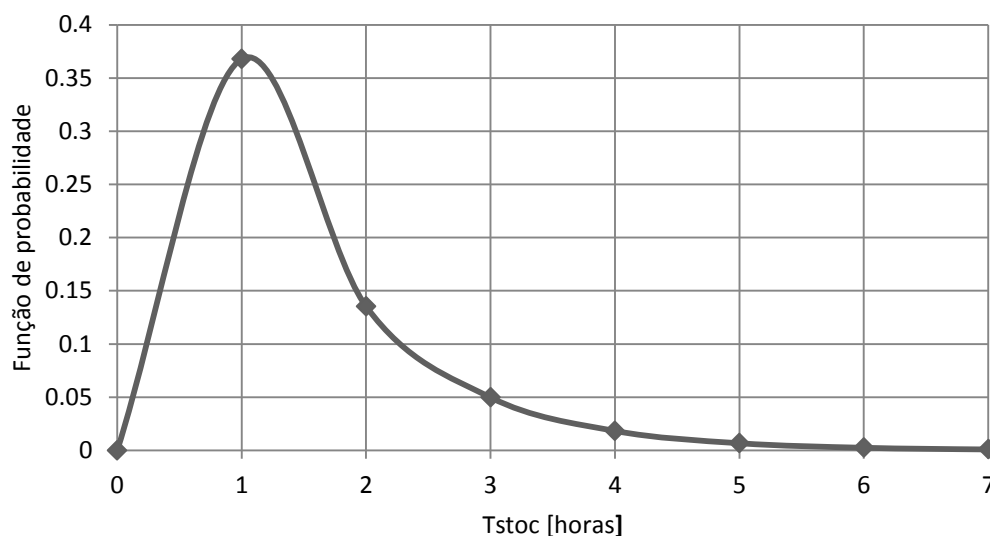


Figura 5.3: Função de probabilidade Gamma

O valor do tempo de serviço T_{det} em condições normais é determinado de acordo com a capacidade de carga do(s) sistema(s) presente(s) no terminal fluvial (ver Capítulo 3.2.2) e com a capacidade do navio (ver Capítulo 4.4.3). A capacidade do sistema e o número de sistemas são uma variável do modelo de simulação e serão testadas várias combinações destes dois parâmetros através de diferentes cenários de simulação de forma a otimizar a performance do terminal fluvial.

De acordo com (UNCTAD 1985) as capacidades de carga e descarga podem ser divididas em três categorias, capacidade máxima (*peak capacity*), capacidade nominal (*rated capacity*) e capacidade efectiva (*effective capacity*). Por forma a não fazer considerações demasiado optimistas nos tempos de carga é recomendado considerar que as capacidades de carga/descarga dos equipamentos em questão não excedam os 70% da sua capacidade nominal, para o caso de carga e 50% para o caso de descarga (UNCTAD 1976). O cálculo do tempo T_{det} é feito considerando estes dois factores.

No modelo de simulação a operação de carga no terminal é modelada como um processo em que os recursos cais (*Berth*) e equipamento de carga (*Shiploader*) são requisitados pelos navios durante um espaço de tempo igual ao tempo de serviço T , obtido pelo método anteriormente descrito.

5.1.3 Eclusas e percurso fluvial

Neste modelo de simulação as distâncias entre os vários pontos ao longo do percurso (distância entre eclusas, distância entre terminais, etc.) é feita em milhas. No campo das distâncias o *software* utilizado para implementar o modelo permite apenas a entrada de valores inteiros, obrigando assim a alguns arredondamentos nestes parâmetros.

A velocidade com que o(s) navio(s) graneleiro(s) rio-mar circulam ao longo de todo o percurso é determinada no Capítulo 4.4.3.

As eclusas têm características idênticas e neste modelo foram consideradas exactamente iguais. Para este estudo não foi possível reunir muita informação sobre a duração das manobras ligadas às eclusas. Actualmente as manobras ligadas às eclusas demoram, em média, cerca de 45 minutos (Mota 2012), para adicionar um certo grau de incerteza a esta operação o tempo despendido numa destas manobras é modelado através de uma distribuição Normal. Assumiu-se uma distribuição deste tipo porque neste estudo não foi compilada informação suficiente sobre a duração destas operações (para além da duração média) considera-se assim que este processo tem uma variabilidade de tempo

baixa. Os parâmetros da distribuição estão representados na Tabela 5.2. Procura-se desta forma tornar o modelo mais realista.

Tabela 5.2: Parâmetros da distribuição Normal

Média - μ	Desvio padrão - σ
45	4

No modelo de simulação as manobras ligadas às eclusas são modeladas como um processo (cada eclusa é um processo diferente). Esse processo utiliza o recurso eclusa durante o tempo definido para esta operação. O recurso eclusa consegue apenas servir um navio de cada vez, outros navios que necessitem utilizar este recurso terão que aguardar até o recurso estar disponível, sendo servidos por ordem de chegada (sistema *First-come, First-served*).

5.1.4 Tráfego fluvial existente

É de vital importância considerar o tráfego fluvial existente na via navegável do rio Douro uma vez que este tráfego utilizará o mesmo espaço físico e recursos que os navios rio-mar, nomeadamente as eclusas. É portanto necessário considerar no modelo a entropia que este tráfego irá introduzir no sistema de transporte, nomeadamente no tempo de espera dos navios graneleiros rio-mar nas eclusas.

Como não é possível representar todas as embarcações que circulam na via navegável consideraram-se apenas as embarcações ligadas à actividade marítimo-turística, actividade que representa a principal componente do tráfego fluvial e que se encontra em franca expansão. Para tal foi feito um levantamento de dados relativos aos cruzeiros existentes (horários, sazonalidade e percursos) através do site de um operador turístico (no Douro 2013).

No total foram implementados no modelo de simulação 10 cruzeiros diferentes, estes cruzeiros operam durante a semana e fim-de-semana (com sazonalidades que variam entre Março a Dezembro) e em percursos que cobrem grande parte da via navegável. No modelo estas embarcações seguem com o maior rigor possível o horário (e a sazonalidade) que é disponibilizado pelo operador turístico.

5.2 Trajecto marítimo costeiro e operação no terminal de Aveiro

O trajecto marítimo costeiro compreendido neste caso entre a barra do Douro e o porto de Aveiro tem um total de 32 milhas (Aveiro 2012). Ao longo deste trajecto o(s) navio(s) rio-mar praticam duas velocidades diferentes, a velocidade no trajecto marítimo costeiro (determinada na secção 4.4.3), entre as barras do Douro e Aveiro e a velocidade de entrada no porto de Aveiro que segundo (APA 2014) não pode exceder os 5 nós. Considera-se que o trajecto entre a entrada da barra até ao terminal tem uma distância de 2 milhas.

5.2.1 Entrada em porto e operação no terminal

No modelo de simulação o terminal de Aveiro é constituído pelos seguintes recursos: Serviço de rebocadores, Serviço de pilotagem, cais, equipamento de carga, equipamento de descarga e espaço de armazenamento.

De acordo com a autoridade portuária (APA 2014) todos os navios que entrem no porto terão que ter um piloto a bordo durante a entrada e operação de acostagem e se os navios em causa tiverem mais

que 95 metros de comprimento fora a fora a entrada em porto terá que ser feita obrigatoriamente com auxílio de rebocadores. Estes dois requisitos estão implementados no modelo.

Ao entrar no porto de Aveiro os navios rio-mar enfrentam vários cenários/situações possíveis: podem não ter qualquer impedimento na operação de entrada e de descarga, o que implica chegar e estarem disponíveis o serviço de pilotagem, o(s) cais e o(s) sistema(s) de descarga; ou podem ter que aguardar pela disponibilidade destes recursos (pilotos, cais e equipamento de descarga). Existe ainda uma terceira situação possível, que corresponde a chegar ao terminal e o espaço de armazenamento ter atingido a capacidade máxima. Neste caso o(s) navio(s) rio-mar terão que aguardar pela chegada do navio *Handysize* que será carregado, libertando assim algum espaço de armazenamento.

O processo compreendido entre a chegada, operação de descarga e a saída do porto está esquematizado na Figura 5.4. Na entrada em porto também está contemplado o tempo necessário às manobras de acostagem e desatracação que tem a duração definida na Secção 5.1.1.

5.2.2 Processo de carga e descarga

Ao contrário do terminal fluvial este terminal tem duas vertentes, a importação e a exportação, fazendo portanto carga e descarga de minério. No caso da operação de descarga, o sistema utilizado é diferente dos utilizados para a carga, sendo a descarga feita por intermédio de garras (ver Secção 3.3). Estes sistemas de descarga são consideravelmente mais lentos do que os sistemas de carga tendo capacidades que variam entre as 500 e as 5000 toneladas por hora. O tempo necessário para realizar uma operação de descarga será modelado com o mesmo método descrito na Secção 5.1.2. No cálculo da parcela T_{det} é considerada apenas 50% da capacidade nominal do sistema de carga, a parcela T_{stoc} segue exactamente a mesma distribuição *Gamma*.

A operação de carga, que serve exclusivamente os navios *Handysize*, segue as mesmas premissas estabelecidas na Secção 5.1.2.

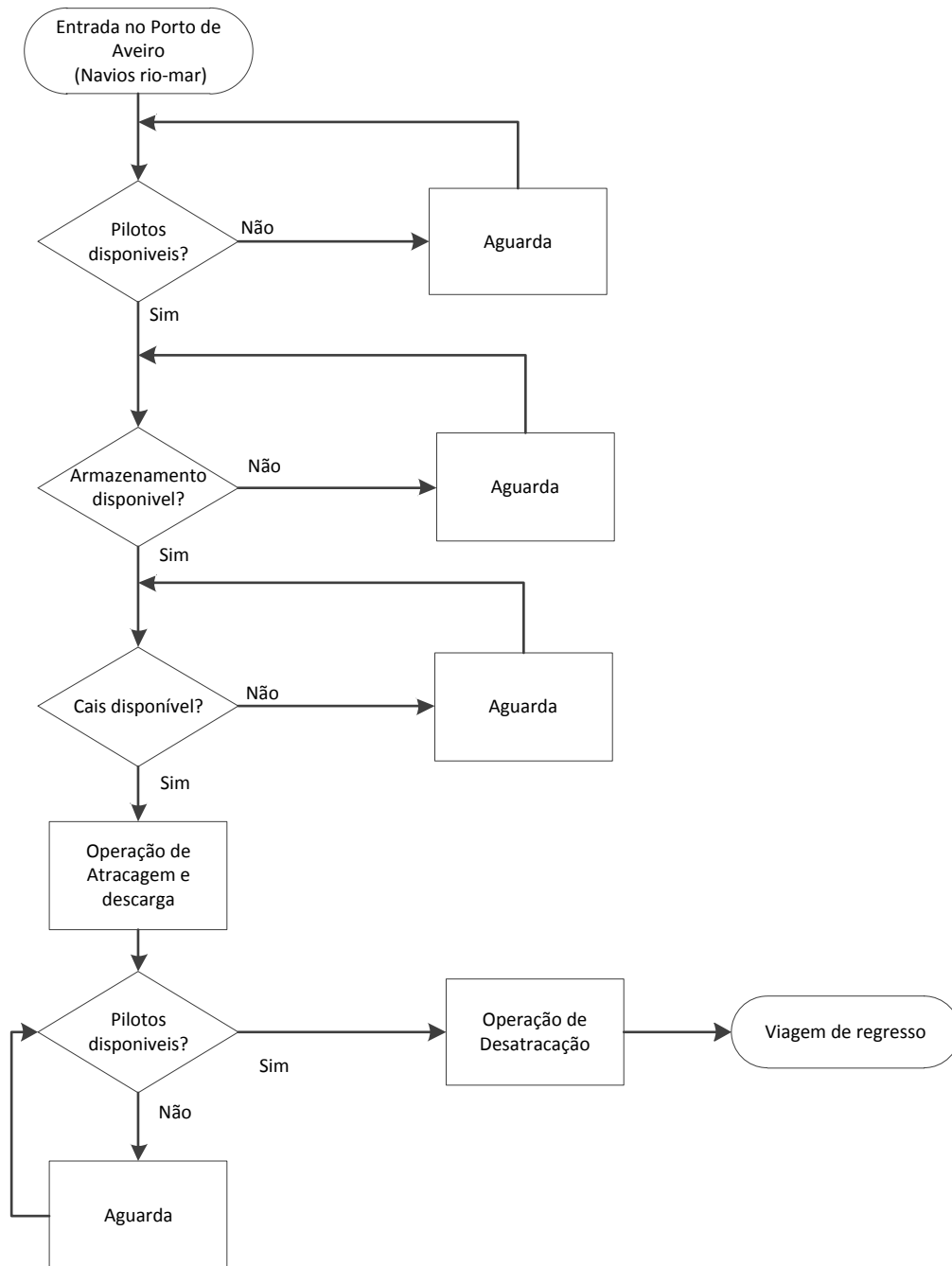


Figura 5.4: Funcionamento do Terminal de Aveiro (navios rio-mar)

5.2.3 Navio Handysize

Tal como já foi referido, no modelo de simulação também é considerado o escoamento do minério de ferro para fora do terminal marítimo. A análise da área de armazenamento do terminal está directamente relacionada com esta consideração, isto é, se a cadência deste escoamento for muito pequena o limite do espaço de armazenamento pode ser atingido o que fará com que exista um congestionamento no terminal.

As dimensões máximas permitidas no Terminal Norte, onde se situa o terminal de graneis sólidos, são de 150 metros de comprimento e 9 metros de calado, de acordo com (APA 2014). Devido a estas

limitações considera-se que escoamento do minério de ferro para fora do terminal é feito por navios da classe *Handysize*, cujas dimensões típicas se enquadram nestas limitações.

Dentro desta classe de navios o peso bruto (DWT- *deadweight*) de cada navio pode variar. Para emular este aspecto o *deadweight* de cada navio que visita o terminal será gerado com uma certa variação, esta variação será modelada através de uma distribuição Normal com uma média de 16150 toneladas de DWT e com um desvio padrão de 3650 (Stopford 2009).

O procedimento de entrada no porto é igual ao dos navios rio-mar com a diferença que os navios *Handysize* são obrigados pela administração do porto a utilizar navios rebocadores para além do serviço de pilotagem. Considera-se que as operações de acostagem e desatracação para estes navios têm uma duração de aproximadamente 2 horas (UNCTAD 1985).

Considera-se também que o terminal tem um cais dedicado para estes navios (não interferindo com os cais dedicados aos navios rio-mar) e que os navios são sempre completamente carregados, isto é, se não existir minério suficiente para carregar o navio até à sua capacidade máxima, este tem que aguardar, saindo apenas do terminal quando estiver totalmente carregado. O sistema de carga considerado é do tipo contínuo, à semelhança do terminal fluvial, com uma capacidade de 3000 ton/hora.

A frequência com que estes navios visitam o terminal de granéis é uma variável considerada nos vários cenários de simulação (ver Capítulo 6.4).

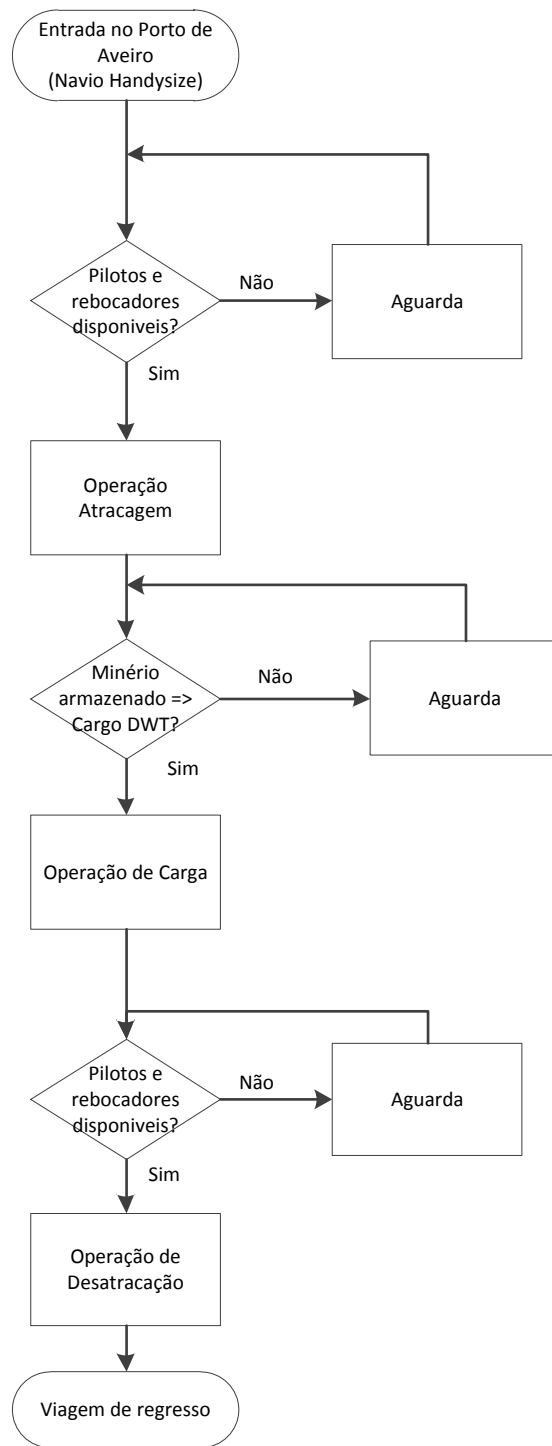


Figura 5.5: Funcionamento do Terminal de Aveiro (Navio Handysize)

6. Simulação

A implementação do modelo de simulação foi desenvolvida num *software* de simulação de eventos discretos (Rockwell Automation 2010). Na Figura 6.1 está representada a animação criada para este modelo de simulação.

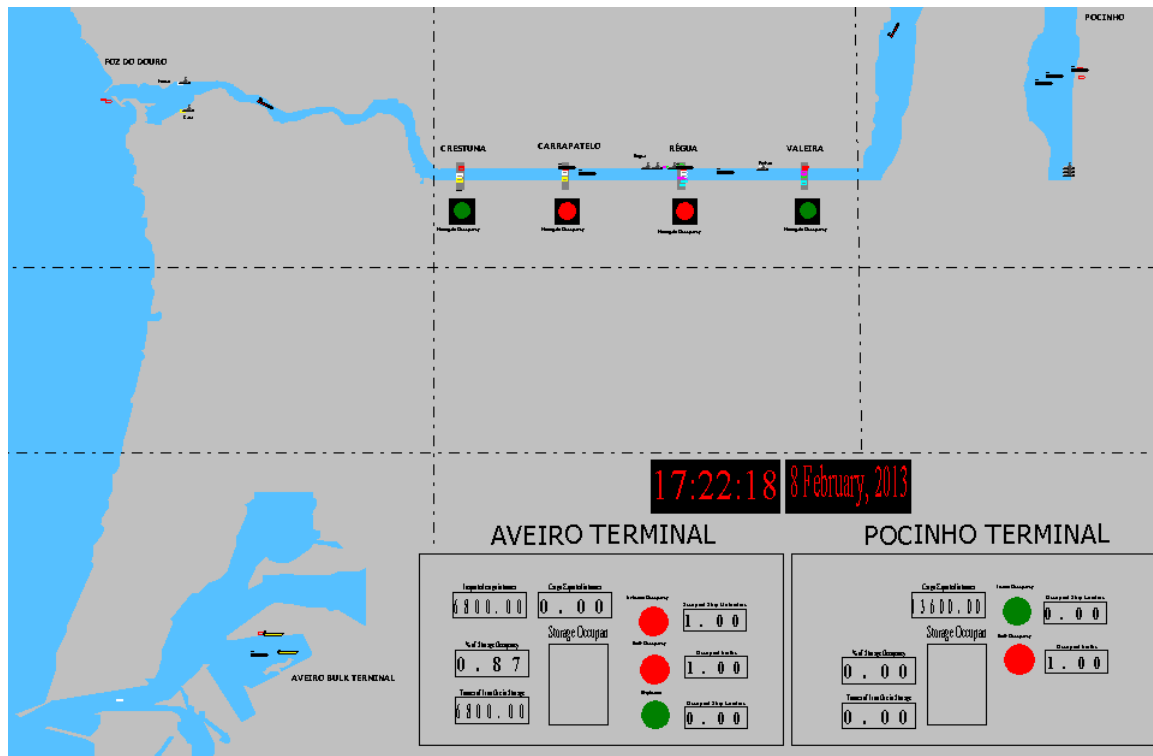


Figura 6.1: Animação do Modelo de Simulação (Rockwell Automation 2010)

A simulação do modelo é feita para vários cenários diferentes, nos quais a configuração dos terminais e as capacidades dos sistemas de carga/descarga e da frota se vão alterando. Estes cenários são analisados e comparados através de indicadores de desempenho.

Neste capítulo são determinados os indicadores de desempenho e os cenários acima citados, as considerações e pressupostos associados a esta simulação, é feita ainda a verificação do modelo conceptual descrito anteriormente e finalmente são apresentados e analisados os resultados obtidos.

6.1 Indicadores de desempenho

A simulação permite comparar e analisar diversos cenários com diferentes configurações dos terminais (número de cais, número e capacidade dos sistemas de carga e descarga, etc.) Esta análise é feita através de vários indicadores de desempenho (ou medidas de performance).

De acordo com (UNCTAD 1976) estes indicadores podem ser divididos em duas categorias: indicadores financeiros e indicadores operacionais. Contudo, devido à falta de conhecimento dos custos de aquisição e de manutenção dos equipamentos e infra-estruturas que fazem parte integrante de cada terminal, esta análise incide-se apenas sobre os indicadores operacionais.

Os indicadores de desempenho portuário (*PPI's – Port Performance Indicators*) utilizados para avaliar cada cenário são, de acordo com (Kakderi & Pitolakis 2011):

- **Tempo em porto (Port Time):** tempo total despendido desde a entrada do navio em porto até á sua saída, este indicador de desempenho também é conhecido por “tempo de viragem” (*TAT – Total Turnround Time*);
- **Tempo de espera por cais:** tempo médio que um navio está inactivo á espera de cais para atracar;
- **Tempo em cais (Berth Time):** tempo médio que o navio está a utilizar o cais (as manobras de aproximação ao cais e amarração e vice-versa são incluídas neste tempo);
- **Tempo de Serviço (Service Time):** tempo médio despendido em carga ou descarga;
- **Toneladas por navio-hora em porto (Tons per ship-hour in port):** total de toneladas de carga carregada ou descarregada, dividido pelo tempo despendido entre a chegada e partida do navio;
- **Factor de ocupação do posto de amarração (BOF – Berth Occupancy Factor):** tempo que o posto está a ser utilizado a dividir pelo tempo total;
- **Ocupação do espaço de armazenamento:** Valor médio e máximo da taxa de ocupação do espaço de armazenamento.

Adicionalmente a estes indicadores de desempenho o modelo de simulação também fornece outros indicadores, tais como:

- Ocupação e tempo médio de espera das eclusas;
- Utilização da frota de navios: número médio de navios utilizados.

6.2 Considerações da simulação

Assume-se que o canal navegável está dragado garantindo uma profundidade mínima de 4.20 metros entre a foz do rio e a localização do terminal fluvial.

Pelos motivos hidrológicos referidos na Secção 1.1 um ano de simulação tem a duração 327 dias e os resultados apresentados neste capítulo são os valores médios anuais obtidos ao fim de simulações de cinco anos.

Actualmente a navegação no rio Douro está restringida a um regime diurno. Foram realizadas várias experiências com o modelo de simulação para investigar o impacto que esta restrição tem no sistema de transporte. Para um horário de navegação das 7:00 às 20:00 (IND 1998) cada navio é obrigado a ficar parado uma média de 9.76 horas por cada viagem “redonda” (partida e chegada ao terminal fluvial), o que é mais de metade do tempo necessário para realizar uma viagem do terminal fluvial ao terminal marítimo ou vice-versa se não existisse esta restrição (Figura 6.2). Este facto tem um grande impacto em todo o sistema de transporte e por isso assume-se que não existe qualquer tipo de restrição ao horário de navegação no rio Douro tal como é proposto em (Peixeiro 2012).

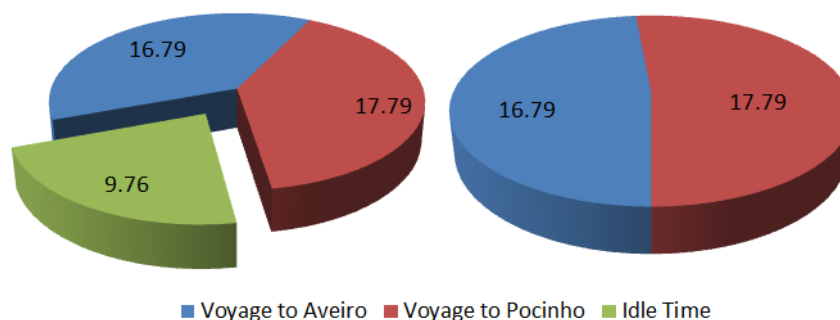


Figura 6.2: Tempo de viagem e parado, em horas, com restrição (à esquerda). Tempo de viagem, em horas, sem restrição (à direita)

Relativamente aos horários de trabalho dos terminais assume-se que estes podem trabalhar 24 horas por dia e 7 dias por semana.

6.3 Verificação e validação

Independentemente do método utilizado para desenvolver o modelo de simulação os resultados obtidos só serão legítimos se o modelo desenvolvido for uma boa representação do sistema real. Para tal é necessário avaliar, em primeiro lugar se o modelo implementa correctamente todas as considerações e pressupostos que o caracterizam e em segundo se essas mesmas considerações produzem uma boa representação do sistema real. Estes dois processos são designados como verificação e a validação, respectivamente.

A verificação deste modelo foi realizada através dos seguintes passos:

- Revisões sucessivas no código implementado;
- Verificação de *outputs* intermédios: cálculo de resultados intermédios manualmente e comparação com os obtidos através da simulação. Esta análise percorre todo o modelo de módulo em módulo analisando sempre os resultados intermédios, este tipo de análise é conhecido como *tracing* (Kleijnen 1995);
- Verificação através da animação: Análise da dinâmica de todos os componentes intervenientes no modelo. Este tipo de análise permite analisar visualmente o comportamento e a interacção de todos os componentes e identificar possíveis erros na programação do modelo.

Ainda no âmbito da verificação foi realizada uma pequena análise de sensibilidade aos principais indicadores de desempenho descritos na Secção 6.1. Esta análise foi realizada para os dois terminais contemplados no modelo de simulação, os argumentos de entrada seleccionados para testar a resposta do modelo foram o número de postos de amarração e o número e capacidade dos sistemas de carga e descarga (os restantes argumentos foram mantidos constantes). É importante perceber se o modelo responde de uma forma lógica e coerente a estas alterações pois todo o sistema de transporte será avaliado através de vários cenários de simulação, que são caracterizados precisamente pela variação destes mesmos argumentos de entrada.

Na Figura 6.3 está representada a resposta do modelo à variação da capacidade do sistema de descarga no terminal marítimo. Ao aumentar a capacidade do sistema de descarga a duração da operação de descarga será obviamente menor, então será de esperar que o tempo de serviço decresça e que o tempo de espera siga a mesma tendência. Por outro lado se a operação de descarga se processa de uma forma mais rápida então a eficiência do terminal será maior o que se reflectirá no indicador toneladas por navio-hora em porto. É exactamente este tipo de comportamento que está representado na Figura 6.3.

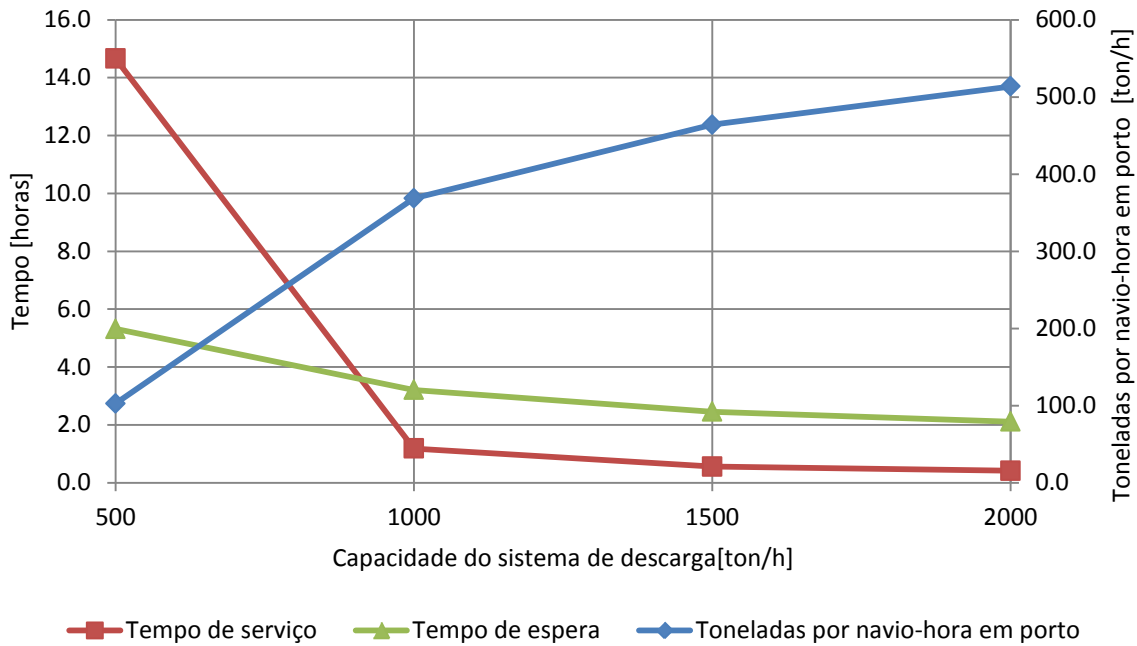


Figura 6.3: Resposta do modelo á variação da capacidade do sistema de descarga no terminal marítimo

Seguindo o mesmo tipo de análise para o número de postos de amarração e respectivos sistemas de descarga, será de esperar que com um aumento do número de postos o tempo de espera decresça uma vez que existem mais postos disponíveis. Na Figura 6.4 está representada a resposta do modelo á variação do número de postos de amarração e respectivos sistemas de descarga.

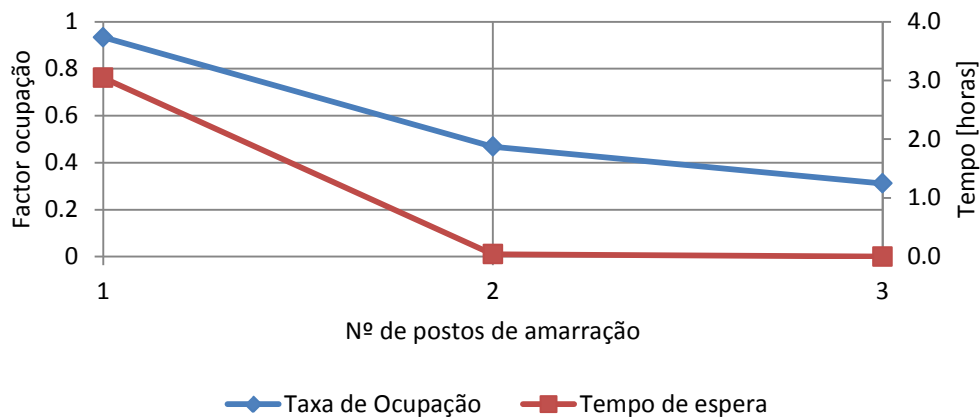


Figura 6.4: Resposta do modelo á variação do número de postos de amarração

O objectivo da validação é demonstrar que o modelo desenvolvido consegue reproduzir o comportamento do sistema real com um grau de semelhança que seja satisfatório. A forma mais fidedigna de validar um modelo é a comparação dos resultados obtidos com dados referentes ao sistema real, contudo, no caso deste estudo o sistema não existe, tornando impossível a validação do modelo através de dados reais.

6.4 Cenários

No total foram criados sete cenários. Nos primeiros seis é considerada uma produção anual de minério de ferro de cerca de três milhões de toneladas, este volume de produção é baseada em declarações feitas em (Público 2012). No sétimo cenário é avaliada a escalabilidade da solução numa condição na qual a produção anual de minério aumenta para cerca de seis milhões de toneladas. O número de navios na frota foi estimado através experiências com o modelo de simulação.

Os parâmetros variáveis entre todos os cenários são o número de navios rio-mar e as configurações de cada terminal, que são caracterizadas pelo número de postos de amarração e pelo número e capacidade dos sistemas de carga ou descarga.

O cenário 1 deve ser tomado como o cenário “base”, onde cada terminal é constituído apenas por um único posto de amarração e um único sistema de carga ou descarga. Os cenários 2 e 3 representam uma variação na configuração do terminal de Aveiro e os cenários 4 e 5 no terminal do Pocinho. No sexto cenário é implementada uma configuração diferente para ambos os terminais, onde cada terminal é constituído por dois postos de amarração mas apenas por um sistema de carga ou descarga.

Tabela 6.1: Cenários de simulação

Cenário	Terminal fluvial Pocinho				Terminal marítimo Aveiro			Navio Handysize
	Nº de navios na frota	Nº Postos de Amarração	Nº de Ship Loaders por posto	Capacidade [t/h]	Nº Postos de Amarração	Nº de Ship Unloaders por posto	Capacidade [t/h]	Tempo entre chegadas [dias]
1	10	1	1	2000	1	1	1000	2
2	10	1	1	2000	2	1	500	2
3	10	1	1	2000	2	1	1000	2
4	10	2	1	1000	1	1	1000	2
5	10	2	1	2000	1	1	1000	2
6	10	2	1 para os 2 postos	2000	2	1 para os 2 postos	1000	2
7	22	2	1	2000	2	1	1000	2*

*Para navios *Handymax* (ver secção 6.5)

6.5 Análise dos Resultados

Tal como já foi referido os resultados obtidos para os diferentes cenários de simulação (Tabela 6.1) são avaliados e comparados através de indicadores de desempenho (PPIs).

Tempo em porto, toneladas por navio-hora em porto e tempo médio de espera

A primeira parte desta análise concentrar-se-á nos seguintes indicadores de desempenho: Tempo em porto, toneladas por navio-hora em porto e tempo de espera. Estes indicadores estão representados nas Figuras 6.6, 6.7 e 6.8, respectivamente.

O cenário número 1 é considerado como o cenário “base” e serve de base comum de comparação entre todos os cenários. No cenário 1 o tempo em porto é de 3.7 horas para o terminal fluvial e 6.24 horas para o terminal marítimo. A discrepância entre estes dois valores deriva em grande parte do facto de a operação de descarga ser mais lenta do que a operação de carga devido às diferentes capacidades de operação dos dois sistemas. Para além do tempo em porto, este facto tem também impacto no tempo de espera e nas toneladas por navio-hora em porto.

No cenário 2 o terminal marítimo é constituído por dois postos de amarração e dois sistemas de descarga com capacidades inferiores á considerada no cenário 1. Analisando o tempo em porto e o número de toneladas por navio-hora em porto, o desempenho desta nova configuração é inferior ao obtido no cenário 1. A principal vantagem desta configuração é a redução do tempo de espera, contudo ao reduzir a capacidade dos sistemas de descarga a operação de descarga torna-se mais lenta originando um tempo de porto mais elevado, apesar da redução no tempo de espera.

Mantendo esta configuração para o terminal marítimo mas aumentando a capacidade dos sistemas de descarga, o que corresponde ao cenário 3, a melhoria na performance do terminal é visível. O tempo em porto reduz-se, o número de toneladas por navio-hora em porto aumenta e o tempo de espera é inferior aos tempos obtidos nos cenários 1 e 2.

Seguindo o mesmo tipo de análise para o terminal fluvial, o que corresponde à análise dos cenários 4 e 5, o mesmo tipo de conclusões podem ser retiradas. Adicionar mais um posto de amarração e reduzir a capacidade dos sistemas de carga revela uma performance inferior á obtida no cenário 1 (redução do tempo de espera e aumento do tempo em porto e das toneladas por navio-hora). Por outro lado adicionar mais um posto de amarração e manter as capacidades dos sistemas de carga iguais á do cenário 1 representa uma melhoria significativa na performance do terminal fluvial.

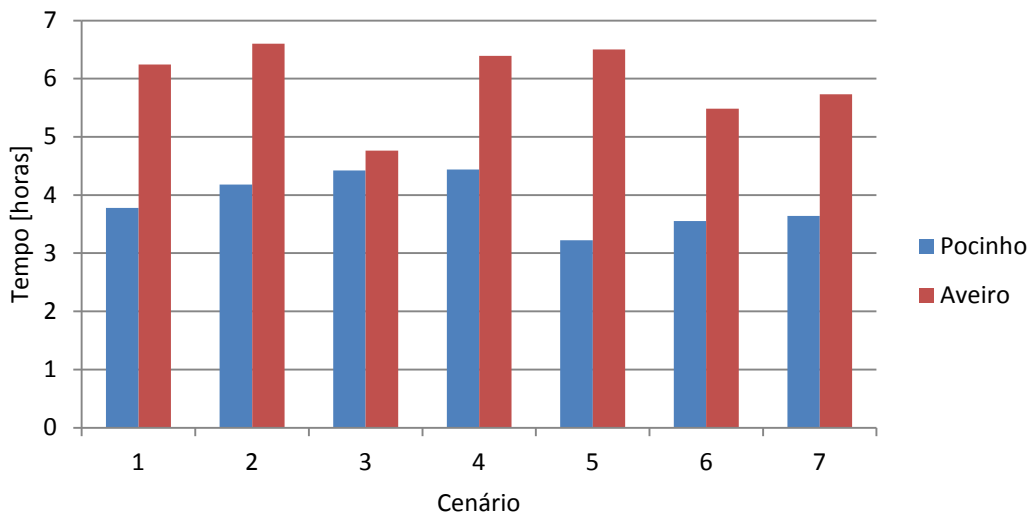


Figura 6.5: Tempo em Porto

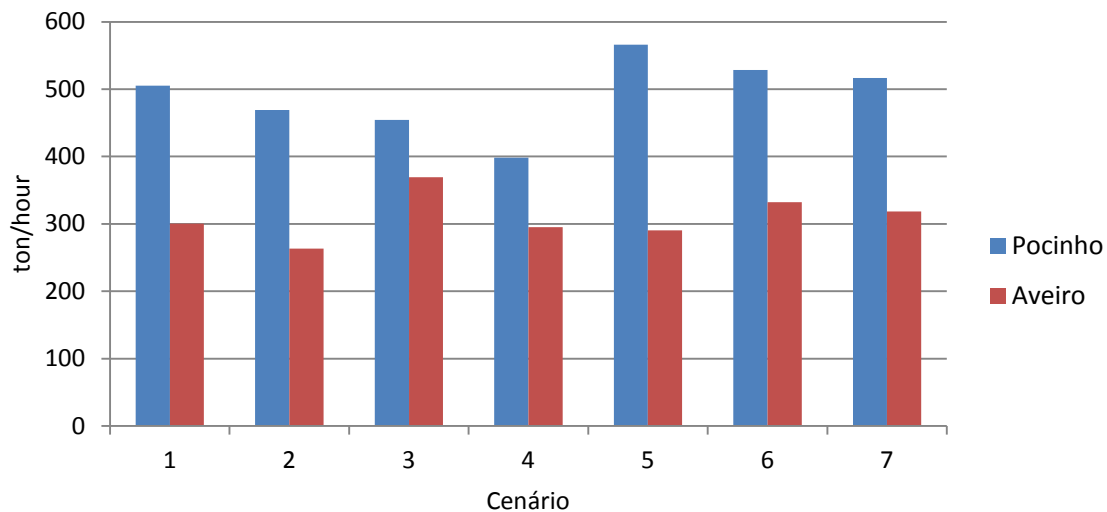


Figura 6.6: Toneladas por navio-hora em porto

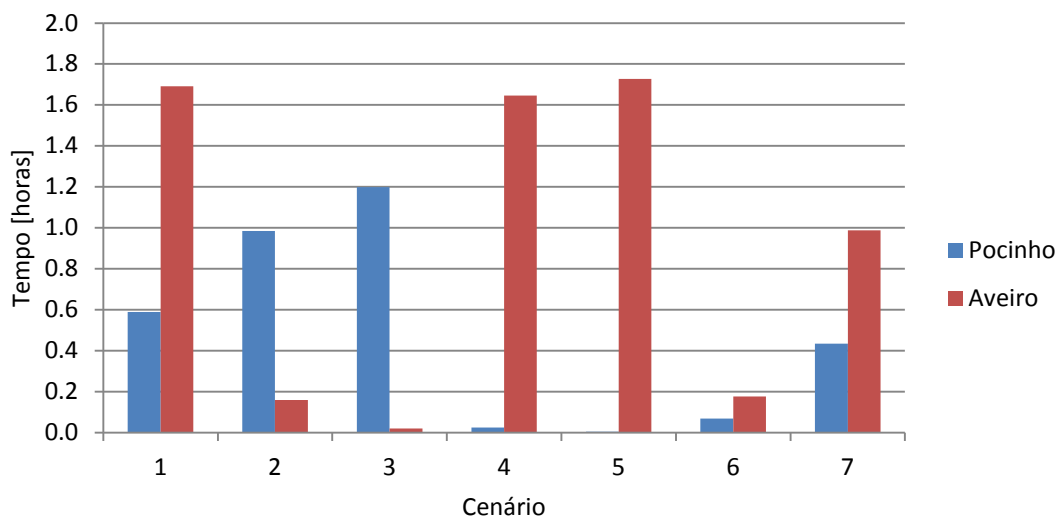


Figura 6.7: Tempo de espera por cais

O cenário 6 representa um tipo de configuração ligeiramente diferente. Neste caso cada terminal é constituído por dois postos de amarração e apenas por um sistema de carga ou descarga. Com esta configuração o tempo em porto e o número de toneladas por navio-hora em porto obtidos são idênticos aos obtidos no cenário 1, contudo o tempo de espera reduz-se bastante para os dois terminais.

Factor de ocupação (BOF)

Numa situação ideal o factor de ocupação dos postos de amarração deveria ser 100% por forma a utilizar e rentabilizar este recurso ao máximo. Contudo devido á inconstância dos horários de chegada dos navios, é impossível ter um factor de utilização de 100% sem que se gere uma fila e um tempo de espera por posto de amarração associado. Por outro lado uma situação em que um navio nunca tenha que esperar por um posto de amarração implica um factor de ocupação muito baixo e consequentemente um subaproveitamento deste recurso. É necessário portanto chegar a um compromisso entre estes dois extremos por forma a equilibrar a relação entre o tempo de espera do navio e o grau de utilização do posto de amarração.

Pode-se fazer uma estimativa da relação entre a ocupação do posto de amarração e o tempo de espera do navio através da teoria das filas de espera. Em (UNCTAD 1985) é utilizado um modelo de fila para estimar esta relação e o modelo de fila utilizado é o E2/E2/n. Esta notação é conhecida como a notação de *Kendall*, a primeira letra é referente á distribuição utilizada para o tempo entre chegadas (E2 é uma distribuição de Erlang 2), a segunda é referente à distribuição do tempo de serviço e n é o número de postos de amarração.

Na Tabela 6.2 estão representados os valores de ocupação recomendados, obtidos com base neste modelo de filas de espera, considerando uma relação entre o custo do navio e o custo do posto de amarração de 4 para 1 (Memos 2000). Valores de ocupação mais elevados são indicadores de congestão do sistema.

Tabela 6.2: Factores de ocupação recomendados em (UNCTAD 1985) e em (Memos 2000)

Número de postos de amarração	Factor de ocupação [%]
1	40-50
2	50-60
3	53-65
4	56-65
5	60-70

No cenário 1 o factor de ocupação no terminal marítimo está acima dos valores recomendados, o que pode indicar um congestionamento no terminal. No cenário 2 com a adição de mais um posto de amarração ao terminal marítimo o factor de ocupação reduz-se para os valores recomendados acompanhado de uma redução no tempo de espera do navio. No cenário 3 o factor de ocupação fica ligeiramente abaixo do recomendado e o tempo de espera do navio torna-se praticamente inexistente, o que revela um sobredimensionamento do número de postos de amarração. O mesmo tipo de conclusões podem ser retiradas para o terminal fluvial.

No cenário 6 o factor de ocupação no terminal marítimo está dentro dos valores recomendados e no caso do terminal fluvial está ligeiramente abaixo. É importante notar que neste cenário o factor de ocupação dos sistemas de carga/descarga é mais elevado do que o do posto de amarração, isto acontece porque em cada terminal só existe um sistema de carga/descarga que tem que servir dois postos de amarração. Este tipo de configuração tem portanto um tempo de espera adicional que acontece quando um navio já está no posto, atracado, mas tem que esperar pela disponibilidade do sistema de carga/descarga. Este tempo adicional está integrado no PPI tempo em porto.

Na Figura 6.8 estão apresentados os factores de ocupação dos postos de amarração e dos sistemas de carga e descarga.

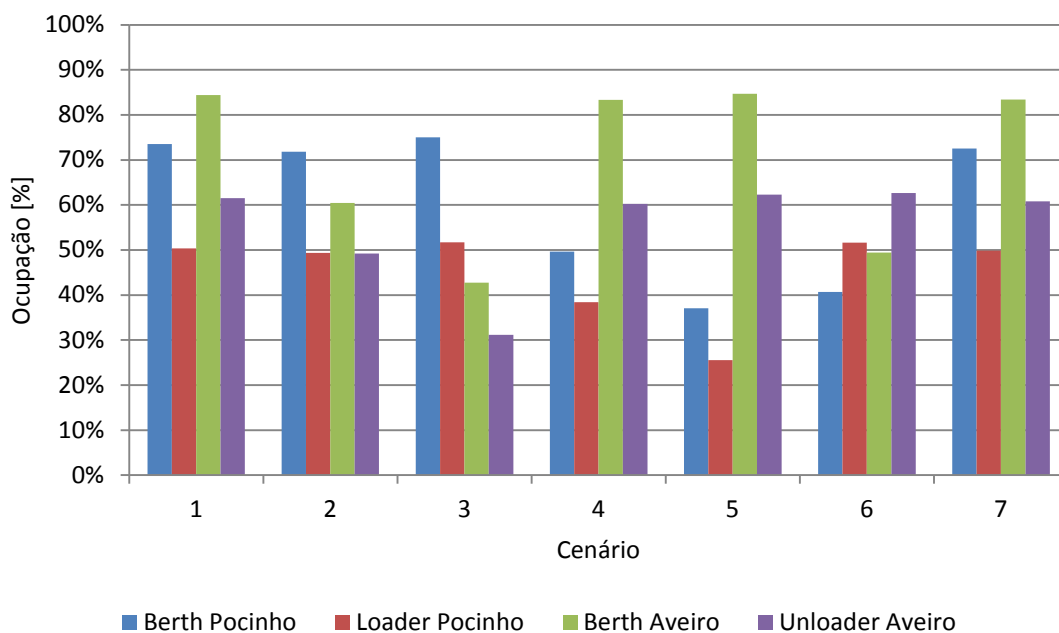


Figura 6.8: Factor de ocupação dos postos de amarração e dos sistemas carga/descarga

Ocupação do espaço de armazenamento

A ocupação do espaço de armazenamento é determinada considerando que os terminais fluvial e marítimo têm áreas de armazenamento de 115,000 m² e de 151,000 m², respectivamente (ver Secções 3.2 e 3.3).

O terminal fluvial tem uma ocupação do espaço de armazenamento muito baixa o que pode indicar que o fluxo de minério de ferro, proveniente da mina está, de certo modo, em sincronia com o “fluxo de transporte” dos navios rio-mar. Considerando todos os diferentes cenários analisados neste estudo é possível concluir que a área de armazenamento proposta para o terminal fluvial está sobredimensionada e pode ser reduzida.

No terminal marítimo a ocupação do espaço de armazenamento é um pouco mais elevada alcançando um valor máximo de 65%. A ocupação deste espaço de armazenamento está intimamente relacionada com o tempo entre chegadas dos navios *handysize*. Para todos os cenários foi considerado um tempo entre chegadas de 2 dias, contudo, se este valor aumentar para 3 ou 4 dias a ocupação atinge o valor máximo forçando os navios rio-mar a esperar pela disponibilização de espaço de carga. Pode-se então concluir que o espaço de armazenamento no terminal marítimo pode actuar como um ponto de estrangulamento no sistema de transporte.

Para além do congestionamento criado pela sobrelotação do espaço de armazenamento é importante lembrar que o terminal de Aveiro é utilizado por outros navios. De acordo com (IPTM 2012) o terminal de graneis do porto de Aveiro movimentou cerca de 780,000 toneladas de carga no ano 2012. Por este motivo é importante considerar uma pequena margem de área de armazenamento não ocupada.

Na Tabela 6.3 estão representados os valores da percentagem de ocupação obtidos pelo modelo de simulação.

Tabela 6.3: Ocupação do espaço de armazenamento dos terminais

Cenários	Terminal Fluvial		Terminal Marítimo	
	Média [%]	Máximo [%]	Média [%]	Máximo [%]
1	24.47	48.05	21.16	51.93
2	27.88	53.88	17.11	40.49
3	17.95	35.18	26.76	61.54
4	29.55	58.30	15.55	38.66
5	21.11	40.79	31.69	63.58
6	20.65	36.37	27.19	65.05
7	2.74	8.55	7.90	26.51

Aumento na produção anual de minério

No cenário 7 é considerado um aumento na produção anual de minério de ferro com o objectivo de analisar a escalabilidade da solução do sistema de transporte. De forma a conseguir comportar este novo fluxo anual de carga a frota de navios rio-mar teve que ser aumentada e o tempo entre chegadas dos navios *handysize* deve que ser reduzido para 1 dia, caso contrário o espaço de armazenamento atingiria o limite de ocupação estrangulando todo o sistema de transporte.

A redução do tempo entre chegadas para 1 dia implica uma frota muito grande de navios *handysize*. De acordo com a Administração do porto de Aveiro (APA 2013a) as limitações de acesso ao terminal serão alteradas permitindo assim a entrada de navios de maior porte (com um comprimento máximo de 200 metros e calado de 11 metros). Com estas novas limitações é possível considerar a entrada de navios *handymax* no terminal marítimo, em vez dos navios *handysize* anteriormente considerados, permitindo assim aumentar o tempo entre chegadas para 2 dias.

Os resultados respeitantes ao cenário 7 consideram estas novas características do terminal marítimo. No modelo de simulação o DWT destes navios é gerado tal como na secção 5.2.3 mas com uma distribuição normal diferente, com uma média de 38,700 toneladas de DWT e com um desvio padrão de 5,740 (Stopford 2009).

Utilização das eclusas

As eclusas ao longo da via fluvial não são utilizadas exclusivamente pelos navios graneleiros rio-mar mas também pelo tráfego fluvial já existente. Considerando o tráfego fluvial descrito na secção 5.1.4 o sistema de transporte de minério de ferro representa um aumento de 30% na utilização das eclusas (Figura 6.9).

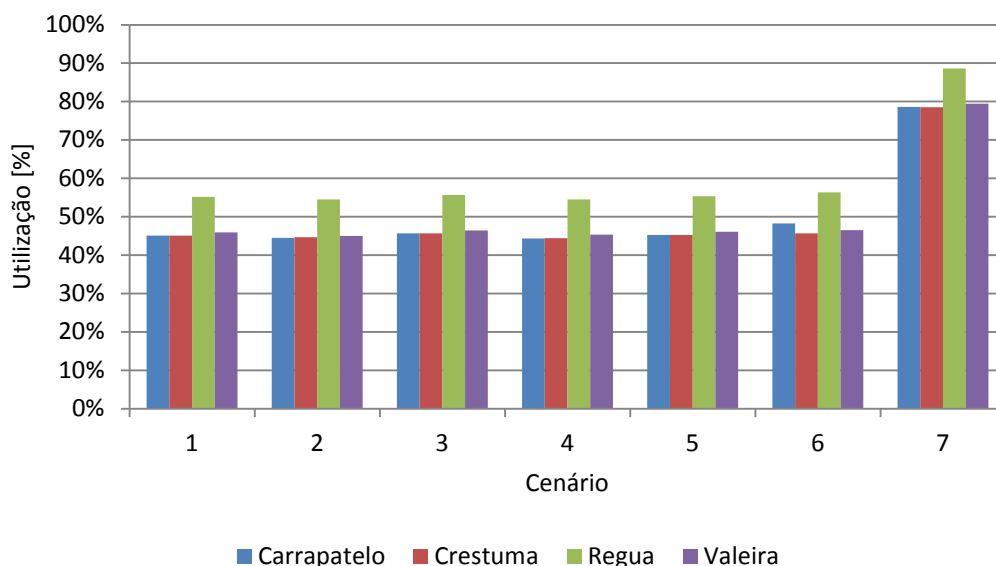


Figura 6.9: Percentagem de utilização das eclusas

No cenário 7 devido ao aumento da frota de navios rio-mar de 10 para 22 navios a percentagem de utilização das eclusas aumenta drasticamente para os 80%-88%. Esta elevada percentagem de utilização tem impacto no tempo médio de espera nas eclusas, como se pode verificar na Figura 6.10 e pode ser entendida como um sinal de um futuro ponto de estrangulamento no sistema de transporte. Uma possível solução para este problema será a modernização das eclusas para que toda a operação se processe mais rapidamente (actualmente tem uma duração de 45 minutos), tal como é proposto em (Mota 2012), de forma a reduzir o tempo da operação da eclusa e assim melhorar o desempenho e reduzir o tempo de espera. Lembra-se que no cenário 7 é considerada uma duplicação do fluxo anual de minério ferro.

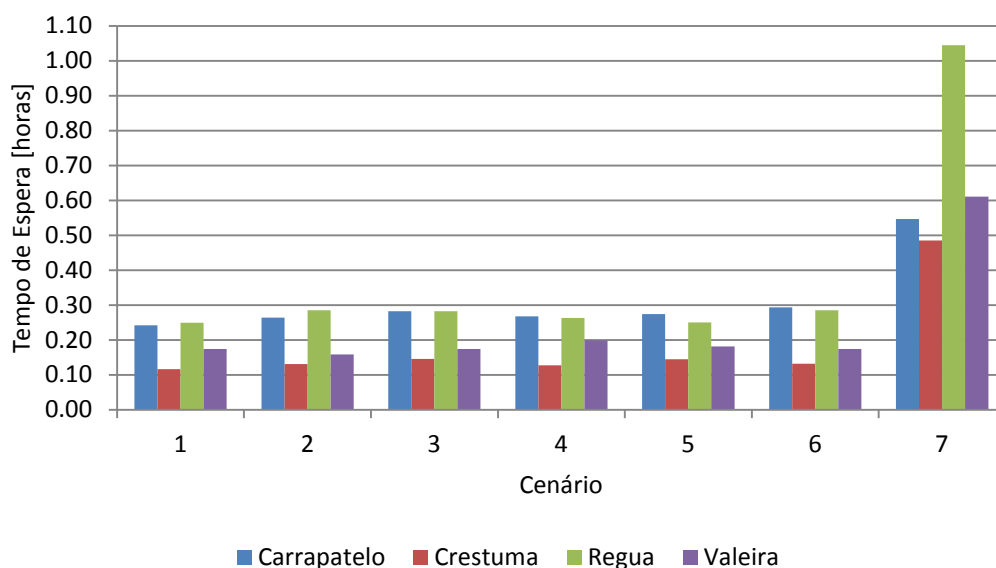


Figura 6.10: Tempo de espera nas eclusas

7. Conclusões

O objectivo desta dissertação era analisar a viabilidade do transporte de minério de ferro através de navios graneleiros rio-mar, desde um terminal fluvial no rio Douro até ao terminal marítimo em Aveiro. Para tal dividiu-se este problema de transporte em duas partes, uma referente ao dimensionamento inicial destes navios, onde foram determinadas as características principais óptimas destes navios através de um método de optimização e outra que engloba e analisa todo o problema/sistema de transporte (navios, rota e terminais) através de métodos de simulação.

Navio graneleiro rio-mar

A análise do dimensionamento inicial dos navios rio-mar para este problema de transporte foi feita com base no modelo de síntese do navio desenvolvido em (Ventura, 2013). A este modelo foram acrescentadas novos componentes que incluem factores relacionados com a navegação em águas pouco profundas (correção na resistência do navio e efeito de *squat*), determinação dos índices EEDI e emissões dos motores. Foi desenvolvido um modelo de viagem que permite considerar para os vários segmentos de viagem, a utilização de diferentes tipos de combustível, diferentes condições de operação do navio (carregado ou em lastro, por exemplo) e as diferentes características das vias de navegação (profundidade, zona de mar, ou de canal, largura do canal, etc.)

Neste estudo as dimensões principais do casco do navio estão bastante constrangidas devido às limitações físicas existentes no canal de navegação fluvial, que advêm não só da profundidade mínima mas também das características das eclusas e da existência de pontes. A diferenciação das velocidades do navio para as diferentes condições de operação e da utilização de diferentes tipos de combustível é muito importante para o estudo.

Foi discutido e apresentado um processo de optimização das características do navio que considera o modelo de síntese do navio SSM, o modelo de viagem e as diferentes condições de operação.

O modelo de síntese SSM e a optimização foram corridos para dois cenários diferentes onde se consideraram duas alternativas de motores/combustível, uma versão a MDO e uma outra a LNG. As dimensões obtidas para estes dois cenários são semelhantes e até mesmo as velocidades de operação, para as diferentes condições de carregamento, estão bastante próximas uma da outra. Contudo, o baixo custo unitário de transporte RFR e emissões de CO₂, reflectidas no índice EEDI, em conjunto com o baixo tempo de retorno necessário para cobrir a diferença no investimento, tornam a alternativa a LNG a melhor solução (Tabela 7.1).

Tabela 7.1: Características do navio rio-mar LNG

Loa	[m]	83.00
Lpp	[m]	80.50
Boca	[m]	11.00
Pontal	[m]	4.76
Calado	[m]	3.70
Cb	[--]	0.85
Deadweight	[ton]	1,910
Cargo Deadweight	[ton]	1,775
Velocidade de Serviço (carregado)	[nós]	10.04
Velocidade de Serviço (em lastro)	[nós]	10.16

Para trabalhos de investigação futuros o modelo de viagem pode ser mais detalhado com as localizações e extensão das zonas do canal de navegação (segmentos de viagem) onde a profundidade é mínima. Nestas zonas a velocidade do navio terá que ser reduzida para um valor que produza uma UKC (*Under Keel Clearance*) aceitável. Para além disso o estado de mar no segmento

de viagem marítima poderá ser tido em consideração e convertido em resistência adicional no navio, em vez do valor de 15% de margem tipicamente utilizado. Algoritmos de optimização multi-objectivo também poderão ser utilizados para determinar os resultados com a conjugação de outros objectivos tais como a maximização da eficiência energética do navio, através da minimização do índice EEDI.

Sistema de transporte

Para a análise do sistema de transporte foi desenvolvido um modelo de simulação e foi analisado um conjunto de cenários viáveis através de simulações com durações de cinco anos. As características dos navios rio-mar apresentadas na Tabela 7.1 foram implementadas neste modelo.

Assumiu-se que o canal de navegação fluvial foi dragado de forma a assegurar uma profundidade mínima de 4.20 metros e que os terminais envolvidos no sistema de transporte não têm nenhuma restrição referente ao horário de trabalho, podendo trabalhar durante 24 sobre 24 horas. A restrição que existe actualmente no horário de navegação do canal fluvial foi testada e revelou um impacto considerável no sistema de transporte tendo-se prosseguido a análise sem esta restrição.

A existência do tráfego de outros navios na via navegável fluvial foi implementada no modelo de simulação. Neste aspecto considerou-se apenas o tráfego dos navios ligados á actividade marítimo turística (cruzeiros). Esta actividade está em franca expansão naquele local tornando-se importante analisar a forma como se relaciona com o sistema de transporte em estudo.

Entre todos os cenários existem diferenças assinaláveis nos indicadores de desempenho PPIs, contudo, as variações por si não são grandes. Tenha-se como exemplo a adição de mais um posto de amarração no terminal marítimo, esta acção reduz apenas uma hora no tempo em porto, o que pode não ser uma redução suficientemente grande para justificar a implementação de este posto adicional. Porém, tal como já foi referido, as diferenças entre os vários PPIs são assinaláveis sendo possível analisar o problema desta forma e retirar algumas conclusões do ponto de vista operacional.

Considerando todas as considerações que foram feitas, cenários de simulação e as características que foram obtidas para o navio, é necessária uma frota de 10 navios rio-mar para garantir o transporte da cota anual estimada de três milhões de toneladas minério de ferro. A configuração do terminal com dois postos de amarração e apenas um sistema de manuseamento de carga, para os dois terminais, aparenta ser a melhor solução. Esta configuração apresenta uma boa relação entre o desempenho do sistema de transporte e o número de recursos utilizados. Outra vantagem associada a esta configuração é sua escalabilidade, isto é, a capacidade de suportar um possível aumento do fluxo anual de minério de ferro. Sendo necessário adicionar apenas mais um sistema de manuseamento de carga em cada terminal e aumentar o número de navios na frota.

Relativamente á capacidade máxima de escoamento deste sistema de transporte pode-se concluir que o volume de 6 milhões de toneladas de minério por ano está muito próximo do limite de capacidade. Para este volume de carga a taxa de utilização das eclusas é bastante elevada congestionando todo o sistema.

Foram apresentados dois possíveis arranjos gerais para ambos os terminais. Estes arranjos devem ser vistos como um *template* sobre o qual podem ser aplicadas todas as configurações consideradas nos cenários de simulação. No caso do terminal fluvial é ainda sugerida uma localização, uma vez que este ainda não existe.

Para trabalhos de investigação futuros sobre esta matéria sugere-se a adição de uma avaliação de carácter económico quer para o navio, quer para os terminais, nomeadamente os custos associados á aquisição dos diferentes sistemas de manuseamento de carga, construção de novos postos de

amarração. Esta análise cariz económico em conjunto com os aspectos operacionais, permitirá retirar conclusões mais robustas na decisão de qual é a melhor solução para este problema de transporte.

Outro aspecto que deve ser considerado em trabalhos futuros é a morfologia da via fluvial, localizando as zonas onde o rio é mais estreito ou tem menos profundidade. Este tipo de informação permitirá adicionar novas restrições ao modelo de simulação, nomeadamente, em relação á passagem e cruzamento entre navios ao longo do rio e também em relação á velocidade de navegação nessas zonas.

Bibliografia

- Ambrosino, D. & Tànfani, E., 2010. A discrete event simulation model for analysis of critical factors in the expansion plan of a marine container terminal. *Proceedings 23rd European Conference on Modelling and Simulation*, 6(Cd).
- Anon, 2013. LNG Bunker Fuel: Price Lends Support To Long-Term Development | Business Monitor International. Available at: <http://www.businessmonitor.com> [Accessed July 22, 2014].
- APA, 2014. *Normas de Segurança Marítima e Portuária do Porto de Aveiro - Administração do Porto de Aveiro, S.A.*,
- APA, 2013a. Prolongamento do Molhe Norte em 200 m. Available at: <http://ww2.portodeaveiro.pt/sartigo/index.php?x=5945> [Accessed July 19, 2014].
- APA, 2013b. Regulamento de tarifas. , (Versão 3).
- Artana, K.B. et al., 2002. The Determination of Optimum Ship ' s Design and Power Prediction Using Spreadsheet Model. *Journal of the JIME*, 37(6).
- Assumma, V. & Vitetta, A., 2006. Microsimulation models in a Ro-Ro High Speed Services intermodal container terminal: ordinary and perturbed conditions. In *European Transport Conference*.
- Aveiro, P. de, 2012. *Agenda navegar*,
- Bertsimas, D. & Tsitsiklis, J., 1993. Simulated annealing. *Statistical Science*, 8(1), pp.10 – 15.
- Bichou, K., Bell, M. & Evans, A., 2013. *Risk Management in Port Operations, Logistics and Supply Chain Security*, Taylor & Francis.
- Briggs, M.J. & Vantorre, M., 2009. *Handbook of Coastal and Ocean Engineering* 1st ed. Y. C. Kim, ed., World Scientific.
- Carlton, J., 1994. Propeller performance characteristics. In *Marine Propellers and Propulsion*. Elsevier Ltd, pp. 103–106.
- Case, L.S. & Lave, L.B., 1971. Optimal Capacity of Port Loading Facilities. *Water Resource Research*, 7(5), pp.1323–1327.
- Chen, S., Frouws, K. & Van de Voorde, E., 2011. Operation-Based Optimization of Ship Design for Dry Bulk Vessels. *Maritime Economics & Logistics*, 13(2), pp.190–212.
- Cortés, P. et al., 2007. Simulation of Freight Traffic in The Seville Inland Port. , (1998), pp.1–21.
- DNV, 2011. Greener Shipping in North America. *Press Release*. Available at: <http://viewer.zmags.com/publication/4ae38aec#/4ae38aec/12> [Accessed December 26, 2014].
- Dundović, C. & Zenzerovic, Z., 2000. An Optimal Capacity Planning Model for General Cargo Seaport. *PROMET- Traffic & Transportation*, 12(5-6), pp.217–221.
- Dvorak, R.E., 2009. Engineering and Economic Implications of Ice - Classed Containers
- EC, 2006. Directiva 2006/87/EC do Parlamento Europeu e do Conselho. In pp. 1–383.

- Egorov, G. V, 2014. Basic designing principles of dry-cargo vessels and tankers constructions of river-sea going type. In C. Guedes Soares & P. F. López, eds. *Developments in Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources*. Taylor & Francis, pp. 453–463.
- Egorov, G. V, 2007. *Design and Construction of Coasters and Sea-River Vessels*, St. Petersburg: (in russian) Sudostroyeniye Publ.
- EI-Naggar, M.E., 2010. Application of queuing theory to the container terminal at Alexandria seaport. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 1, pp.77–85.
- Ergin, A. & Yalciner, A., 1991. Computer Simulation Model for optimum seaport planning. In *System Dynamics Conference*. pp. 189–198.
- Fearnleys (2013), “Fearnleys Weekly Reports”, Fearnresearch (www.fearnleys.com).
- Gallager, R.G., 2014. *Stochastic Processes: Theory for Applications*, Cambridge University Press.
- Garrod, P. & Miklius, W., 1985. The Optimal Ship Size. *Journal of Transport Economics and Policy*, 19(1), pp.83–90.
- Gottfried, B.S. & Weisman, J., 1973. The Method of Hooke and Jeeves. In *Introduction to Optimization Theory*. Prentice Hall, pp. 227–229.
- Gumpel, S., 2012. LNG Fuel Systems : Certification & Approval. , (February).
- Hekkenberg, R., 2013. *Inland Ships for Efficient Transport Chains*. Technical University of Delft.
- Holtrop, J. & Mennen, G.G., 1982. An approximate power prediction method. *International Shipbuilding Progress*.
- IACS (2012), “Common Structural Rules for Bulk Carriers”, Consolidated edition, International Association of Class Societies.
- IMO (2005), “International Convention on Load Lines 1966 and Protocol of 1988, as amended in 2003”, Consolidated 2005 Edition, International Maritime Organisation.
- IMO (2009), “Interim Guidelines on Safety for Natural Gas-Fuelled Engine Installations in Ships”, Resolution MSC.285(86).
- IMO (2012a), “International Convention for the Safety of Life at Sea”, Consolidated edition, International Maritime Organisation.
- IMO (2012b), “2012 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships”, Resolution MEPC.212(63).
- IMO (2012c), “Amendments to the 2012 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships”, Resolution MEPC.224(64).
- IND Instituto de Navegabilidade do Douro, 1998. Regulamento da Via Navegável do Douro.
- Invensys, 2013. LNG Bunker Fuel : Price Lends Support To Long-Term Development.
- IPTM, 2013. *Distâncias e tempos de viagem entre os principais cais , portos e eclusas - Instituto Portuário e dos Transportes Marítimos*,
- IPTM, 2012. Movimento de Mercadorias nos Principais Portos do Continente. , p.2012.

- Jansson, J.O. & Shneerson, D., 1982. The Optimal Ship Size. *Journal of Transport Economics and Policy*, pp.217–238.
- Jiang, T., 2001. A New Method For Resistance And Propulsion Prediction Of Ship Performance In Shallow Water. *Practical design of ships and other floating structures*, 1.
- Kakderi, K. & Pitilakis, K., 2011. *Definition of system components and the formulation of system functions to evaluate the performance of ports*, Aristotle University of Thessaloniki.
- Kendall, P., 1972. The Theory of Optimal Ship Size. *Journal of Transport Economics and Policy*, pp.128–149.
- Kia, M., Shayan, E. & Ghotb, F., 2002. Investigation of port capacity under a new approach by computer simulation. *Computers & Industrial Engineering*, 42(2-4), pp.533–540.
- Kleijnen, J.P.C., 1995. Verification and validation of simulation models. , (mimic).
- Kleinheerenbrink, A.J.A., 2012. *A Design Tool for Dry Bulk Terminals*. Delft University of Technology.
- Kristensen, H.O. & Lützen, M., 2012. Determination of Regression Formulas for Main Dimensions of Tankers and Bulk Carriers based on IHS Fairplay data. , (2010).
- Lasdon, L.S. et al., 1978. Design and Testing of a Generalized Reduced Gradient Code for Nonlinear Programming. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 4(1), pp.34–50. Available at: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=355769.355773>.
- Law, A.M. & Kelton, W.D., 2000. *Simulation Modelling and Analysis* 3rd ed., McGraw-Hill.
- Lewis, E. V., 1988. *Principles of Naval Architecture Vol.2 Resistance, Propulsion and Vibration*,
- Ligteringen, H. & Velsink, H., 2012. *Ports and Terminals* 1st ed., VSSD.
- Lodewijks, G., Schott, D.L. & Ottjes, J.A., 2007. Modern Dry Bulk Terminal Design. *International Materials Handling Conference*, pp.1–18.
- Martí, R., 2003. Multi-Start Methods. In F. W. Glover & G. A. Kochenberger, eds. *Handbook of MetaHeuristics*. Kluwer Academic Publishers, pp. 255–368.
- Memos, C.D., 2000. Port planning. In N. T. U. of Athens & Zografos, eds. pp. 7–64.
- Merino da Silva, D & Ventura, M. (2014), Analysis of river/sea transportation of ore bulk using simulation process, *Maritime Technology and Engineering*, Carlos Guedes Soares & T.A. Santos (eds), Taylor & Francis Group, London.
- Michalski, J., 2005. A Parametric Method for Preliminary Determining of Mass Characteristics on Inland Navigation Ships. *Polish Maritime Research*, 12(3 (45)).
- Molland, A.F., 2008. *Maritime Engineering Reference Book*, Elsevier Ltd.
- Mota, Ó., 2012. Navegação no Rio Douro e Transporte Fluvial do Minério de Moncorvo. In *Jornadas Secção de Transportes da Sociedade de Geografia de Lisboa*. pp. 1–8.
- no Douro, 2013. no Douro - Portal de Reservas. Available at: <http://www.nodouro.pt/>.
- Özgün, O. & Barlas, Y., 2009. Discrete vs . Continuous Simulation. In *27th International Conference of The System Dynamics Society*. pp. 1–22.

- Peixeiro, L.C., 2012. Navegação no rio Douro Infra-estruturas e canal. In *Jornadas Secção de Transportes da Sociedade de Geografia de Lisboa*.
- Público, 2012. MTI admite investir 600 milhões na extracção de ferro em Moncorvo -. Available at: <https://www.publico.pt/economia/noticia/mti-admite-investir-600-milhoes-na-extraccao-de-ferro-em-moncorvo-1577006> [Accessed March 24, 2014].
- Radmilovi, Z. & Mara, V., 2011. Role of Danube inland navigation in Europe. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 628.
- Rao, S.S., 2009. *Engineering Optimization Theory and Practice* 4th ed., John Wiley & Sons, Inc.
- Ray, T., Gokarn, R.P. & Sha, O.P., 1995. A global optimization model for ship design. *Computers in Industry*, 26(2), pp.175–192. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/016636159500003M>.
- Reed, M.R., 1976. *Ship Synthesis Model for Naval Surface Ships*. Massachusetts Institute of Technology.
- Rockwell Automation, 2010. *Arena Basic: User's Guide*,
- Rotteveel, E. & Quadvlieg, F., 2013. *Investigation of inland ship resistance , propulsion and manoeuvring using literature study and potential flow calculations*. Delft University of Technology.
- Saha, G.K. & Sarker, A.K., 2010. Optimization of Ship Hull Parameter of Inland Vessel with Respect to Regression Based Resistance Analysis. , (December), pp.471–476.
- Schmidt, J.. & Taylor, R., 1970. *Simulation and analysis of Industrila System* 1st ed., R. D. Irwin.
- Schneekluth, H. & Bertram, V., 1987. *Ship Design for Efficiency and Economy* 2nd ed., Butterworth-Heinemann.
- Senthil Prakash, M.. & Chandra, B., 2013. Numerical Estimation of Shallow Water Resistance of a River-Sea Ship using CFD. *INternational Journal of Computer Applications*, 71(5), pp.33–40.
- Sheikholeslami, A., Ilati, G. & Hassannayebi, E., 2013. A Simulation Model for the Problem in Integrated Berth Allocation and Quay Crane Assignment. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 3(8), pp.343–354.
- Socarpor, 2013. Socarpor - Aveiro. Available at: <http://www.socarpor-aveiro.pt/gca/?id=36>.
- Stopford, M., 2009. *Maritime Economics* 3rd ed., Taylor & Francis.
- UNCTAD, 1985. *Port development - A handbook for planners in developing countries* 2nd ed.,
- UNCTAD, 1976. *Port Performance Indicators*.
- UNECE - ITC, U.N.E.C. (United Nations Economic Commission for Europe), 1996. White Paper on Trends in and Developmente of Inland Navigation and its Infrastructure.
- Van Vianen, T.A., Lodewijks, G. & Ottjes, J.A., 2011. Dry Bulk Terminals Characteristics. *Bulk Solids Handling*.
- Velsink, H., 1994. *Ports and Terminals - Planning and Functional Design*, Delft University of Technology.

Ventura, Manuel (2013), "Ship dimensioning in the initial design", in *Developments in Maritime Transportation and Exploitation Sea Resources*, Guedes Soares & Lopez Pena (eds), Taylor & Francis Group, London.

Wadhwa, L. et al., 1990. Establishing Relationships Between Port Capacity, Throughput and Performance by Simulation Studies.

Walck, C. & Group, P.P., 2007. *Handbook on Statistical for experimentalists*,

Watson, D.C.M. & Gilfillan, A.W., 1977. Some Ship Design Methods. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, 119, pp.279–302.

ANEXO A1. Relatório SSM/Modelo Viagem/Otimização

A1.1.Alternativa a LNG

- Service Conditions

Typical Voyage

Number of service conditions **2**

Service Condition #1

Name	Loaded	
Draught	100.0	[% Full Draught]
Service speed	10.0	[knots]

Service Condition #2

Name	Ballast	
Draught	60.0	[% Full Draught]
Service speed	10.2	[knots]

- Hull Data

Main Dimensions

Length bet. PP	80.50	[m]
	82.91	
Length, WL	5	[m]
	11.00	
Breadth	0	[m]
Depth	4.767	[m]
Draught	3.700	[m]

Hull Appendages

Rudder area	3.6	[m ²]
Big keels area	96.6	[m ²]
Other appendages		[m ²]
Total Appendages area	100.2	[m ²]

Service Condition #1

Draught **3.700** [m]

Hull Form Coefficients

Block coefficient, C _b	0.850	[-]
Midship Section coefficient, C _m	0.999	[-]
Waterline coefficient, C _{wl}	0.900	[-]
Prismatic coefficient, C _p	0.851	[-]

Hydrostatic Properties

Displacement Vol.	2	[m ³]
Displacement	784.9	[t]
Longit. Cent. Buoyancy, ratio	2	[%Lpp Fwd MS]
Longit. Cent. Buoyancy, Lcb	854.5	[m AP]
	0.03	
	42.7	

			Vertical Cent. Buoyancy, Kb	1.907	[m]
				1	
Other Hull Characteristics			Wetted surface, Sw	346.7	[m2]
Transom panel area		[m2]			
Half-angle of entrance	45.3	[deg.]			
Service Condition #2					
Draught	2.220	[m]			
Hull Form Coefficients			Hydrostatic Properties		
Block coefficient, Cb	0.825	[-]	Displacement Vol.	621.1	[m3]
Midship Section coefficient, Cm	0.998	[-]	Displacement	661.6	[t]
Waterline coefficient, Cwl	0.884	[-]	Longit. Cent. Buoyancy, ratio	0.03	[%Lpp Fwd MS]
Prismatic coefficient, Cp	0.827	[-]	Longit. Cent. Buoyancy, Lcb	42.3	[m AP]
			Vertical Cent. Buoyancy, Kb	1.150	[m]
				1	
Other Hull Characteristics			Wetted surface, Sw	103.1	[m2]
Transom panel area		[m2]			
Half-angle of entrance	41.9	[deg.]			

- Optimization Parameters

RFR 4.705

			<u>Min</u>	<u>Max</u>
VsLoaded	10.047		6	12
VsBallast	10.161		6	12
Lpp			60	80.5
Depth			4	6
Draught			2	3.7
Cb			0.8	0.85

Depth-Draught	1.067	>=	1.067	Vol.Cargo	2637.16	>=	806.75
Attained EEDI	21.086	<=	26.183	UKC	-0.465	>=	0.5

- Freeboard Calculations

Hull Measurements

Freeboard length	80.500	[m]
Block coefficient (0.85D)	0.850	[-]
Deck plate thickness	0.010	[m]

Deck sheer line

	Actual sheer		Standard sheer		F	Actual x F	Std x F	
Aft PP		[m]	0.921	[m]	1.0	0.000	0.921	
1/6L from AP		[m]	0.409	[m]	3.0	0.000	1.227	
1/3L from AP		[m]	0.103	[m]	3.0	0.000	0.309	
Amidships (L/2)	0.000	[m]	0.000	[m]	1.0	0.000	0.000	
						0.000	2.457	0.307

Amidships (L/2)	0.000	[m]	0.000	[m]	1.0	0.000	0.000	
1/3L from FP		[m]	0.206	[m]	3.0	0.000	0.619	
1/6L from FP		[m]	0.818	[m]	3.0	0.000	2.453	
Forward PP		[m]	1.842	[m]	1.0	0.000	1.842	
						0.000	4.914	0.614

Superstructures	Encl. Len.		Actual Height		(b/B) Ratio	Std. Height	Eff. Length	Height Diff.	s
Poop Deck		[m]		[m]	1.0	1.855	0.000	1.855	0.309
Raised Quarter Deck		[m]		[m]	1.0	1.266	0.000	1.266	0.211
Forecastle Deck		[m]		[m]	1.0	1.855	0.000	1.855	0.309
Total	0.000	[m]					0.000		

Total sheer deficiency 0.770 [m]

- Freeboard Calculations

Freeboard Type	Type B	[-]
Tabular Freeboard	0.897	[m]
Corrections		
Correction for length	0.051	[m]
Deduct. for Superst. & Trunks	0.000	[m]
Cb correction	0.170	[m]
Depth Correction	0.000	[m]
Deck sheer correction	0.000	[m]
Summer Freeboard	1.067	[m]
Draught, max.	3.710	[m]
Minimum bow height	3.362	[m]

- Propulsion

Service Condition #1

Condition:	Loaded	
Draught:	3.7	[m]
Ship Speed:	10.0	[knots]
Sea Margin	0.15	[-]

Efficiency of Propulsion:

	0.98
Mechanical efficiency	0 [-]
	0.97
Reduction gear	0 [-]
	1.00
Relative-rotative	0 [-]
	1.11
Hull efficiency	4 [-]
	0.65
Propeller efficiency	0 [-]
	0.68
Total propulsive efficiency	9 [-]

Hull Resistance

Coefficients:

Wake Fraction	0.338	[-]
Thrust deduction factor	0.262	[-]
Froude Number	1.812E-01	[-]
Advance speed, Va	6.7	[knots]
	3.4	[m/s]

Propulsion Engines:

CSR/MCR ratio	0.80	[-]
Cont. Service Rating, CSR	431	[kW]
Max. Continuous Rating, MCR	539	[kW]
	733	[hp]

Hull Resistance estimate:

Holtrop & Mennen	0	
Hull Total Resistance, Rt	87	[kN]

Electric Power Generators:

Generator MCR	163	[kW]
---------------	-----	------

Service Condition #2

Condition:	Ballast	
Draught:	2.2	[m]
Ship Speed:	10.2	[knots]
Sea Margin	0.15	[-]

Efficiency of Propulsion:

	0.98	
Mechanical efficiency	0	[-]
	0.97	
Reduction gear	0	[-]
	1.00	
Relative-rotative	0	[-]
	1.05	
Hull efficiency	5	[-]
	0.65	
Propeller efficiency	0	[-]
	0.65	
Total propulsive efficiency	2	[-]

Hull Resistance**Coefficients:**

Wake Fraction	0.288	[-]
Thrust deduction factor	0.249	[-]
	1.833E-	
Froude Number	01	[-]
Advance speed, Va	7.2	[knots]
	3.7	[m/s]

Propulsion Engines:

	0.80	[-]
CSR/MCR ratio		
	431	[kW]
Cont. Service Rating, CSR		
Max. Continuous Rating,	539	[kW]
MCR	733	[hp]

Hull Resistance estimate:

Holtrop & Mennen	0	
Hull Total Resistance, Rt	76	[kN]

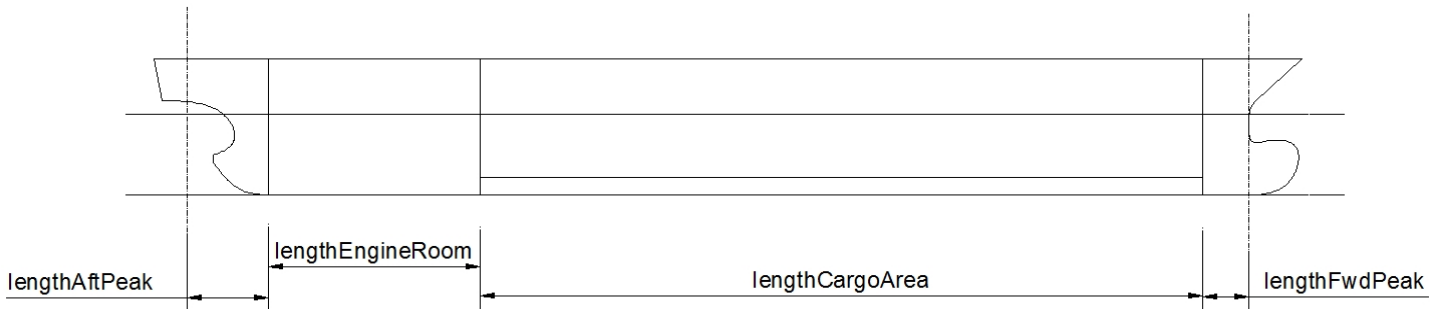
Electric Power Generators:

	163	[kW]
Generator MCR		

- Engine Data**Engine Characteristics**

Num. of Engines	1	[-]
Type		
Maker/Model		
	800	[kW]
MCR		
Speed		[rpm]
SFOC	153	[g/kW/h]
Weight		[t]

- Hull Configuration



Longitudinal Main Zones

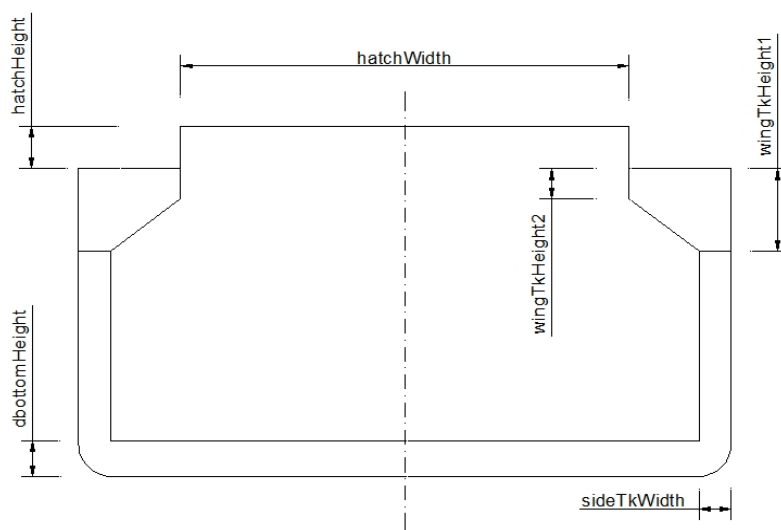
Length of Aft Peak	3.220	[m]
Length of Engine Room	14.250	[m]
Length of Cargo Area	59.810	[m]
Length of Fore Peak	3.220	[m]

Cross-section Dimensions

Height of Double Bottom	0.900	[m]
Width of Side Tank	1.000	[m]
Height1 of Wing Tank	0.000	[m]
Height2 of Wing Tank	0.000	[m]

Hatch Coamings

Number of Cargo Holds	3	[-]
Height of Hatch coaming	1.600	[m]
Width of Hatch coaming	9.000	[m]
Length of Hatch coaming	11.962	[m]



- LightShip Weight

	Weight [t]	Lcg [m]	Vcg [m]	AftLimit [m]	FwdLimit [m]	
Hull	548	42.524	1.927			
Superstructure	33					
Structures	581	40.117	1.818			Specific Margins
Machinery	156	10.345	2.094	3.220	17.470	0.0 [%]
Outfit	140	25.725	6.017			0.0 [%]
Global Margin [%]	7.8		3.0			
Global Margin	68	32.529	2.612			
Lightship	944	32.529	2.541			Index 0.224 [t/m3]

- Capacity

Displacement	2 855 [t]	Gross Tonnage	1 224 [-]
Lightship weight	944 [t]	Net Tonnage	490 [-]
Deadweight Ship Own	1 910 [t]	Ballast Capacity	
Deadweight		Wing Tks	378 [m3]
Fuel Oil	85 [t]	Double Bottom Tks	455 [m3]
Diesel Oil	33 [t]	Peak Tks	7 [m3]
Lubricating Oil	4 [t]	Total	839 [m3] 45.0 [% DW]
Fresh Water Tks.	5 [t]		
Provisions Crew & belongings	1 [t]	Cargo Capacity:	
Spares	3 [t]	Cargo holds	2 120 [m3]
	5 [t]	Hatch spaces	517 [m3]
Total DWp	135 [t] 7.1 [% DW]	Total	2 637 [m3]
Cargo Deadweight	1 775 [t]		

- Ship EEDI

Energy Efficiency Design Index (EEDI)

CSR Design	Yes	(Yes/No)
Ice Class	No	(No/IC/IB/IA/IAsuper)

Attained EEDI	<u>21.086</u>	[g CO2/t/nm]
----------------------	---------------	--------------

Reference Values

Phase 0 (until Dec. 2014)	26.183	[g CO2/t/nm]
Phase 1 (until Dec. 2019)	26.183	[g CO2/t/nm]
Phase 2 (until Dec. 2024)	26.183	[g CO2/t/nm]
Phase 3 (after Jan. 2025)	26.183	[g CO2/t/nm]

Compliance Index

80.534	[%]
80.534	[%]
80.534	[%]
80.534	[%]

- Ship Cost

Ship Cost Estimate

			Specific Margins
Structures	0.890	[Mill. US\$]	0 [%]
Machinery	1.384	[Mill. US\$]	20 [%]
Outfitting	1.468	[Mill. US\$]	0 [%]
Special Equipment		[Mill. US\$]	
Ship Initial Cost	<u>3.741</u>	[Mill. US\$]	

Loan Conditions

Loan percentage	70.0	[%]
Loan amount	2.619	[Mill. US\$]
Duration	6	[years]
Interest rate	8.00	[%/year]
Downpayment	1.122	[Mill. US\$]
Installment	0.566	[Mill. US\$]
Total cost	<u>4.521</u>	[Mill. US\$]
Financing costs	0.780	[Mill. US\$]

- Voyage

Typical Voyage

Number of voyage legs 4

Voyage Leg No.1

Description	Pocinho-Foz		Added Resistance (SeaState)	0.0	[kN]
Length	95.0	[nm]	Added Resistance (ShallowWater)	0.6	[kN]
Load Condition	Loaded	(SELECT)	Fuel price	396.4	[US\$/t]
Sea State (Beaufort)	2	(SELECT)	Time at Sea	12.46	[hours]
Water Depth Condition	ShallowWater	(SELECT)	Fuel consumed	0.8328.	[t]
Water depth	4.2	[m]	Fuel costs	0	[US\$] [t]
Channel width	40.0	[m]	CO2 Emissions	2.3	CO2]
Max. ship speed		[knot]		0.96	
Canal Fees, locks, etc.	183.62	[US\$]	Bow squat	5	[m]
Additional time (locks, etc.)	3.00	[hours]			
Type of fuel used	LNG	(SELECT)			
Number ports visited	1	[-]			

Port No.1

Name	Pocinho		Cargo Handling costs	157.3	[US\$]
Port Costs	593	[US\$]	Time at Port	1.39	[hours]
Cargo Handled	100	[%]			
Cargo Handling rate	2 000	[t/h]			
Cargo Handling unit cost	0.09	[US\$/t]			
Service time (wait, mooring, etc.)	0.50	[hours]			

Voyage Leg No.2

Description	Foz-Aveiro		Added Resistance (SeaState)	0.0	[kN]
Length	32.0	[nm]	Added Resistance (ShallowWater)	0.0	[kN]

Load Condition	Loaded	(SELECT)	Fuel price	396.4	[US\$/t]
Sea State (Beaufort)	2	(SELECT)	Time at Sea	3.18	[hours]
Water Depth Condition	DeepWater	(SELECT)	Fuel consumed	0.2	[t]
Water depth		[m]	Fuel costs	83.3	[US\$]
Channel width		[m]	CO2 Emissions	0.6	[t CO2]
Max. ship speed		[knot]		0.00	
Canal Fees, locks, etc.		[US\$]	Bow squat	0	[m]
Additional time (locks, etc.)		[hours]			
Type of fuel used	LNG	(SELECT)			
Number ports visited	1	[-]			

Port No.2

Name	Aveiro		Cargo Handling costs	157.3	[US\$]
Port Costs	893	[US\$]	Time at Port	4.55	[hours]
Cargo Handled	100	[%]			
Cargo Handling rate	500	[t/h]			
Cargo Handling unit cost	0.09	[US\$/t]			
Service time (wait, mooring, etc.)	1.00	[hours]			

Voyage Leg No.3

Description	Aveiro-Foz		Added Resistance (SeaState)	0.0	[kN]
Length	32.0	[nm]	Added Resistance (ShallowWater)	0.0	[kN]
Load Condition	Ballast	(SELECT)	Fuel price	396.4	[US\$/t]
Sea State (Beaufort)	2	(SELECT)	Time at Sea	3.15	[hours]
Water Depth Condition	DeepWater	(SELECT)	Fuel consumed	0.2	[t]
Water depth		[m]	Fuel costs	82.4	[US\$]
Channel width		[m]	CO2 Emissions	0.6	[t CO2]
Max. ship speed		[knot]			
Canal Fees, locks, etc.		[US\$]	Bow squat	0.00	[m]

Additional time (locks, etc.)		[hours]	0
Type of fuel used	LNG	(SELECT)	
Number ports visited	0	[-]	

Voyage Leg No.4

Description	Foz-Pocinho		Added Resistance (SeaState)	0.0	[kN]
Length	95.0	[nm]	Added Resistance (ShallowWater)	0.3	[kN]
Load Condition	Ballast	(SELECT)	Fuel price	396.4	[US\$/t]
Sea State (Beaufort)	2	(SELECT)	Time at Sea	12.35	[hours]
Water Depth Condition	ShallowWater	(SELECT)	Fuel consumed	0.8	[t]
Water depth	4.2	[m]	Fuel costs	324.5	[US\$/t]
Channel width	40.0	[m]	CO2 Emissions	2.3	[t CO2]
Max. ship speed		[knot]		0.36	
Canal Fees, locks, etc.	74.82	[US\$]	Bow squat	2	[m]
Additional time (locks, etc.)	3.00	[hours]			
Type of fuel used	LNG	(SELECT)			
Number ports visited	0	[-]			

Complete voyage

Total Distance	254	[nm]
Number of Ports	2	[nm]
Total Time at Port	5.9	[hours]
Total Time at Sea	31.1	[hours]
Total Voyage Duration	1.5	[days]

Voyage Costs

Port charges	1 486.1	[US\$]
Canal fees, locks, etc.	258.4	[US\$]
Cargo handling costs	314.5	[US\$]
Fuel costs	818.3	[US\$]

Total voyage costs 2 877.3 [US\$]

Total voyage emissions 5.7 [t CO2]

Annual Off-hire Period

28

[days/year]

- Operating Cost

1. Annual Operation Data

Number of voyages	218.1	[--]
Total cargo carried	387 178	[t]
Total CO2 Emissions	1 238	[t]
CO2 Emission Index	5.772E-02	[g CO2/t/nm]

2. Operating Costs

Administrative Costs	120.000	[1,000 US\$]
Crew Costs	164.575	[1,000 US\$]
Supplies Costs	71.689	[1,000 US\$]
Insurance Costs	14.078	[1,000 US\$]
Docking Costs	21.014	[1,000 US\$]
Total	391.356	[1,000 US\$]

3. Periodic Maintenance Costs

Total	7.941	[1,000 US\$]
-------	-------	--------------

5. Daily Costs

Total	1.185	[1,000 US\$]
-------	-------	--------------

6. Voyage Costs

Fuel Costs	178.503	[1,000 US\$]
Port Charges	324.192	[1,000 US\$]
Canal Fees, locks, etc.	56.378	[1,000 US\$]
Total Voyage Costs	559.072	[1,000 US\$]

5. Cargo-Handling Costs

Total Cargo-Handling Costs	68.608	[1,000 US\$]
----------------------------	--------	--------------

6. Capital Costs

Loan payments	566.000	[1,000 US\$]
Return of investment		[1,000 US\$]
Total	566.000	[1,000 US\$]

Annual Running Costs

1 592.977 [1,000 US\$]

- **RFR**

Investment Analysis

Total Investment (I)	3 853.459	[1,000 US\$]
Duration of Investment (N)	20	[years]
Investment Return rate (i)	10.00	[%]
Annual Cargo Carried (Q)	387	[1,000 t]
Ship Residual Value	283.337	[1,000 US\$]
Present Value (PV)	15 509.224	[1,000 US\$]
Annual Average Cost (AAC)	1 821.7	[1,000 US\$]
Required Freight Rate (RFR)	4.705	[US\$/t]

A1.2.Alternativa a MDO

- **Service Conditions**

Typical Voyage

Number of service conditions	2
------------------------------	---

Service Condition #1

Name	Loaded	
Draught	100.0	[% Full Draught]
Service speed	10.6	[knots]

Service Condition #2

Name	Ballast	
Draught	60.0	[% Full Draught]
Service speed	9.4	[knots]

- Hull Data

Main Dimensions

Length bet. PP	80.50	
	0	[m]
Length, WL	82.91	
	5	[m]
Breadth	11.00	
	0	[m]
Depth	4.767	[m]
Draught	3.700	[m]

Hull Appendages

Rudder area	3.6	[m ²]
Big keels area	96.6	[m ²]
Other appendages		[m ²]
Total Appendages area	100.2	[m ²]

Service Condition #1

Draught	3.700	[m]
---------	-------	-----

Hull Form Coefficients

Block coefficient, C _b	0.850	[-]
Midship Section coefficient, C _m	0.999	[-]
Waterline coefficient, C _{wl}	0.900	[-]
Prismatic coefficient, C _p	0.851	[-]

Hydrostatic Properties

Displacement Vol.	2 784.9	[m ³]
Displacement Longit. Cent.	2 854.5	[t]
Buoyancy, ratio Longit. Cent.	0.03	[%Lpp Fwd MS]
Buoyancy, Lcb Vertical Cent.	42.7	[m AP]
Buoyancy, Kb	1.907	[m]
Wetted surface, S _w	1 346.7	[m ²]

Other Hull Characteristics

Transom panel area		[m ²]
Half-angle of entrance	45.3	[deg.]

Service Condition #2

Draught	2.220	[m]
---------	-------	-----

Hull Form Coefficients

Block coefficient, C _b	0.825	[-]
Midship Section coefficient, C _m	0.998	[-]
Waterline coefficient, C _{wl}	0.884	[-]
Prismatic coefficient, C _p	0.827	[-]

Hydrostatic Properties

Displacement Vol.	1 621.1	[m ³]
Displacement Longit. Cent.	1 661.6	[t]
Buoyancy, ratio Longit. Cent.	0.03	[%Lpp Fwd MS]
Buoyancy, Lcb Vertical Cent.	42.3	[m AP]
Buoyancy, Kb	1.150	[m]
Wetted surface, S _w	1 103.1	[m ²]

Other Hull Characteristics

Transom panel area		[m ²]
Half-angle of entrance	41.9	[deg.]

- Optimization Parameters

RFR	5.644	<u>Min</u>	<u>Max</u>
		6	12
VsLoaded	10.594	6	12
VsBallast	9.416		
		60	80.5
Lpp	80.500	4	6
Depth	4.767	2	3.7
Draught	3.700	0.8	0.85
Cb	0.825		

Depth-Draught	1.067	>=	1.067
Attained EEDI	26.183	<=	26.183
Vol.Cargo	2 637.157	>=	777.577
UKC	-0.589	>=	0.5

- Freeboard Calculations

Hull Measurements

Freeboard length	80.500	[m]
Block coefficient (0.85D)	0.850	[-]
Deck plate thickness	0.010	[m]

Deck sheer line

	Actual sheer		Standard sheer		F	Actual x F	Std x F	
Aft PP	[m]		0.921	[m]	1.0	0.000	0.921	
1/6L from AP	[m]		0.409	[m]	3.0	0.000	1.227	
1/3L from AP	[m]		0.103	[m]	3.0	0.000	0.309	
Amidships (L/2)	0.000	[m]	0.000	[m]	1.0	0.000	0.000	
						0.000	2.457	0.307
Amidships (L/2)	0.000	[m]	0.000	[m]	1.0	0.000	0.000	
1/3L from FP	[m]		0.206	[m]	3.0	0.000	0.619	
1/6L from FP	[m]		0.818	[m]	3.0	0.000	2.453	
Forward PP	[m]		1.842	[m]	1.0	0.000	1.842	
						0.000	4.914	0.614

Superstructures	Encl. Len.	Actual Height	(b/B) Ratio	Std. Height	Eff. Length	Height Diff.	s
							-
Poop Deck	[m]	[m]	1.0	1.855	0.000	-1.855	0.30 9
Raised Quarter Deck	[m]	[m]	1.0	1.266	0.000	-1.266	- 0.21 1
Forecastle Deck	[m]	[m]	1.0	1.855	0.000	-1.855	- 0.30 9
Total	<u>0.000</u> [m]				<u>0.000</u>		
Total sheer deficiency	0.770 [m]						

- Freeboard

	Type B	[-]
	0.897	[m]
Correction for length	0.051	[m]
Deduct. for Superst. & Trunks	0.000	[m]
Cb correction	0.170	[m]
Depth Correction	0.000	[m]
Deck sheer correction	0.000	[m]
	<u>1.067</u>	[m]
	<u>3.710</u>	[m]
	<u>3.362</u>	[m]

- Propulsion

Loaded	
3.7	[m]
10.6	[knots]
0.15	[-]

0.338	[-]
0.262	[-]
1.911E-01	[-]
7.0	[knots]
3.6	[m/s]

0	
102	[kN]

Ballast	
2.2	[m]
9.4	[knots]
0.15	[-]

0.288	[-]
0.249	[-]
1.698E-01	[-]
6.7	[knots]
3.4	[m/s]

0	
61	[kN]

Efficiency of Propulsion:

Mechanical efficiency	0.980	[-]
Reduction gear	0.970	[-]
Relative-rotative	1.000	[-]
Hull efficiency	1.114	[-]
Propeller efficiency	0.650	[-]
Total propulsive efficiency	0.689	[-]

Propulsion Engines:

CSR/MCR ratio	0.80	[-]
Cont. Service Rating, CSR	534	[kW]
Max. Continuous Rating, MCR	667	[kW]
	907	[hp]

Electric Power Generators:

Generator MCR	163	[kW]
---------------	-----	------

Efficiency of Propulsion:

Mechanical efficiency	0.980	[-]
Reduction gear	0.970	[-]
Relative-rotative	1.000	[-]
Hull efficiency	1.055	[-]
Propeller efficiency	0.650	[-]
Total propulsive efficiency	0.652	[-]

Propulsion Engines:

CSR/MCR ratio	0.80	[-]
Cont. Service Rating, CSR	324	[kW]
Max. Continuous Rating, MCR	405	[kW]
	550	[hp]

Electric Power Generators:

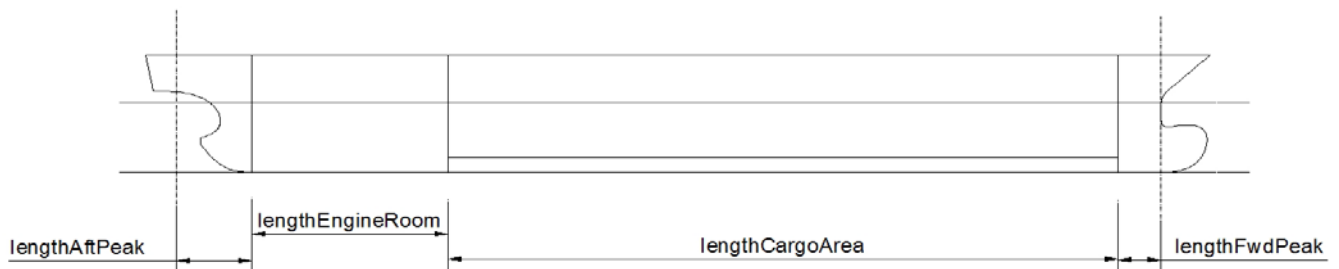
Generator MCR	163	[kW]
---------------	-----	------

- Engine Data

Engine Characteristics

Num. of Engines	1	[-]
Type		
Maker/Model		
MCR	800	[kW]
Speed		[rpm]
SFOC	198	[g/kW/h]
Weight		[t]

- Engine Data



Longitudinal Main Zones

Length of Aft Peak	3.220	[m]
Length of Engine Room	14.250	[m]
Length of Cargo Area	59.810	[m]
Length of Fore Peak	3.220	[m]

Cross-section Dimensions

Height of Double Bottom	0.900	[m]
Width of Side Tank	1.000	[m]
Height1 of Wing Tank	0.000	[m]
Height2 of Wing Tank	0.000	[m]

Hatch Coamings

Number of Cargo Holds	3	[-]
Height of Hatch coaming	1.600	[m]
Width of Hatch coaming	9.000	[m]
Length of Hatch coaming	11.962	[m]

- LightShip Weight

	Weight [t]	Lcg [m]	Vcg [m]	AftLimit [m]	FwdLimit [m]	
Hull	548	42.524	1.927			
Superstructure	33					
Structures	581	40.117	1.818			Specific Margins
Machinery	156	10.345	2.094	3.220	17.470	0.0 [%]
Outfit	140	25.725	6.017			0.0 [%]
Global Margin [%]	7.8		3.0			
Global Margin	68	32.529	2.612			
Lightship	944	32.529	2.541			Index 0.224 [t/m3]

- Capacity

Displacement	2 855 [t]	Gross Tonnage	1 224 [-]
Lightship weight	944 [t]	Net Tonnage	490 [-]
Deadweight Ship Own	1 910 [t]	Ballast Capacity	
Deadweight		Wing Tks	378 [m3]
Fuel Oil	144 [t]	Double Bottom Tks	455 [m3]
Diesel Oil	36 [t]	Peak Tks	7 [m3]
Lubricating Oil	5 [t]	Total	839 [m3]
Fresh Water Tks.	5 [t]		45 [% DW]
Provisions	1 [t]	Cargo Capacity:	
Crew & belongings	3 [t]	Cargo holds	2 120 [m3]
Spares	5 [t]	Hatch spaces	517 [m3]
Total DWp	199 [t]	Total	2 637 [m3]
Cargo Deadweight	1 711 [t]		

- EEDI

CSR Design	Yes	(Yes/No)
Ice Class	No	(No/IC/IB/IA/IASuper)

Attained EEDI 26.183 [g CO2/t/nm]

Reference Values

Phase 0 (until Dec. 2014)	26.183	[g CO2/t/nm]
Phase 1 (until Dec. 2019)	26.183	[g CO2/t/nm]
Phase 2 (until Dec. 2024)	26.183	[g CO2/t/nm]
Phase 3 (after Jan. 2025)	26.183	[g CO2/t/nm]

Compliance Index

100.000	[%]
100.000	[%]
100.000	[%]
100.000	[%]

- Ship Cost

Ship Cost Estimate

			Specific Margins
Structures	0.890	[Mill. US\$]	0 [%]
Machinery	1.153	[Mill. US\$]	0 [%]
Outfitting	1.468	[Mill. US\$]	0 [%]
Special Equipment		[Mill. US\$]	
Ship Initial Cost	<u>3.511</u>	[Mill. US\$]	

Loan Conditions

Loan percentage	70.0	[%]
Loan amount	2.462	[Mill. US\$]
Duration	6	[years]
Interest rate	8.00	[%/year]
Downpayment	1.055	[Mill. US\$]
Installment	0.533	[Mill. US\$]
Total cost	<u>4.250</u>	[Mill. US\$]
Financing costs	0.733	[Mill. US\$]

- Voyage

Typical Voyage

Number of voyage legs 4

Voyage Leg No.1

Description	Pocinho-Foz		Added Resistance (SeaState)	0.0	[kN]
Length	95.0	[nm]	Added Resistance (ShallowWater)	0.7	[kN]
Load Condition	Loaded	(SELECT)	Fuel price	903.0	[US\$/t]
Sea State (Beaufort)	2	(SELECT)	Time at Sea	11.97	[hours]
Water Depth Condition	ShallowWater	(SELECT)	Fuel consumed	1.3	[t]
Water depth	4.2	[m]	Fuel costs	150.2	[US\$/t]
Channel width	40.0	[m]	CO2 Emissions	4.1	[t CO2]
Max. ship speed		[knot]			
Canal Fees, locks, etc.	183.62	[US\$]	Bow squat	1.089	[m]
Additional time (locks, etc.)	3.00	[hours]			
Type of fuel used	MDO	(SELECT)			
Number ports visited	1	[-]			

Port No.1

Name	Pocinho		Cargo Handling costs	151.6	[US\$]
Port Costs	580	[US\$]	Time at Port	1.36	[hours]
Cargo Handled	100	[%]			
Cargo Handling rate	2 000	[t/h]			
Cargo Handling unit cost	0.09	[US\$/t]			
Service time (wait, mooring, etc.)	0.50	[hours]			

Voyage Leg No.2

Description	Foz-Aveiro		Added Resistance (SeaState)	0.0	[kN]
Length	32.0	[nm]	Added Resistance (ShallowWater)	0.0	[kN]
Load Condition	Loaded	(SELECT)	Fuel price	903.0	

					[US\$/t]
Sea State (Beaufort)	2	(SELECT)	Time at Sea	3.02	[hours]
Water Depth Condition	DeepWater	(SELECT)	Fuel consumed	0.3	[t]
Water depth		[m]	Fuel costs	288.3	[US\$/t]
Channel width		[m]	CO2 Emissions	1.0	[t CO2]
Max. ship speed		[knot]			
Canal Fees, locks, etc.		[US\$]	Bow squat	0.000	[m]
Additional time (locks, etc.)		[hours]			
Type of fuel used	MDO	(SELECT)			
Number ports visited	1	[-]			

Port No.2

Name	Aveiro		Cargo Handling costs	151.6	[US\$]
Port Costs	880	[US\$]	Time at Port	4.42	[hours]
Cargo Handled	100	[%]			
Cargo Handling rate	500	[t/h]			
Cargo Handling unit cost	0.09	[US\$/t]			
Service time (wait, mooring, etc.)	1.00	[hours]			

Voyage Leg No.3

Description	Aveiro-Foz		Added Resistance (SeaState)	0.0	[kN]
Length	32.0	[nm]	Added Resistance (ShallowWater)	0.0	[kN]
Load Condition	Ballast	(SELECT)	Fuel price	903.0	[US\$/t]
Sea State (Beaufort)	2	(SELECT)	Time at Sea	3.40	[hours]
Water Depth Condition	DeepWater	(SELECT)	Fuel consumed	0.2	[t]
Water depth		[m]	Fuel costs	196.6	[US\$/t]
Channel width		[m]	CO2 Emissions	0.7	[t CO2]
Max. ship speed		[knot]			

Canal Fees, locks, etc.		[US\$]	Bow squat	0.000	[m]
Additional time (locks, etc.)		[hours]			
Type of fuel used	MDO	(SELECT)			
Number ports visited	0	[-]			

Voyage Leg No.4

Description	Foz-Pocinho		Added Resistance (SeaState)	0.0	[kN]
Length	95.0	[nm]	Added Resistance (ShallowWater)	0.2	[kN]
Load Condition	Ballast	(SELECT)	Fuel price	903.0	[US\$/t]
Sea State (Beaufort)	2	(SELECT)	Time at Sea	13.09	[hours]
Water Depth Condition	ShallowWater	(SELECT)	Fuel consumed	0.8	[t]
Water depth	4.2	[m]	Fuel costs	760.3	[US\$/t]
Channel width	40.0	[m]	CO2 Emissions	2.7	[t CO2]
Max. ship speed		[knot]			
Canal Fees, locks, etc.	74.82	[US\$]	Bow squat	0.304	[m]
Additional time (locks, etc.)	3.00	[hours]			
Type of fuel used	MDO	(SELECT)			
Number ports visited	0	[-]			

Complete voyage

Total Distance	254	[nm]
Number of Ports	2	[nm]
Total Time at Port	5.8	[hours]
Total Time at Sea	31.5	[hours]
Total Voyage Duration	1.6	[days]

Voyage Costs

Port charges	1 460.6	[US\$]
Canal fees, locks, etc.	258.4	[US\$]
Cargo handling costs	303.1	[US\$]
Fuel costs	2 395.5	[US\$]
Total voyage costs	4 417.6	[US\$]

Total voyage emissions 8.5 [t CO2]

Annual Off-hire Period 28 [days/year]

- Operating Costs

1. Annual Operation Data

Number of voyages	217.1	[--]
Total cargo carried	371 417	[t]
Total CO2 Emissions	1 847	[t]
CO2 Emission Index	9.015E-02	[g CO2/t/nm]

2. Operating Costs

Administrative Costs	120.000	[1,000 US\$]
Crew Costs	164.575	[1,000 US\$]
Supplies Costs	74.977	[1,000 US\$]
Insurance Costs	14.078	[1,000 US\$]
Docking Costs	19.781	[1,000 US\$]
Total	393.412	[1,000 US\$]

3. Periodic Maintenance Costs

Total	9.141	[1,000 US\$]
--------------	--------------	---------------------

5. Daily Costs

Total	1.195	[1,000 US\$]
--------------	--------------	---------------------

6. Voyage Costs

Fuel Costs	520.102	[1,000 US\$]
Port Charges	317.118	[1,000 US\$]
Canal Fees, locks, etc.	56.112	[1,000 US\$]
Total Voyage Costs	893.333	[1,000 US\$]

5. Cargo-Handling Costs

Total Cargo-Handling Costs	65.815	[1,000 US\$]
-----------------------------------	---------------	---------------------

6. Capital Costs

Loan payments	533.000	[1,000 US\$]
Return of investment		[1,000 US\$]
Total	533.000	[1,000 US\$]

Annual Running Costs	1 894.701	[1,000 US\$]
-----------------------------	------------------	---------------------

- **RFR**

Total Investment (I)	3 622.676	[1,000 US\$]
Duration of Investment (N)	20	[years]
Investment Return rate (i)	10.00	[%]
Annual Cargo Carried (Q)	371	[1,000 t]
Ship Residual Value	283.337	[1,000 US\$]
Present Value (PV)	17 847.182	[1,000 US\$]
Annual Average Cost (AAC)	2 096.3	[1,000 US\$]
Required Freight Rate (RFR)	5.644	[US\$/t]

ANEXO A2. Modelo de Simulação em ARENA

Um modelo de simulação é um modelo lógico-matemático que representa a dinâmica do sistema em estudo. Neste caso (em *ARENA*) a construção do modelo é feita através de fluxogramas que são construídos através de objectos orientados à simulação. A estrutura básica do modelo é constituída por três tipos de elementos:

- Entidades: parte “circulante” do modelo que percorre a lógica estabelecida pelo fluxograma. Entidades podem ser itens como, clientes, documentos, peças de uma linha de montagem, etc., que vão ser atendidos, produzidos ou manipulados ao longo de todo o sistema.
- Recursos: elementos que são utilizados pelas entidades durante um certo processo;
- Processos: representam acções dentro do sistema. É no módulo de processo que está definida a acção entre a entidade e o recurso. Esta acção pode ser ocupar, atrasar ou capturar um recurso durante um certo período de tempo ou durante uma condição lógica.

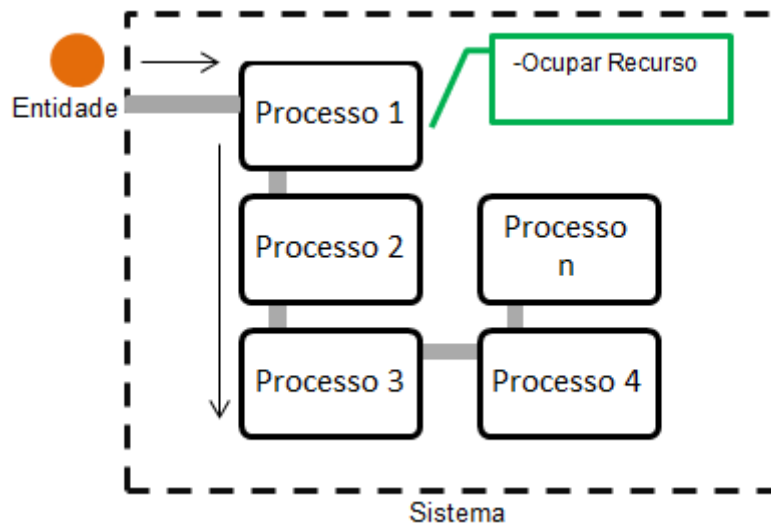


Figura A.1: Estrutura básica de um modelo

Existem porém outros tipos de elementos presentes no modelo de simulação. Estes tipos de elementos são considerados módulos/elementos avançados e cobrem áreas como, transporte/transferência, acções especializadas, atribuição de valores a variáveis, contagem e processamento de dados. Os módulos/elementos mais relevantes em todo o modelo de simulação estão representados na Tabela A.1

Tabela A.1: Elementos do modelo de simulação

Tipo de Elemento/Módulo	Descrição
Entidade	Minério de ferro
<i>Transporter</i>	Navio rio-mar. Cada um destes elementos consegue transportar uma entidade.
Recurso	Eclusas, postos de amarração, <i>Ship-loaders</i> , <i>Ship-unloaders</i> , pilotos e rebocadores.
Station	Pontos de localização do: terminal fluvial, Eclusas e terminal marítimo.
<i>Recorder</i>	Contador para processamento de dados (número de viagens, quantidade de carga transportada, etc.)
<i>Assign</i>	Atribui valores a variáveis

O modelo conceptual desenvolvido neste estudo está dividido em 4 grupos que representam diferentes conjuntos de operações. Operações no terminal fluvial, operações no terminal marítimo, percurso entre os dois terminais e actividade do tráfego marítimo-turístico. Na Figura A.2 está representada uma vista global de todo o modelo com os quatro grupos devidamente identificados.

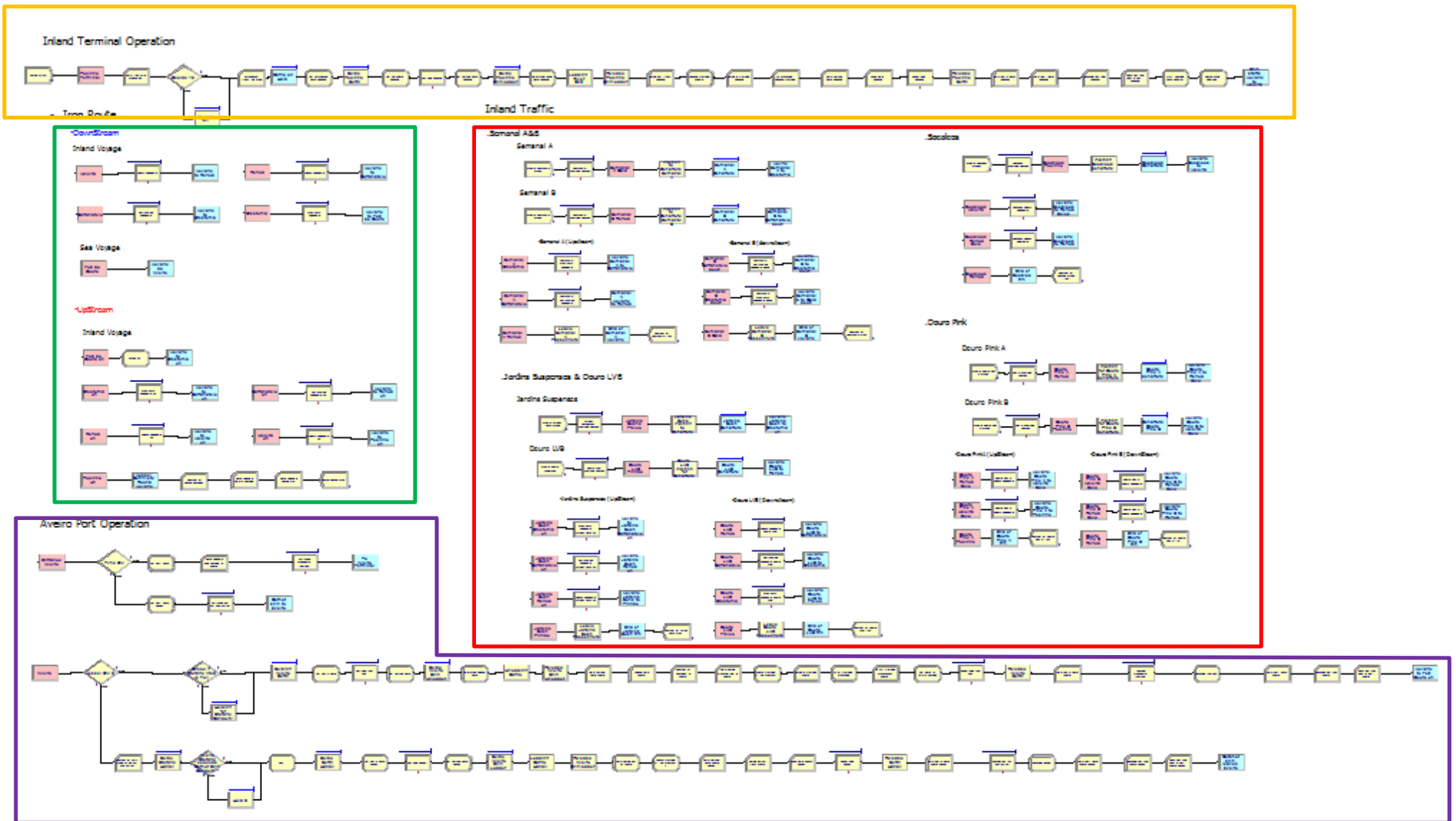


Figura A.2: Modelo de simulação

- Terminal Fluvial:

Neste grupo, representado a laranja na Figura A.2, estão englobadas todas as operações associadas ao terminal fluvial, desde a chegada de minério de ferro, inclusive, até a partida dos navios rio-mar carregados em direção ao terminal de marítimo.

No modelo de simulação cada entidade de minério de ferro representa uma quantidade de minério de ferro igual ao CDW dos navios rio-mar. A chegada de carga ao terminal é implementada através do módulo *Cargo Arrival*, que gera entidades de acordo com uma distribuição de *Poisson* (ver secção 5.1), seguida de um módulo de decisão que verifica se a capacidade de armazenamento do terminal foi excedida. Caso isso aconteça o minério de ferro aguarda no módulo *Storage full*, situação que é equivalente ao minério de ferro utilizar a mina como *buffer*, até que exista espaço para ser armazenado no terminal fluvial. Caso exista espaço de armazenamento disponível no terminal as entidades seguem para o módulo *Cargo Hold* que é um módulo do tipo *Request* cuja função é “chamar” um elemento *Transporter* (navio rio-mar, Tabela A.1) a cada chegada de uma entidade. Se todos os elementos navio rio-mar estiverem a ser utilizados (toda a frota está em utilização) a entidade aguarda, ocupando assim uma percentagem da área de armazenamento, até que seja transportada.

A partir deste módulo a entidade minério de ferro e o elemento *transporter* navio rio-mar seguem em conjunto. Isto é de certa forma uma abstracção da realidade uma vez que na verdade o minério de ferro ainda não foi carregado para o navio, contudo, desta forma garante-se que o minério só avança para o resto do processo de carga se existirem navios disponíveis para realizar essa operação.

O processo de acostagem, carga e desatracação segue da seguinte forma:

1. O conjunto entidade mais *transporter* reservam (*Seize*) o recurso posto de amarração;
2. Duração da operação de acostagem;
3. Reserva do recurso *Ship-loader*;
4. Duração da operação de carga (ver Secção 5.1.2);
5. Libertação do recurso *Ship-loader*;
6. Duração da operação de desatracação;
7. Libertação do recurso posto de amarração;
8. Início da viagem para o terminal marítimo.

Entre todos estes pontos existem módulos *Recorder* e *Assign* que reúnem dados e calculam os índices de desempenho que são a base de toda esta análise (secção 6.1). A viagem para o terminal fluvial é feita através do módulo *Transport* onde é indicada *Station* para a qual segue o navio rio-mar, e a velocidade a que fará esse percurso. As distâncias entre cada *Station* estão contidas numa tabela do tipo *Distance*. Na Figura A.3 está representado todo modelo de operação do terminal fluvial.

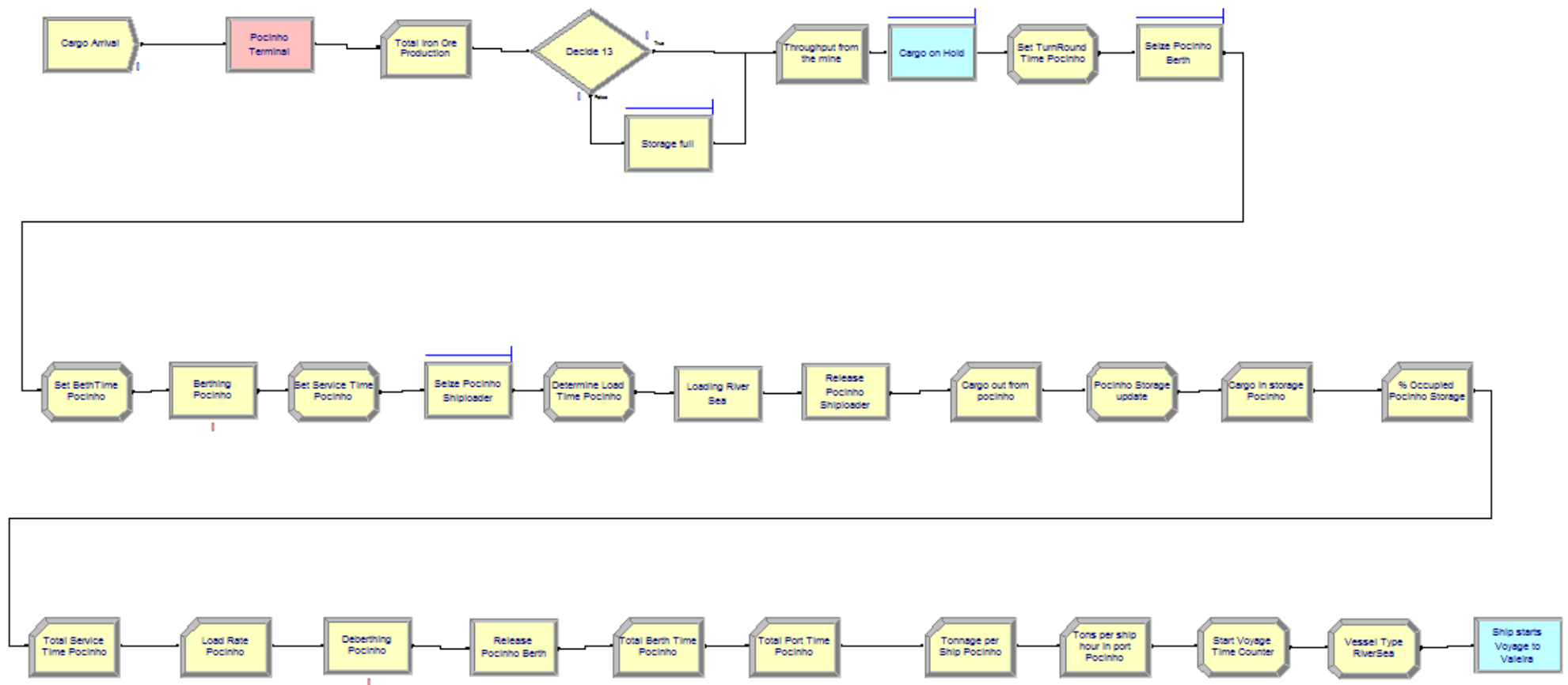


Figura A.3: Terminal Fluvial-Modelo de Simulação

Percurso entre o terminal fluvial e o terminal marítimo:

O percurso entre os dois terminais tem duas partes distintas, o percurso em rio e o percurso marítimo-costeiro. O percurso em rio é constituído por 4 eclusas que o dividem 5 troços, ou seja, o percurso total é constituído por 6 troços. Considerando o percurso marítimo a modelação deste grupo de operações foi feita seguindo estas divisões por troços e cada troço é constituído por um módulo *Station* que identifica a sua localização e distância, um processo onde o recurso eclusa é ocupado durante um certo período de tempo (secção 5.1.3) e um módulo *Transport* onde é determinada a localização/*Station* que se segue e a velocidade a que será feito esse percurso. Este procedimento repete-se ao longo dos troços entre eclusas, no troço entre a última eclusa e a foz do rio e depois entre a foz do rio e o terminal marítimo, concluindo assim o percurso desde o terminal fluvial até ao terminal marítimo. O percurso inverso segue exactamente o mesmo procedimento. No caso de um dos recursos estar ocupado o conjunto entidade mais elemento *transporter* tem que aguardar. As filas de espera geradas nas eclusas estão modeladas com um sistema de *First-come, First-Served*.

Na Figura 0.4 está representado parte do modelo que simula o percurso entre terminais. Este grupo de operações está assinalado a verde na Figura A.2.

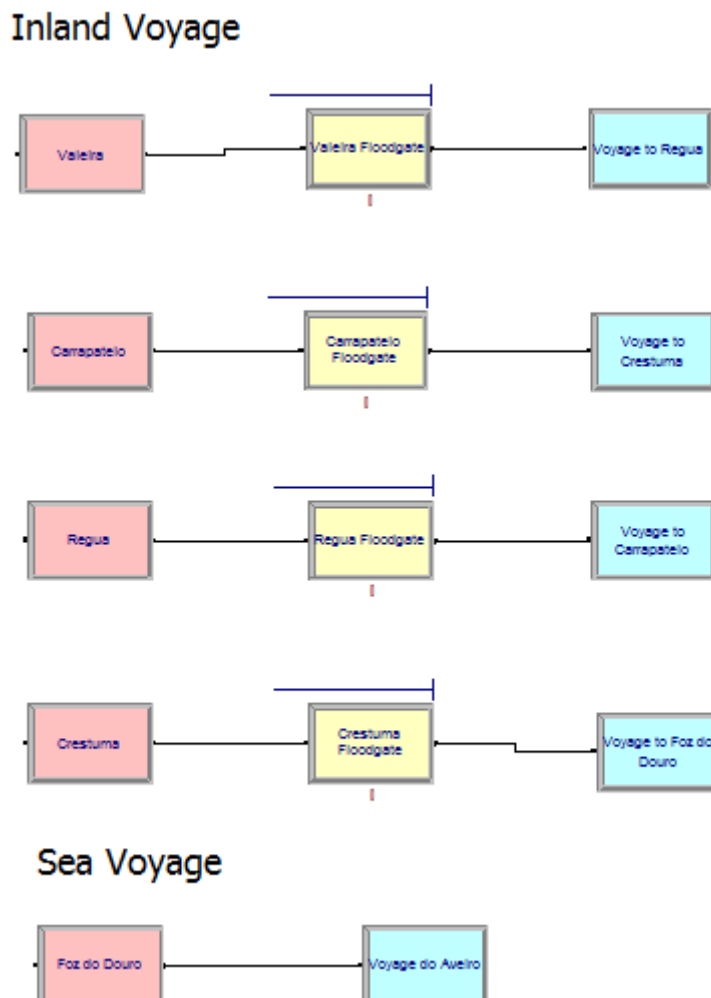


Figura A.4: Percurso entre terminais - Modelo de simulação

- Terminal Marítimo:

Este grupo de operações (assinalado a roxo na Figura A.2) é constituído por 2 troços: Um entre o mar e a entrada do porto e outro onde se processam todas as operações no porto. Esta divisão foi feita para que fosse possível considerar uma velocidade de entrada em porto diferente da velocidade praticada ao longo de todo o percurso marítimo-costeiro.

Neste terminal são executados dois tipos de operações diferentes: a descarga dos navios rio-mar e a carga de navios *Handysize*. Por esse motivo no início de cada um dos dois troços existe um módulo de decisão que diferencia os dois tipos de navios que entram no terminal marítimo. No primeiro troço, que representa a entrada no terminal, existem dois processos entrada diferentes. Um para os navios rio-mar onde que ocupam o recurso Pilotos (ver Secção 5.2.1) e outro para os navios *Handysize* que ocupam o recurso Rebocadores e o recurso Pilotos.

Exceptuando a utilização destes dois recursos na entrada os processos de descarga e carga seguem o mesmo método de modelação utilizado no terminal fluvial. No final da operação os navios rio-mar seguem o percurso até ao terminal fluvial, onde ao completarem o percurso o elemento *Transporter* navio rio-mar é libertado da entidade minério de ferro voltando assim a estar disponível para mais uma operação de carga no terminal fluvial e fechando assim o círculo de operação. O mesmo acontece para os navios *Handysize*.

Os navios *Handysize* são criados de acordo com um intervalo fixo de tempo, ou seja, o que equivale a estabelecer que de dois em dois dias, por exemplo, um navio deste género entra no terminal marítimo para ser carregado. A capacidade de carga de cada um destes navios é variável e segue uma distribuição normal (ver secção 5.2.3). Cada um destes navios é representado, tal como no caso dos navios rio-mar, um conjunto entre uma entidade, neste caso a capacidade CDW, e um elemento *Transporter*.

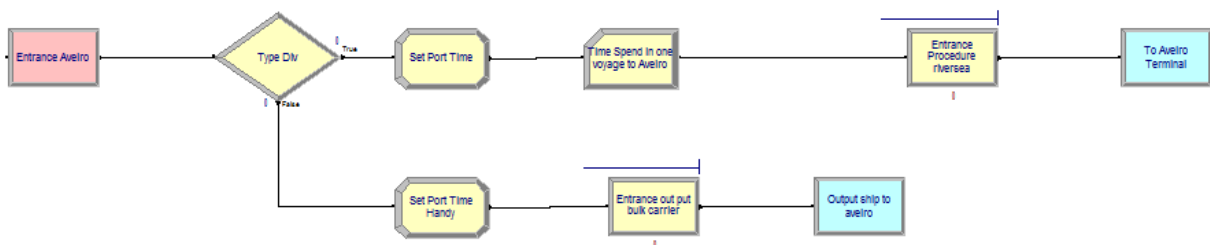


Figura A.5: Entrada no terminal marítimo- Modelo de Simulação

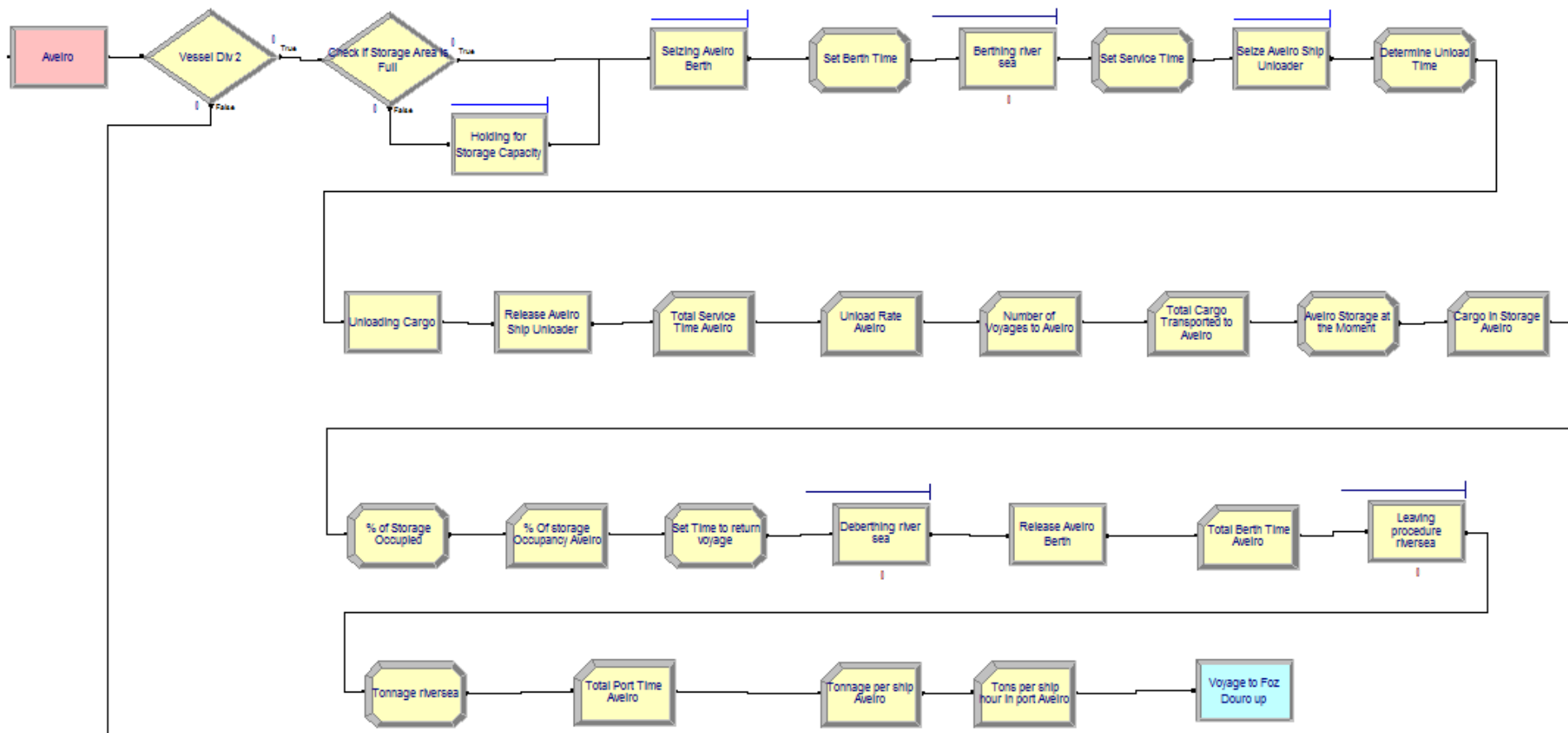


Figura A.6: Navios rio-mar no terminal marítimo - Modelo de Simulação

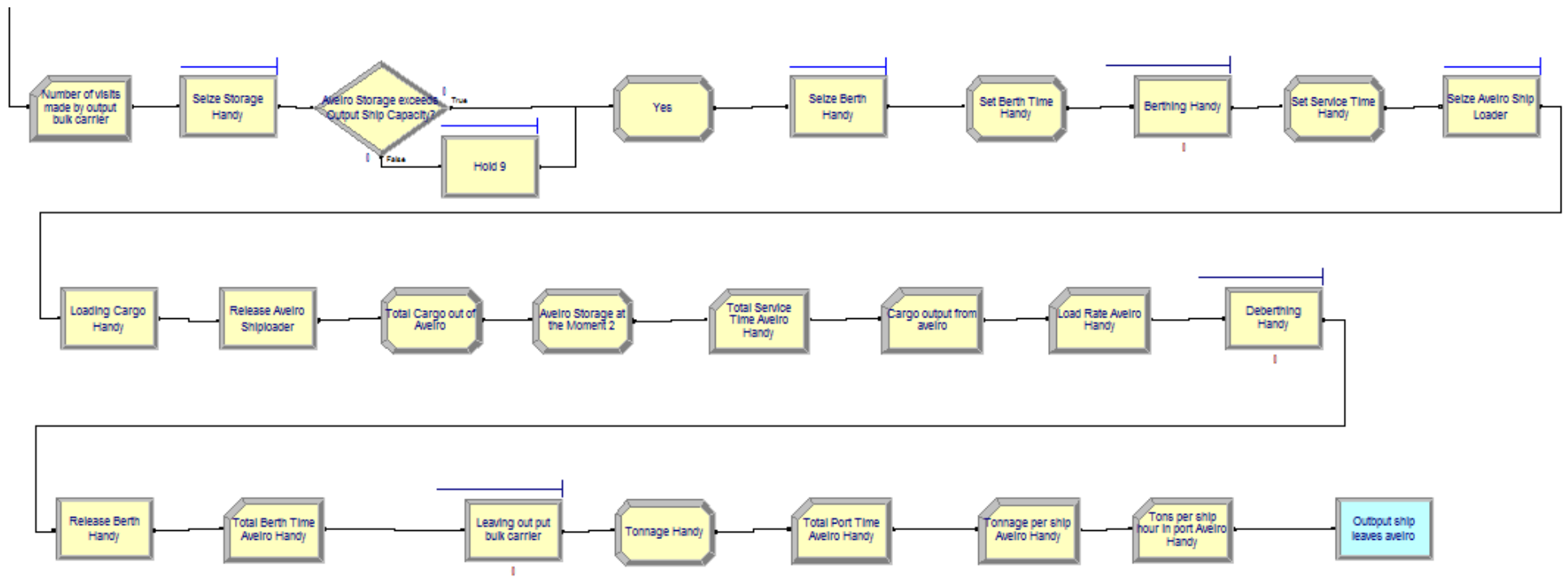


Figura A.7:Navios *Handysize* no terminal marítimo - Modelo de Simulação

Tráfego fluvial:

Os navios que estão incluídos no tráfego fluvial são modelados como conjuntos de entidades com elementos *transporter*, neste caso as entidades são criadas de acordo com um horário (*Schedule*, no módulo *Create*), esse horário segue a sazonalidade e os horários de alguns dos cruzeiros existentes na zona (secção 5.1.4). Este conjunto entidade mais elemento *transporter* segue um processo idêntico ao apresentado no percurso dos navios rio-mar. Estas entidades bem como as dos navios rio-mar partilham e ocupam o mesmo conjunto de recursos, que são as eclusas, durante o percurso.

Este conjunto de operações está assinalado a vermelho na Figura A.2. Na está representada apenas uma parte, referente a um dos cruzeiros implementados, os restantes seguem o mesmo tipo de processo.

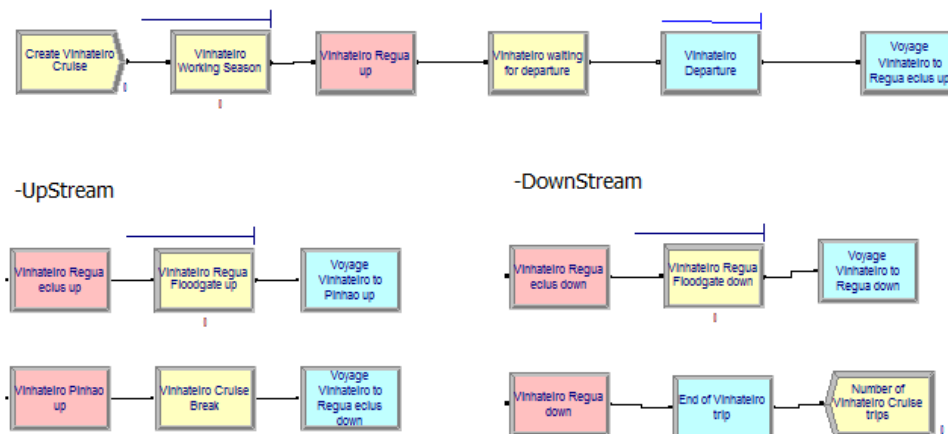


Figura A.8: Tráfego fluvial - Modelo de simulação