



**Jorge António Rocha Otimização de Rotas de Distribuição Marítima
Oliveira**



**Jorge António Rocha
Oliveira**

Otimização de Rotas de Distribuição Marítima

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial, realizada sob a orientação científica da Doutora Ana Maria Pinto de Moura, Professora Auxiliar do Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial da Universidade de Aveiro e da Doutora Carina Maria Oliveira Pimentel Professora Auxiliar Convidada, do Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial da Universidade de Aveiro

A todos os que me são especiais!

o júri

presidente

Prof. Doutor Luis Miguel Domingues Fernandes Ferreira
professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Filipe Pereira e Alvelos
professor Associado da Universidade do Minho

Prof.a Doutora Ana Maria Pinto de Moura
professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof.a Doutora Carina Maria Oliveira Pimentel
Professora Auxiliar Convidada da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Um grande agradecimento à Professora Ana Moura e à Professora Carina Pimentel pela orientação e apoio na realização desta dissertação, pela confiança, bem como pelo convite para trabalhar na área de otimização. A todos os colegas do Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial. Um obrigado muito especial aos meus pais, irmãos e namorada, Liliana, pelo amor, carinho e apoio incondicional ao longo do período de realização da dissertação.

palavras-chave

Container Stowage Problem, Programação Inteira Mista, Problema de Rotas de Veículos

resumo

A presente dissertação tem como objetivo apresentar um modelo matemático exato para a gestão de porta-contentores sem rotas pré-definidas, considerando as procuras dos portos marítimos e datas de entrega. O *short sea shipping* é um problema complexo que pertence à classe dos problemas de rotas, especificamente ao problema de rotas de veículos com restrições de carga e datas de entrega. Neste problema duas importantes decisões são tomadas: quais os portos a visitar por cada porta-contentor e qual a sua sequência de visita e onde alocar os contentores nos porta-contentores de forma a prevenir descargas/cargas desnecessárias. Um modelo de programação inteira mista é apresentado e resolvido. A formulação matemática desenvolvida contribui para uma melhor gestão das frotas de pequenos porta-contentores de forma a reduzir os custos de transporte e os tempos de entrega.

Por forma a validar o modelo desenvolvido, este foi testado através da resolução de vários problemas de teste baseados em dados reais.

keywords

Container Stowage Problem, Mixed Integer Programming, Vehicle Routing Problem

abstract

This work aims to provide a mathematical model for the short sea shipping problem, without pre-defined routes, considering demands of seaports and cargo delivery deadlines. The short sea shipping is a complex problem that belongs to the class of routing problems, in particular to the vehicle routing problem with capacity constraints (load restrictions and deadlines). In this problem two important decisions have to be made: which ports should be visited by each vessel and in which sequence and where should the containers be placed in. In the containers in the vessel so as to prevent overstowing. A mixed integer programming model is presented and solved. The mathematical formulation developed contributes to the better management of fleets of small vessels to reduce transport costs and delivery times.

In order to validate the developed model, we solve it using a set of problems instances based on real problems.

Índice

1. Introdução.....	4
2. Estado da Arte	8
2.1 Otimização	9
2.2 História do Transporte Marítimo.....	9
2.3 Container Stowage Problem	12
2.4 Vehicle Routing Problem.....	23
3. Problema CSSRP (Container Stowage Ship Routing Problem).....	26
3.1 Caracterização do problema CSSRP	27
3.2 Modelo de Programação Inteira Mista para o problema CSSRP	30
4. Discussão, Validação e Teste do modelo	36
4.1 Caracterização das Instâncias	37
4.2 Análise de Resultados	39
5. Conclusão.....	48
6. Referências Bibliográficas	50
7. Anexos.....	56
Anexo 1- Implementação do modelo de programação inteira mista.....	57
Anexo 2- Ficheiro do <i>software</i> IBM ILOG CPLEX do tipo .dat.....	63
Anexo 3- Ficheiro do <i>software</i> IBM ILOG CPLEX do tipo .mod.....	64

Índice de Figuras

Figura 1 Variação do volume de transporte marítimo entre 1980 e 2004 (Y. Liu <i>et al.</i> , 2010)	10
Figura 2 Contentor <i>standard</i> 20 ft (http://www.neptunepacific.com/containers.php , 2008)	11
Figura 3 <i>Transshipment</i> entre dois navios(http://www.sillanpaashipping.fi/References.htm , 2008)	12
Figura 4 Porta-contentores(http://www.marineinsight.com , 2012) John).....	13
Figura 5 Tipologias de posição no cais <i>Bay - Row – Tier</i> (http://www.containerhandbuch.de , 2012)	17
Figura 6 Constituição das <i>slots</i> de um porta-contentores (Martins <i>et al.</i> , 2009).....	31
Figura 7 Mapa de um problema real de <i>short sea shipping</i> (Ana Moura <i>et al.</i> , 2012)	39
Figura 8 Solução gerada para 15 portos e 2 navios.....	40
Figura 9 Inicialização dos índices (excerto)	57
Figura 10 Inicialização direta(CPLEX, 2012) (excerto).....	58
Figura 11 Definição das variáveis de decisão	58
Figura 12 Função Objetivo	58
Figura 13 Restrições de VRP	59
Figura 14 Restrições de CSP	60
Figura 15 Implementação de restrições do CSSRP	60
Figura 16 Excerto da implementação da secção gráfica do modelo	61
Figura 17 Inicialização das variáveis no ficheiro <i>.dat</i> (excerto) (CPLEX, 2012).....	61
Figura 18 Antes e depois a implementação gráfica de impressão (excerto)	62

Índice de gráficos

Gráfico 1 Comportamento do tempo computacional em função do número de portos marítimos...	42
Gráfico 2 Comportamento do número de variáveis em função do número de portos marítimos.....	42
Gráfico 3 Comportamento do número de restrições em função do número de portos marítimos ...	42
Gráfico 4 Comportamento do tempo computacional em função do número de porta-contentores..	43
Gráfico 5 Comportamento do número de variáveis em função do número de porta-contentores ...	43
Gráfico 6 Comportamento do número de restrições em função do número de porta-contentores..	44
Gráfico 7 Variação do tempo computacional em função da distribuição da carga para 5 portos	45
Gráfico 8 Variação do tempo computacional em função da distribuição da carga para 10 portos ..	45
Gráfico 9 Variação do tempo computacional em função da distribuição da carga para 15 portos ..	45

Índice de tabelas

Tabela 1 Resultados computacionais para as cinco instâncias de problema.....	41
--	----

1. Introdução

O transporte marítimo é um meio de transporte utilizado para a movimentação de carga entre os portos marítimos Europeus. Atualmente o transporte marítimo de curta distância é responsável por grande parte das cargas movimentadas nos portos Europeus. De acordo com (Martins *et al.*, 2009), 40% da carga movimentada dentro da comunidade Europeia circula através da via marítima. O termo “*short sea shipping*” é habitualmente utilizado para definir as viagens de curta distância entre portos marítimos.

Este meio de transporte, apresenta as vantagens de ser ambientalmente saudável, contribuir para uma viagem segura e envolver baixos custos de infraestruturas. No entanto a burocracia a que está associado, os custos elevados dos serviços portuários e a baixa eficiência dos mesmos e o tempo total de viagem são algumas das desvantagens que lhe estão associadas (Ana Moura *et al.*, 2012). Para além destas desvantagens verifica-se também a inflexibilidade de rotas, que poderá prolongar a duração da viagem, sendo esta dependente de fatores ambientais incontrolláveis, como o estado do mar.

Este trabalho tem como objetivo contribuir para a eficiência e o aumento do desempenho do transporte marítimo de curta distância, integrando o planeamento das rotas com a gestão do porta-contentores, reduzindo assim os custos de transporte.

O presente problema retrata a otimização da distribuição de um conjunto de contentores por um determinado número de navios, para os quais são determinadas rotas, rotas essas que definem a sequência de visita a um conjunto de portos marítimos. Os navios saem de um porto inicial onde são efetuadas apenas operações de carga e visitam um conjunto de portos onde só são efetuadas operações de descarga (para entrega dos contentores) e operações de realocação de contentores (quando necessário). Além disso, são consideradas neste problema, várias restrições inerentes aos problemas de rotas e aos problemas de carga e descarga de contentores. O principal objetivo a alcançar neste problema é a minimização dos custos totais de transporte, através da minimização de distâncias, tempos de serviço e operações de carga/descarga desnecessários.

Para a resolução deste problema e no âmbito deste trabalho, foi desenvolvido um modelo de programação inteira mista para uma frota de porta-contentores, sem rotas pré-definidas (Ana Moura *et al.*, 2012). As rotas são definidas tendo em consideração as distâncias entre portos, a procura e os prazos de entrega dos contentores em cada porto, e os contentores são alocados nos navios de forma a minimizar o *overstowing*.

O problema em estudo neste trabalho resulta da junção de dois outros problemas, amplamente conhecidos e abordados na literatura: o *Vehicle Routing Problem with time windows* e o *Container Stowage Problem*. Este problema será doravante designado por: *Container Stowage and Ship Routing Problem (CSSRP)*. Atualmente, não existem muitos estudos publicados nesta área. As abordagens publicadas tratam apenas a gestão das alocações de contentores em navios de forma a minimizar descargas/cargas desnecessárias utilizando uma rota pré-definida ver por exemplo (Y. Liu *et al.*, 2010). O estudo integrado da gestão de porta-contentores e determinação de rotas para transporte marítimo apresenta um elevado potencial no desenvolvimento desta área.

No meu melhor conhecimento, a literatura existente não possui ainda nenhum estudo que aborde a ligação entre estes dois problemas. Contudo são notáveis os benefícios que esta integração pode acarretar para a otimização do transporte marítimo de curta distância. Neste sentido, o presente trabalho poderá dar uma importante contribuição para o campo do “*short sea shipping*”.

Os principais objetivos a atingir com a elaboração deste trabalho são: i) definição e caracterização de um novo problema que resulta da integração dos problemas CSP e VRP, sem a existência de rotas pré-definidas; ii) utilização de métodos exatos para a sua resolução; iii) encontrar soluções ótimas que minimizem os custos de transporte; iv) aumentar a competitividade do transporte marítimo e v) enriquecer a literatura no campo do *short sea shipping*.

Tendo em conta os objetivos foi estabelecida uma metodologia de investigação, para a resolução do problema, constituída por um conjunto de etapas que foram realizadas paralelamente. No texto que se segue apresentam-se essas etapas.

Etapa i) Pesquisa bibliográfica sobre os problemas em questão, para o desenvolvimento do conhecimento temático sobre o tema.

Etapa ii) Familiarização com o *software* de otimização, IBM ILOG CPLEX 12.4 Academics.

Etapa iii) Desenvolvimento e implementação do modelo matemático.

Etapa iv) Validação do modelo recorrendo aos problemas de teste desenvolvidos na etapa iii.

Etapa v) Escrita da dissertação.

Apresenta-se de seguida a estrutura desta dissertação, a qual está dividida em seis capítulos. No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica da literatura mais relevante na área. O capítulo 3 é dedicado ao CSSRP, onde são descritas as principais características do problema e o tipo de restrições a que este está sujeito, assim como se apresenta o modelo matemático e faz-se a caracterização das restrições que o constitui. O capítulo 4 é dedicado à validação e teste do modelo e à discussão de resultados, através da resolução de algumas instâncias, assim como se procede à análise do desempenho global do mesmo. Por último, no capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões obtidas no estudo realizado, bem como se apresentam algumas sugestões de trabalho futuro.

Parte do trabalho que se apresenta nos próximos capítulos desta dissertação foi publicado em (Ana Moura *et al.*, 2012).

2. Estado da Arte

No presente capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica da literatura mais relevante da área em estudo. É efetuada uma pequena análise do estado da arte relativo à otimização no geral, abordando-se em que consiste e quais as metodologias para a resolução de problemas de otimização (secção 2.1). A secção 2.2 apresenta a história do transporte marítimo e refere alguns dados histórico-estatísticos para sua contextualização e são também referidas comparações com transportes concorrentes. A secção 2.3 do capítulo é dedicada à análise do estado da arte relativo ao *Container Stowage Problem* (CSP) e identificação de distintas abordagens apresentadas por vários autores. Por fim a última secção corresponde ao estado da arte do *Vehicle routing problem* (VRP), onde são revistas algumas abordagens de alguns autores relevantes na matéria.

2.1 Otimização

A otimização permite demonstrar que todas as barreiras interdisciplinares são passíveis de ultrapassar. Facto disso é a utilização da otimização em áreas como a engenharia (Borkar *et al.*, 1997). Desta forma a otimização permite: a minimização de custos, a minimização de um elemento que constitui um sistema, a maximização de lucros, entre outras. A otimização pode ser estática ou dinâmica (Borkar *et al.*, 1997; Jongen *et al.*, 2004a). À otimização estática está associada a programação linear e à dinâmica está associado o controlo.

Em termos pedagógicos, a otimização surge normalmente associada a aspetos de investigação. A otimização como teoria, não é mais do que um estudo matemático de problemas que requerem a minimização ou maximização de uma função objetivo, encontrando-se esta sujeita a um determinado domínio (Jongen *et al.*, 2004b). A teoria da otimização inclui o estudo sobre a existência de soluções, propriedades estruturais, bem como aspetos algorítmicos.

O campo da otimização apresenta uma importância tal que é aplicado em variadíssimas áreas, tais como, matemática aplicada, engenharia, economia entre outras.

Os problemas de otimização abrangem diversas naturezas, e existe também uma vasta gama de técnicas que permitem estudar este tipo de problemas. Um critério crucial que influencia as abordagens utilizadas é a estrutura topológica do domínio sobre o qual o problema de otimização é definido (Jongen *et al.*, 2004b).

Se existe um ponto extremo que é pesquisado num conjunto finito ou infinito, o problema de otimização utilizado é de natureza discreta ou estática. Para inúmeros domínios, como o dos números reais, as técnicas utilizadas são muitas vezes baseadas em conceitos de cálculo e de matemática contínua dependendo das propriedades específicas das funções envolvidas (Borkar *et al.*, 1997; Jongen *et al.*, 2004a).

Os problemas de otimização geram soluções que se traduzem em vetores reais ou racionais. Contudo, para uma grande parte dos problemas de otimização, as soluções são mais restritas, sendo as mesmas compostas por inteiros ou pelo conjunto $\{0,1\}$, no caso da utilização de variáveis binárias. Estes problemas designam-se habitualmente por problemas de programação linear inteira. Estamos perante problemas onde o grau de complexidade e o tempo computacional para o cálculo das soluções ótimas é elevado.

A programação linear inteira mista caracteriza-se pela existência de uma ou mais funções objetivo, e por um conjunto de variáveis de decisão que compõem o problema que são normalmente na sua maioria binárias.

2.2 História do Transporte Marítimo

Foi em 1875 que surgiram as primeiras alianças entre companhias marítimas, de forma a controlar as tarifas de mercado e a reduzir a concorrência. Atualmente as alianças estratégicas permitem realizar economias de escala, viagens mais frequentes e diminuir o tempo de trânsito do

próprio navio. A tendência para a consolidação de frotas e rotas levou à utilização de sistemas de apoio à decisão que controlam as frotas e os navios e assim resolvem os problemas otimizando-os.

Desde os anos 70, que o transporte de contentores tem demonstrado um elevado desenvolvimento (Sciomachen *et al.*, 2007). O transporte através de contentores tem sido o principal fluxo da logística atual e os portos marítimos onde estes contentores se encontram, temporariamente, são considerados os nós do transporte internacional (Han *et al.*, 2010; Janstrup *et al.*, 2010). O contentor é um meio universal de transporte, que pode ser movimentado por via marítima, terrestre ou férrea (Sciomachen *et al.*, 2007; Wilson I. D. *et al.*, 1999). Exemplo disso é o crescimento do comércio em cerca de 6,4% ao ano do transporte marítimo em cerca de 60% das empresas de transporte (Y. Liu *et al.*, 2010; Sciomachen *et al.*, 2007). Na figura seguinte (Figura 1) pode-se analisar a variação do volume de transporte marítimo entre 1980 e 2004 em todo o mundo. As barras mostram o volume de contentores transportados e a curva representa a percentagem de contentores transportados por via marítima.

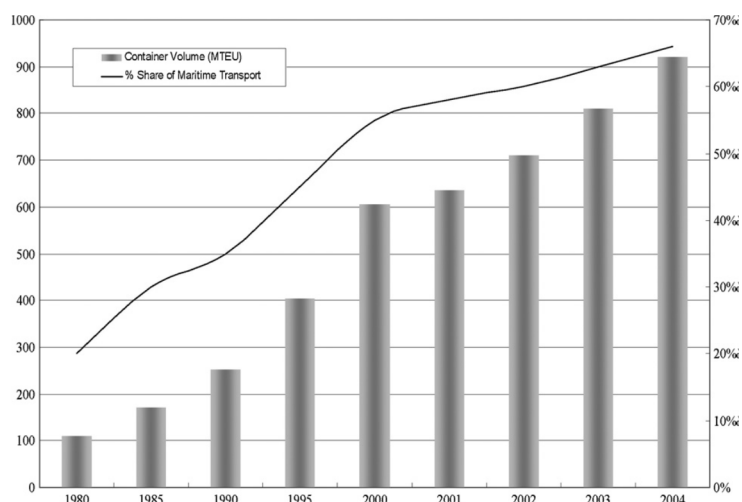


Figura 1 Variação do volume de transporte marítimo entre 1980 e 2004 (Y. Liu *et al.*, 2010)

O aumento do transporte marítimo estimulou a formação de economias de escala, o que levou à necessidade de adaptação das empresas, nomeadamente ao nível da aquisição de navios de grande capacidade.

No início dos anos 50, surgiu a necessidade de aumentar o tamanho dos contentores para o transporte marítimo, para desta forma diminuir o custo unitário do transporte (Meisel *et al.*, 2010). Com esta realidade tornou-se essencial standardizar os contentores em duas dimensões: 20-foot ou 6 metros (Figura 2) e 40-foot ou 12 metros. A utilização de contentores revolucionou este tipo de transporte. De acordo com Chou e Ding cerca de 70% do comércio internacional efetuado por via marítima atualmente é transportado em contentores.



Figura 2 Contêntor *standard* 20 ft (<http://www.neptunepacific.com/containers.php>, 2008)

Em 2006, a taxa de transferência de contêntores nos portos marítimos cresceu 13,4%, comparativamente ao crescimento de 8,7% em 2005 e 12,8% em 2004, atingindo os 440 milhões de TEU (*Twenty-foot equivalent unit*). No mesmo ano, os vinte principais portos marítimos do mundo movimentaram 208,7 milhões de TEU, representando mais de 51% do total da carga movimentada em todo o mundo. A capacidade média em número de contêntores transportáveis por navio em 1997 era de 1581 TEU e passou para 2324 TEU em 2006 e para 2417 TEU em 2007. Atualmente este valor atingiu os 14500 TEU (Chou *et al.*).

O transporte marítimo na Europa representa 40% dos intercâmbios intracomunitários em ton-km, o que significa que uma grande parte do transporte de cargas é efetuada em curtas distâncias (Martins *et al.*, 2009).

Cerca de 90% do comércio internacional de produtos transportados via marítima são produtos não petrolíferos (sem ser a granel) e são transportados em contêntores (GÄumÄu *et al.*, 2008). A carga encontra-se em contêntores que apresentam dimensões adequadas também ao transporte terrestre realizado por camiões. Desta forma é possível transportar para qualquer localização sem a necessidade de efetuar operações de desempacotamento e embalagem consecutivas.

O transporte marítimo apresenta taxas marítimas baixas em comparação com o transporte aéreo, sendo as taxas marítimas apenas um décimo das taxas aéreas. Além disso, o número de acidentes e nível de poluição são mais baixos quando comparados com outros meios de transporte (Agarwal *et al.*, 2008).

As empresas, muitas vezes no decorrer de uma viagem, necessitam de contêntores vazios para criar estabilidade no navio, devido às diferenças significativas da distribuição nas rotas percorridas. Esta situação leva a que as empresas tenham de suportar custos desnecessários (Agarwal *et al.*, 2008). Segundo dados de ROI Container Cargo Alliance (G. Liu, 2007), em 2002, uma redução em 10% destes custos desnecessários podia aumentar a competitividade em valores compreendidos entre 30 e 50%.

No entanto, o crescimento do transporte marítimo leva ao crescimento da complexidade da gestão do transporte (Y. Liu *et al.*, 2010), que acarreta o aumento de condicionantes ao problema e também uma alteração nos objetivos. Atualmente os objetivos centram-se em obter maiores ganhos em termos de custos de transporte e também num aumento da eficiência da

gestão do porto em situações de carga, descarga e de reposicionamento de contentores (Sciomachen *et al.*, 2007).

Devido ao aumento do transporte marítimo tem também aumentado os *transshipment ports*. Este conceito descreve-se como sendo um porto onde a carga é transferida de um navio diretamente para outro, sendo em alguns casos a carga transferida temporariamente para o cais. A transferência ocorre através de movimentos realizados com guias. A utilização de contentores no processo de *transshipment* (Figura 3) torna o processo mais flexível e garante custos mais baixos de operação. Em 2003, 30% da movimentação mundial de contentores envolvia operações de *transshipment* e a tendência é para esta prática aumentar. Cerca de 80% dos contentores movimentados em Singapura, por exemplo, o segundo maior porto do mundo, correspondem a operações de *transshipment* (Agarwal *et al.*, 2008).



Figura 3 *Transshipment* entre dois navios(<http://www.sillanpaashipping.fi/References.htm>, 2008)

Os navios de contentores (porta-contentores, como serão designados de agora em diante) revolucionaram a navegação e transformaram este negócio numa “máquina intensiva” (Dubrovsky *et al.*, 2002). Os porta-contentores são um tipo de transporte moderno com várias vantagens. A velocidade, segurança e qualidade são alguns aspetos que permitem distinguir, de forma positiva, os porta-contentores comparativamente aos navios de carga (W.-y. Zhang *et al.*, 2008).

2.3 Container Stowage Problem

O problema de alocação de contentores é um problema de origem combinatória onde a sua dimensão depende da capacidade do navio, da distribuição dos contentores e do perfil da procura de cada porto marítimo (Wilson I. D. *et al.*, 1999). Neste problema, os contentores são empilhados em colunas e o acesso para descarga é efetuado apenas pelo topo dessa coluna, com a utilização de guias (Dubrovsky *et al.*, 2002) (Figura 4).



Figura 4 Porta-contentores(<http://www.marineinsight.com>, 2012)

Meisel e Wichmann (Meisel *et al.*, 2010) apresentam uma classificação de contentores, para otimização do processo de movimentação dos mesmos num porto marítimo. Desta forma, agrupam os contentores de acordo com as possíveis movimentações nas várias situações de distribuição. Estes autores dividem os contentores em quatro classes:

- i) “*Export Containers*”, correspondem aos contentores que se encontram no cais de embarque para serem carregados no navio;
- ii) “*Import Containers*”, são os contentores que necessitam de ser descarregados do navio para que os “*export containers*” possam ser carregados;
- iii) “*Fixed Containers*”, são os contentores que permanecem fixos no navio, sem que exista qualquer movimentação de carga ou descarga entre o seu porto de origem e o seu porto de destino;
- iv) “*Reshuffle Containers*”, são os contentores que se encontram numa posição superior à dos contentores da classe *import* ou *export* e necessitam de ser movidos para que o acesso aos contentores que se encontram em posições inferiores seja possível.

As estratégias de alocação de contentores no cais de embarque, foram analisadas em duas vertentes. A vertente “*import containers*” por (de Castillo *et al.*, 1993; Kim, 1999) e a vertente “*export containers*” estudada por (Taleb-Ibrahimi *et al.*, 1993). Existe também uma abordagem conjunta efetuada por (C. Zhang *et al.*, 2002).

Devido à elevada dimensão dos navios atuais, é cada vez mais frequente a necessidade de uma grande quantidade de movimentações, o que faz com que seja difícil encontrar um método eficiente para a gestão dos contentores no navio.

A eficiência do porto e do navio é estudada através do problema designado por “*Master Bay Plan Problem - MBPP*” (Avriel *et al.*, 1998). Neste problema fatores como o peso, a estabilidade, a velocidade, a autonomia do navio, a resistência do casco e a qualidade do transporte, são considerados na elaboração do plano de alocação. No entanto a sequência em

que os portos têm de ser visitados e os prazos de entrega da carga transportada também são importantes para o planeamento da alocação (Martins *et al.*, 2009; W.-y. Zhang *et al.*, 2008). A eficiência do transporte é determinada pela alocação dos contentores no porto marítimo e no navio (Wilson I. D. *et al.*, 1999). O planeamento da alocação dos contentores está relacionado com a colocação do contentor no navio numa determinada posição (ou *slot* na literatura anglo-saxónica) para ser transportado de um porto marítimo para outro que se encontre a uma determinada distância (Avriel *et al.*, 1993). Os porta-contentores possuem uma estrutura que facilita a movimentação de contentores. Em cada porto constituinte da rota, os contentores são descarregados e carregados para portos seguintes. A alocação dos contentores de uma forma adequada facilita o processo em termos económicos. O planeamento de alocação de carga determina como alocar itens numa unidade de transporte, da maneira mais económica (Giemsch, 2004).

Dito desta forma, inicialmente o planeamento da alocação dos contentores era efetuado pelo capitão do navio. Atualmente o porto marítimo elabora o “*master bay plan*” que significa plano mestre dos compartimentos. Este plano é geralmente elaborado em conjunto com o coordenador do navio (Sciomachen *et al.*, 2007). Atkins (Atkins, 1991) demonstra que o planeamento envolve um conjunto vasto de objetivos, entre os quais, a otimização do espaço para alocação e, a otimização da sincronização entre as operações de expedição e o tempo de atracação do navio no porto. De certa forma o problema de planeamento da gestão dos contentores não é mais do que o *MBPP*, onde se determina a alocação de um conjunto C de contentores de vários tipos num conjunto S de posições possíveis (Sciomachen *et al.*, 2007).

O problema de alocação de contentores é também por vezes designado por o problema de planeamento da estiva do navio, ou *Container stowage problem*, recorrendo à denominação inglesa.

Um navio quando realiza uma viagem visita diferentes portos, logo o planeamento da gestão dos contentores é bastante complexo devido às inúmeras restrições existentes. Em situações de distribuição marítima de curta distância o problema de gestão de contentores depende de várias restrições tais como, as características do navio, tipo de carga a transportar e o tipo de contentor (Wei-ying *et al.*, 2005).

O problema de alocação de contentores é “*NP-difícil*” (Avriel *et al.*, 2000; Avriel *et al.*, 1998; Wei-ying *et al.*, 2005; Wilson I. D. *et al.*, 1999).

O CSP é um problema NP-difícil pelo facto de não ser possível garantir que uma solução ótima e seja encontrada num tempo de processamento aceitável e também porque este tempo cresce exponencialmente com o tamanho dos problemas (Wilson *et al.*, 2000).

O CSP é apresentado normalmente como sendo um problema onde existe um conjunto de navios que têm de visitar um certo número de portos distribuídos geograficamente. Em cada porto visitado, existem contentores que têm de ser descarregados do navio, porque já chegaram ao seu destino. São também carregados outros contentores para serem levados para outros portos e são recolocados contentores dentro do navio de forma a permitir que o navio respeite todas as

restrições a que está sujeito bem como permita uma gestão eficiente do mesmo (Chou *et al.*). Esta gestão eficiente do navio permitirá a redução de custos, sendo este o principal objetivo a alcançar na resolução do problema de gestão de contentores (Wei-ying *et al.*, 2005). A minimização do tempo de movimentação dos contentores é de extrema importância. Globalmente o tempo despendido está relacionado com atividades como, atracação do navio, carga/descarga de contentores, recolocação de contentores e a partida do navio para o porto seguinte (Ambrosino *et al.*, 2006; Chou *et al.*).

Wilson *et al.* (Wilson I. D. *et al.*, 1999) dividem as abordagens para o CSP em três classes. Sendo elas:

- i) *Simulation based*, que é uma abordagem que combina heurísticas de carga com métodos de simulação;
- ii) *Rule based Systems*, que é uma abordagem que utiliza os métodos de inteligência artificial e metaheurísticas;
- iii) *Mathematical programming*, que é uma abordagem que usa os métodos de programação matemática com relaxação de restrições.

O estudo de problemas de otimização do tipo “*NP-difícil*” através de simulação, teve início na década de 80 por (Shields, 1984), utilizando a técnica de Monte-Carlo e a interação humana de forma a melhorar os planos dos navios (Sciomachen *et al.*, 2007). Desde então, existiu um crescer da investigação neste sentido. (Ratcliffe *et al.*, 1987; Saginaw Li *et al.*, 1989) por exemplo desenvolveram métodos de otimização de colocação dos contentores nos navios com base na técnica de Monte-Carlo (Sciomachen *et al.*, 2007).

Shields (Shields, 1984) desenvolveu um sistema designado por *Computer Aided Preplanning System* (CAPS), o qual foi mais tarde também estudado por (Botter *et al.*, 1992). O CAPS é um sistema de apoio à decisão que produz um plano de estiva recorrendo à teoria de Monte Carlo. Este sistema permite a resolução de problemas de maior dimensão em comparação com o sistema tradicional em papel. Entenda-se como sistema tradicional em papel, como sendo o método manual utilizado pelo planeador para estruturação do planeamento de estiva. Shields usou uma estrutura de dados com base em *slots*¹ específicos e empregou uma abordagem aleatória ponderada para a alocação de contentores para esses *slots*. Este sistema considera também a redução do número de *overstows*². Nehrling (Nehrling, 1970) também aplicou a teoria de Monte Carlo, e desenvolveu um programa que simula as operações de carga/descarga num porta-contentores. Existe uma interligação entre o navio e o terminal portuário, onde restrições como o deslocamento do navio e a estabilidade são monitorizadas durante a simulação.

¹ Compartimentos onde são armazenados um conjunto de contentores num navio.

² Entenda-se por *overstow* um bloqueio de um contentor que deve ser descarregado, num dado destino, por um outro contentor com destino posterior.

Martin et al. em 1988 (Martin Jr *et al.*, 1988), criaram um algoritmo para o MBPP que tinha como objetivo a minimização do número de movimentações longitudinais em unidades de tempo, das gruas portuárias e o número total de *overstows* dos contentores. O modelo elaborado considera restrições de estabilidade, limites de comprimento do *bay*³ (Figura 5), restrições de peso e contentores de refrigeração para transporte. A alocação da carga é efetuada segundo as previsões do número de contentores nos portos, de forma a minimizar os *overstows*. A heurística construtiva do modelo utiliza estratégias de construção idênticas ao planeamento manual efetuado inicialmente.

A programação dinâmica é outro método de resolução que pode ser aplicado ao CSP. Por exemplo, Aslidis (Aslidis, 1989) resolveu este problema minimizando o número de *overstows* através da aplicação de um algoritmo de programação dinâmica. O princípio utilizado no algoritmo de programação dinâmica é baseado nas características do problema que é decomposto em sub problemas de menor dimensão. A alocação é feita de forma probabilística e são consideradas restrições como a estabilidade do navio.

A configuração dos contentores no navio, isto é, os planos de alocação dos contentores no navio, cresce de forma exponencial à medida que aumenta o número de posições disponíveis para essa mesma alocação. Exemplo disto é o estudo efetuado por (Botter *et al.*, 1992) onde é referido que para 1000 TEU, existem mais de 10^6 possibilidades de alocação. Desta forma não é possível obter num tempo computacional aceitável uma solução ótima para problemas de grande dimensão (Wei-ying *et al.*, 2005), quando se utilizam métodos exatos.

Botter e Brinati (Botter *et al.*, 1992), desenvolveram um modelo matemático que designaram por “*complete mathematical model*”, para o problema de planeamento da estiva. Neste modelo são utilizadas variáveis booleanas para determinar a sequência em que os contentores são carregados e descarregados nos portos. A função objetivo do modelo divide-se em duas partes, sendo uma delas a correspondente à minimização do número de *restowing*⁴ e a outra parte correspondente à minimização do número de movimentações dos guindastes ao longo do cais, durante as operações de carga e descarga dos contentores. Devido ao elevado tempo computacional, uma forma que os autores criaram para reduzir a complexidade do problema foi a decomposição do modelo, mas mesmo assim não conseguiram resolver o problema num tempo polinomial.

³ Entende-se por *bay*, como sendo o segmento horizontal à superfície do navio (Y. Liu *et al.*, 2010).

⁴ Sinónimo de *overstow*



Figura 5 Tipologias de posição no cais Bay - Row – Tier (<http://www.containerhandbuch.de>, 2012)

Ao longo do tempo, foram vários os autores que tentaram resolver o problema MBPP ver por exemplo, através de modelos exatos (Avriel *et al.*, 1993; Botter *et al.*, 1992), recorrendo a modelos de programação matemática. Contudo este tipo de modelos mostraram-se inviáveis para problemas práticos devido ao excessivo tempo computacional para a obtenção de soluções ótimas.

Avriel *et al.* em 1998 (Avriel *et al.*, 1998) apresentaram um estudo onde resolveram o problema CSP, com o objetivo de minimizar o número de *overstows*, através do algoritmo “*Suspensory heuristic procedure*” onde a atribuição dos *slots* é feita de uma forma dinâmica e o procedimento termina com a criação do plano de alocação. A ideia da aplicação deste algoritmo surgiu na sequência da heurística “*whole columns heuristic procedure*” anteriormente desenvolvida pelo mesmo autor em 1993 (Avriel *et al.*, 1993), que tinha como objectivo minimizar o número de *overstows*. Esta heurística (“*whole columns heuristic procedure*”) necessitava da resolução de um modelo binário linear depois de algum pré-processamento dos dados. Este procedimento demorava bastante tempo, em termos computacionais, e não se mostrou viável para instâncias reais. Tentando solucionar este problema, em 1998, Avriel apresentou a abordagem *Suspensory heuristic procedure* que permitiu a resolução de instâncias maiores do que as solucionadas com o método anterior. Neste trabalho, para além desta heurística, o autor apresenta um modelo de programação linear binária que permite obter a solução ótima para instâncias com uma única *bay*. Neste problema a sequência de visita dos portos é previamente conhecida e o modelo simplesmente determina a alocação dos contentores no navio. O modelo foi implementado usando o *software* GAMS. No entanto, provou que a utilização deste modelo era bastante limitada devido ao grande número de variáveis binárias e restrições do problema. Esta heurística apesar de gerar boas soluções em tempos computacionais reduzidos, foi alvo de simplificações. A desvantagem é que só foi possível obter soluções para problemas de pequena dimensão.

Em 1998, Ambrosino and Sciomachen (Sciomachen *et al.*, 2007) apresentam sistemas de apoio à decisão para o MBPP, onde as restrições foram definidas e caracterizadas para que o espaço de soluções viáveis fosse definido sem a utilização de uma função objetivo.

Posteriormente em 2000, Wilson e Roach (Assad, 1988; Wilson *et al.*, 2001) demonstram o potencial da aplicação de inteligência artificial ao CSP.

Avriel *et al.* em 2000 (Avriel *et al.*, 2000), apresentam um estudo onde elaboram um plano de estiva para um porta-contentor, onde o principal objetivo é a minimização do custo de *shift*. Neste estudo demonstram a relação existente entre o problema de estiva e o *coloring of circle graphs problem*. O autor mostra que o problema em causa é do tipo *NP-Completo*. A obtenção dos limites inferiores e superiores para o número de colunas permite elaborar um plano de estiva num tempo computacional aceitável e obter um plano sem *shifts*. Encontrado o número mínimo de colunas para zero *shifts* considera-se que foram encontrados os *coloring of circle graphs*.

Em 2001, Wilson *et al.* (Assad, 1988; Wilson I. D. *et al.*, 1999; Wilson *et al.*, 2001) apresentaram abordagens heurísticas para a resolução do CSP. Estas abordagens são baseadas em técnicas de otimização combinatoria como por exemplo, heurísticas de pesquisa local. O estudo consistiu em dividir o processo de alocação de contentores em duas fases, a fase estratégica e a fase de planeamento tático. A metodologia adotada pelos autores permitiu redefinir progressivamente a gestão dos contentores no espaço de carga dos porta-contentores. As soluções obtidas apesar de não serem ótimas são soluções obtidas em tempo de computação aceitável. Neste trabalho o autor, demonstra a complexidade do problema. Na fase estratégica são considerados os seguintes objetivos:

- i) Minimização do número de espaços de carga ocupados por cada porto de destino;
- ii) Maximização do número de guindastes em operação em cada porto marítimo;
- iii) Minimização do número de escotilhas movimentadas;
- iv) Minimização do número de *rehandles*⁵;
- v) Minimização do número de blocos de carga ocupados pelos contentores.

De forma a resolver esta primeira fase é utilizada a metodologia *Branch and Bound*, abordagem de pesquisa útil para resolução de métodos de otimização discreta. Numa segunda fase (fase de planeamento tático), considerando a melhor solução obtida na fase anterior é aplicada a Meta-Heurística de pesquisa tabu. O pré planeamento ocorrido na fase estratégica reduz o espaço de pesquisa de soluções, desta segunda fase, fazendo com que a convergência para a solução ótima, através da pesquisa tabu, seja mais rápida e conseqüentemente o tempo computacional é menor. Esta pesquisa é feita considerando os seguintes objetivos:

- i) *Rehandles* têm de ser minimizados;
- ii) Colocação dos contentores mais pesados a um nível inferior;
- iii) Minimização das pilhas de contentores com contentores para vários portos marítimos.

⁵ *Rehandles* – sinónimo de *shift*.

Haghani and Kaiser em 2001 (Haghani A *et al.*, 2001) desenvolveram uma heurística semelhante à de (Martin Jr *et al.*, 1988), com o objetivo de minimizar o número de *overstows* de contentores, mas introduziram também a restrição de estabilidade do navio aquando das operações de carga/descarga/*shift*.

Dubrovsky et al. (Dubrovsky *et al.*, 2002), em 2002, utilizaram algoritmos genéticos de forma a minimizar o número de movimentos que um contentor realiza, permitindo assim fornecer ao planeamento de alocação soluções eficientes, onde critérios como a estabilidade do navio foram tidos em consideração. Desta forma os autores conseguiram obter soluções em tempo computacional aceitável para o transporte de 1000 contentores. A utilização do Algoritmo Genético teve como intuito obter soluções para problemas de grande dimensão. Com a utilização do Algoritmo Genético, os autores reduziram o espaço de pesquisa e consequentemente o tempo de convergência para o ótimo através do método utilizado para a codificação das soluções.

Em 2004, Giermsch (Giermsch, 2004) abordou o problema de planeamento de estiva usando matemática discreta nas operações de pesquisa efetuadas pelas heurísticas. Esta introdução da matemática discreta teve como objetivo estimular a discussão de métodos avançados para a obtenção de soluções neste problema. A discussão elaborada pelo autor teve como finalidade quatro pontos:

- i) Como se classifica um problema de planeamento de estiva;
- ii) Como se alteram os algoritmos para resolver o planeamento de estiva;
- iii) Obtêm-se informação através de pequenos itens ou de grandes conjuntos de itens;
- iv) Após estas alterações como se comporta em termos de desempenho a heurística.

Ambrosino et al. (Ambrosino *et al.*, 2004) apresentaram um método de resolução para o CSP onde o problema tem por base a alocação de contentores nos navios considerando o seguinte conjunto de restrições:

- i) Restrição de estrutura do navio: o tipo, tamanho e peso dos contentores têm de ser respeitados para a existência de um equilíbrio estrutural. Para tal é necessário a utilização de contentores *Standard*.
- ii) Restrição de capacidade e de suporte: o conjunto de contentores não podem ultrapassar em peso a capacidade do navio, e o peso dos contentores tem de ser distribuído uniformemente ao longo mesmo. Cada *bay* não pode ter peso superior à *bay* que se encontra numa localização inferior (Y. Liu *et al.*, 2010).
- iii) Restrições de afetação de contentores a *slots*: relacionam-se com a existência de locais específicos para alocação de contentores específicos. Por contentores específicos entende-se os contentores que necessitam de refrigeração e os contentores que transportam materiais ou produtos perigosos (*hazardous*).
- iv) Utilização da regra LIFO (*Last In, First Out*) para carga dos contentores no navio.

Para a resolução do CSP, foi utilizado um modelo de programação linear inteira mista. A função objetivo desenvolvida pelos autores tem como finalidade a minimização do tempo total de estiva. A formulação do problema assume que a viagem se inicia num determinado porto onde, se efetua o carregamento de contentores e nos portos que irá visitar posteriormente só efetuará descargas de contentores. O problema foi abordado em três fases. Na primeira fase, foi efetuado um pré processamento das instâncias de forma a reduzir a região de soluções admissíveis. Na segunda fase foi efetuado um pré-processamento da estiva, para que esta fosse planeada de acordo com o destino dos contentores. Por fim na terceira fase, foi efetuado a resolução do *MBPP*, de acordo com os dois pontos anteriores. As duas etapas iniciais permitiram a relaxação de restrições para ser possível a aplicação do modelo exato.

Wei-ying et al. (Wei-ying *et al.*, 2005) referem que os métodos de resolução algorítmicos existentes até à data de 2005 eram ineficientes em termos de tempo computacional. Neste estudo, é apresentada uma resolução em duas fases, de forma a reduzir o tempo computacional (Wei-ying *et al.*, 2005). Na primeira fase da abordagem é efetuada a gestão da alocação geral e só são considerados os contentores que apresentam características homogéneas. Nesta fase, o problema abordado é designado por “*Bin Packing Problem*” (BPP). O conceito de BPP é aplicado quando o número dos itens a transportar é superior à capacidade da *slot* (ou *bin*). Sendo assim torna-se necessário repartir os itens de forma a alocá-los no menor espaço possível (Wei-ying *et al.*, 2005). Na segunda fase é feita a alocação dos contentores a locais específicos para que sejam respeitadas restrições de altura e a regra LIFO, tendo como objetivo a minimização de *overstows*.

Ambrosino et al. (Ambrosino *et al.*, 2006), desenvolveram um algoritmo que trata do planeamento da alocação de carga, onde o principal objetivo é a minimização do tempo total de estiva, considerando restrições de peso, tamanho e estabilidade, sendo esta dependente da distribuição dos contentores. Para tal os autores utilizaram numa primeira fase um algoritmo de pesquisa em árvore - que divide o navio em várias partes e associa contentores a “*bays*” mas sem especificar a sua posição. A solução ótima foi calculada recorrendo à programação linear inteira mista. Após a determinação da solução ótima, podem ser efetuadas trocas de posições onde se encontram os contentores, através de pesquisa local, de forma a melhorar a estabilidade do navio. Neste problema considera-se que o navio parte de um porto inicial com destino a vários portos e que nesses portos só efetua descargas de contentores. As soluções encontradas pelo algoritmo apresentam um bom desempenho em termos da qualidade das soluções e dos tempos computacionais.

Em 2006, Imai et al. (Imai *et al.*, 2006) concentraram-se num estudo sobre a alocação e planeamento de carga em porta contentores, que tem como principal restrição garantir a estabilidade do navio e apresenta como função objetivo a minimização do número de *rehandles* de contentores. O estudo apresenta uma utilidade restrita uma vez que se foca apenas nos *rehandles*. O problema foi definido com um modelo de programação inteira multiobjetivo. Quando não existe *rehandles* as soluções geradas são obtidas em tempos computacionais aceitáveis. No

entanto quando aplicado o Algoritmo Genético para o cálculo de uma melhor solução o tempo computacional já passa para um nível não aceitável, muito elevado.

Sciomachen & Tanfani em 2007 (Sciomachen *et al.*, 2007), elaboraram um estudo onde consideraram o CSP como um *BPP* tridimensional e apresentam uma heurística onde a função de avaliação consiste na maximização da produtividade do guindaste num terminal. Esta função foi assim definida com base na relação entre o *MBPP* e o *BPP*. Aqui os itens são contentores e a *slot* (ou *bin*) é apenas uma. Avaliando o plano de estiva gerado, outro objetivo pretendido é a verificação do plano com o desempenho do guindaste. Dito de uma outra forma, pretende-se avaliar se o plano de estiva influencia o desempenho do guindaste. A solução proposta pelos autores apresenta bons desempenhos em termos de qualidade de solução e de tempo computacional.

Chang & Liao, em 2008 (Chang *et al.*, 2008), desenvolveram um estudo onde abordam o problema de rotas com entregas e recolhas em conjunto com o problema de planeamento de estiva. O objetivo é encontrar o caminho mais curto para a entrega e/ou recolha de produtos, considerando restrições de capacidade que não podem ser violadas. Devido à sua complexidade, este problema classifica-se como NP-difícil. De maneira a clarificar o problema Chang & Liao decidiram dividir o problema em duas partes: numa primeira parte efetuaram o cálculo da rota e na segunda parte trataram o problema de planeamento da estiva de acordo com a rota encontrada na primeira parte. O modelo matemático é um modelo de programação linear binária.

Gumus *et al.*, em 2008 (Gumus *et al.*, 2008), desenvolveram uma heurística que se decompõe em várias fases. Os modelos desenvolvidos têm em conta as várias especificidades do mundo real. O principal objetivo foi o de desenvolver uma ferramenta de suporte à decisão para se incorporar no *software* de cálculo dos planos de estiva. A abordagem efetuada pelos autores foi a de decompor o problema em quatro fases. A primeira fase está relacionada com a eficiência dos guindastes no porto marítimo. Nesta fase foi escolhida a pior situação, a situação que apresentava maior número de *overstows*, e minimizou-se estes. Na segunda fase é feita uma nova minimização do número de *overstows*. Por fim na terceira e quarta fase é elaborado o plano de estiva. Nas duas primeiras fases os contentores são agregados consoante o porto de destino. O principal objetivo das duas primeiras fases foi o de abranger qualquer problema de teste, independentemente do tamanho. Em cada fase o *output* gerado é utilizado como *input* na fase seguinte. Esta abordagem apresentou bons resultados para instâncias de problemas reais.

Zhang *et al.* (W.-y. Zhang *et al.*, 2008) apresentam um conjunto de características que devem ser tidas em conta para a resolução do CSP:

- i) Dados referentes aos contentores - número de contentores a transportar, características dos contentores, posição dos contentores no cais de embarque e qual o porto de destino;
- ii) Estrutura e desempenho do navio – comprimento, largura e altura do navio, número de contentores com dimensões *standard* (20ft e 40ft);
- iii) Estabilidade no transporte - distribuição dos contentores dentro do navio;
- iv) Minimização dos custos de movimentação de contentores;

- v) Alocação de locais específicos para contentores específicos.

Martins et al. (Martins *et al.*, 2009) procederam a um estudo que teve como objetivo validar e comparar diferentes abordagens para a resolução do *CSP* em problemas marítimos de curta distância. Para tal, numa primeira instância, os contentores foram agrupados por destino usando o método *Branch- and-Bound*, tendo como objetivo reduzir o número de *overstows* e movimentos da escotilha do navio. Numa segunda fase foi aplicada a Meta-Heurística Pesquisa Tabu, tentando mover os contentores e aloca-los a uma *slot* específica de forma a reduzir as realocações, tendo sempre em consideração a estabilidade do navio (Martins *et al.*, 2009).

Chou & Ding apresentaram um modelo de programação inteira mista para o problema de planeamento de alocação de contentores apenas com a restrição de acessibilidade, com o objetivo de minimizar o número de *shifts*. O algoritmo heurístico proposto é mais eficiente em termos de tempo do que o algoritmo desenvolvido por Avriel (Avriel *et al.*, 1993) ("*Suspensory heuristic procedure*") quando se aumenta o número de portos a visitar e também a capacidade do navio. A heurística consiste numa série de matrizes que constituem o planeamento de estiva, onde é informado o estado de cada *bay* à saída do porto marítimo. Este algoritmo é aplicável ao problema de planeamento de estiva para *bay's* não retangulares e para *bay's* múltiplos. São gerados planos baseando-se apenas na informação dos pedidos de cada porto.

As dificuldades associadas à resolução de problemas de otimização combinatória são tais que a aplicação de algoritmos exatos para cálculo da solução ótima, está normalmente comprometida, sendo estes muito dispendiosos em termos de tempo computacional, para serem aplicáveis (Wilson I. D. *et al.*, 1999). A utilização de modelos exatos, recorrendo a algoritmos de programação inteira mista, incorpora no modelo matemático um aumento exponencial de tempo computacional, tal como referido, sendo assim difícil obter uma solução ótima em tempo aceitável. A literatura existente considera apenas o problema de alocação de contentores, existindo sempre uma rota já pré-definida.

De seguida efetua-se a análise do trabalho de (Y. Liu *et al.*, 2010) que desenvolveram um sistema de apoio à decisão, que utiliza os dois problemas abordados neste trabalho de forma separada. O sistema de apoio à decisão é aplicável ao campo do transporte marítimo. O sistema de apoio à decisão tem como denominação PROFITS (*Profit Optimization for Internacional Transportation Service*) e é composto por seis módulos: previsão da procura, planeamento da estiva, otimização da linha de envio, preços por *slot* e alocação, distribuição de contentores e uma análise do contributo. Para tal utiliza como métodos de suporte:

- i) *Exponential smoothing*;
- ii) *Regression analysis*;
- iii) *Neural Networks*;
- iv) *Linear Programming*;
- v) *Genetic algorithms*;
- vi) *Sequence alignment methods*.

O *software* desenvolvido utiliza uma abordagem heurística que contém duas funções. A primeira função possui como base a capacidade de transporte, utilizando o algoritmo genético para gerar rotas. A segunda baseia-se no *Sequence alignment methods* para comparar duas rotas diferentes. Uma das rotas poderá ser utilizada como rota do navio. No entanto a comparação entre rotas é efetuada sempre que se gerarem novas rotas. Geradas todas as rotas possíveis é atribuída uma identificação a cada uma delas. A alocação para cada rota é efetuada segundo a ordem da rota. Efetuando uma análise comparativa entre o trabalho de (Y. Liu *et al.*, 2010) e o trabalho desenvolvido nesta dissertação, verifica-se que neste caso é apresentado um modelo exato para o CSSRP, enquanto no trabalho de (Y. Liu *et al.*, 2010) o problema é resolvido recorrendo a heurísticas meta-heurísticas de melhoramento de solução e que ao passo que Liu resolvem o problema em 2 etapas separadas, neste trabalho o problema de VRP e de CSP são resolvidos de modo integrado.

2.4 Vehicle Routing Problem

O problema de rotas para veículos, Vehicle Routing Problem, é um problema que tem sido estudado com bastante interesse nas últimas três ou quatro décadas. Na base do VRP está o problema do caixeiro-viajante (TSP), onde um caixeiro tem de visitar um conjunto de cidades e retornar à cidade inicial. O objetivo do TSP é a minimização da distância total percorrida pelo caixeiro-viajante.

Segundo Martins *et al.*, 2009, a sequência de portos a visitar pode ser vista como um problema de Caixeiro-Viajante, e ser resolvido de modo exato desde que o número de portos seja reduzido e as alternativas possíveis sejam em pequena escala para que assim se possa obter uma solução em tempo computacional aceitável (Martins *et al.*, 2009).

Seguindo esta ideia, e tendo em consideração que o VRP é uma generalização do TSP, considera-se que um determinado número de portos (clientes) cada um com uma determinada encomenda (contentores) deve entregar estes contentores com uma frota de navios (veículos). Cada navio inicia o seu percurso num porto, entrega as encomendas a um subgrupo de portos e retorna ao mesmo porto descrevendo uma rota (A. Moura, 2005).

No VRP típico, cada uma das rotas, deve satisfazer um determinado número de restrições. Por exemplo, a quantidade de encomendas entregues não deve exceder a capacidade do veículo e deve existir um limite de tempo no percurso total da rota. Fundamentalmente a resolução do VRP traduz-se na decisão sobre quais os clientes a serem visitados pelo veículo, e por que ordem, de forma a que todos os pedidos dos mesmos sejam satisfeitos, sem violação de restrições, e os objetivos sejam otimizados.

Em contextos reais de distribuição existe um conjunto adicional de restrições que complicam o modelo. Um exemplo dessas restrições está relacionado com a limitação temporal da visita a um cliente, denominada por janelas temporais. Problemas que considerem janelas

temporais nos clientes são referidos na literatura por problemas de rotas para veículos com janelas temporais (VRPTW). No VRPTW os clientes têm de ser servidos dentro de um determinado período de tempo ou janela. É possível existir mais do que uma janela temporal para o mesmo cliente, o que se designa por janelas temporais múltiplas. Nestes casos os clientes têm mais do que um período em que podem ser visitados pelos veículos (A. Moura, 2005).

No caso da distribuição marítima, pode-se fazer um paralelismo entre janelas temporais e prazos de entrega dos contentores. Neste caso poderemos considerar uma janela temporal cujo início é a hora (ou o dia) de saída do navio do porto inicial e o fim da janela temporal a hora (ou o dia) em que o contentor tem obrigatoriamente de ser entregue no porto destino.

Além das janelas temporais existem muitas outras características relacionadas com o VRP. Por exemplo, recolha de vasilhame, armazéns múltiplos, encomendas estocásticas, veículos heterogéneos, etc.. De acordo com estas características o VRP pode ter várias classificações. Existem muitas publicações que descrevem o VRP e respetivas variantes do problema. São exemplo os artigos de (Assad, 1988; Bodin *et al.*, 1981; Fisher, 1995; Laporte, 1992; Laporte *et al.*, 1987). Estes artigos, além da descrição do problema apresentam também formulações, heurísticas e/ou métodos exatos para a sua resolução.

3. Problema CSSRP (Container Stowage Ship Routing Problem)

Com este capítulo pretende-se descrever e caracterizar o problema CSSRP e apresentar o modelo desenvolvido. Na secção 3.1 é descrito e caracterizado o CSSRP. Em seguida, na secção 3.2, apresenta-se o modelo de programação inteira mista e a caracterização das restrições que o constituem.

3.1 Caracterização do problema CSSRP

O CSP é descrito como sendo um problema de alocação, onde um conjunto de contentores com um determinado porto de destino, e diferentes características, é alocado nas *slots* de um porta-contentores. A resolução deste problema foca-se principalmente na minimização dos custos de transporte. No entanto, a alocação dos contentores é feita recorrendo a rotas pré-definidas. Para se cumprir o objetivo é necessário minimizar os tempos que os navios passam em cada porto, uma vez que por norma são sempre bastante grandes e conseqüentemente dispendiosos. É recorrente que nos portos marítimos ocorram operações de carga/descarga/realocação de contentores. Estas operações ocorrem, devido a fatores como:

- i) Carga de contentores para expedição;
- ii) Descarga de contentores, porque chegaram ao porto de destino;
- iii) Ocorrência de *overstow*, o que implica efetuar *shifts*;
- iv) Garantia da manutenção da estabilidade do navio o que, implica efetuar *shifts*.

Esta componente de movimentação de contentores, tem um grande peso no tempo despendido num porto, logo um grande peso na função objetivo do CSP. No entanto, e como já referido anteriormente, o CSP só se preocupa com a alocação dos contentores de acordo com uma determinada ordem de visita a um conjunto de portos. Mas para minimizar um custo de distribuição, deve-se ter em consideração não só a alocação ótima dos contentores mas também a rota ótima dos navios, porque um problema está intrinsecamente dependente do outro. Desta forma surge a necessidade de integrar estes dois problemas (planeamento de rotas e alocação de contentores).

Esta integração é feita com *Container Stowage Ship Routing Problem*. Este problema tem como objetivo a minimização dos custos de distribuição de um determinado número de contentores, para um conjunto de portos de destino. Para se alcançar este objetivo é necessário minimizar a distância percorrida pelos navios, os custos de utilização dos navios e o número de *shifts* efetuados em cada um dos portos.

O CSSRP pode ser então definido da seguinte forma: considerando um conjunto de navios e um conjunto de contentores cujos destinos são um conjunto de portos, este deve alocar a carga nos navios e escolher a rota a efetuar para a entrega da carga de modo a minimizar os custos totais de transporte, através da minimização de distâncias, tempos de serviço e operações de carga/descargas desnecessários, considerando e garantindo as seguintes restrições:

- i) Restrições de capacidade dos navios;
- ii) Restrições de suporte dos contentores;
- iii) Restrições de prazo de entrega dos contentores;
- iv) Consideração da regra de LIFO.

Os navios devem sair do porto inicial onde são efetuadas apenas operações de carga e tem de visitar um conjunto de portos onde só são efetuadas operações de descarga (para entrega dos contentores) e operações de realocação de contentores (*shifts* - quando necessário). Além

disso, são também consideradas, várias restrições, umas relacionadas com as próprias características dos navios, outras inerentes ao problema de rotas e um outro conjunto inerente ao problema de carga e descarga de contentores.

A integração do problema de planeamento de rotas com o problema de planeamento de estiva introduz uma flexibilidade e eficiência ao CSSRP.

O problema CSSRP, em termos operacionais apresenta duas decisões fulcrais: a determinação de que portos devem ser visitados por cada navio e quando ocorre essa visita, e a determinação da alocação dos contentores no navio respeitando a estratégia LIFO. Logo, pretende-se determinar a rota que minimiza os custos totais de distribuição e que minimiza as descargas/cargas intermédias.

Como já referido, a grande maioria dos custos no “*Short Sea Shipping*” está relacionada com a movimentação dos contentores nos portos. Isto porque o tempo de permanência de um navio num porto é bastante dispendioso, logo quanto menos tempo demorarem as operações de carga/descarga, menor é o custo de permanência. Com isto é de extrema importância, saber qual a posição dos contentores no porta-contentores. Encontrada a *slot* específica para cada contentor encontra-se o planeamento que minimiza o número de *shifts*. De uma outra forma pode-se afirmar que o planeamento da estiva influencia as movimentações no porto já que os tempos despendidos e os custos em cada porto dependem deste.

Os custos que normalmente são incorridos no transporte em porta-contentores, durante uma viagem, que se encontram dependentes das unidades de tempo, são:

- i) Tarifas portuárias de espaço ocupado pelo navio;
- ii) Custos com a tripulação;
- iii) Custos operacionais.

O tempo de distribuição, que se pretende minimizar, depende dos tempos de:

- i) Atracação;
- ii) Carga/ descarga;
- iii) *Shift*;
- iv) Duração da viagem.

Um *shift* ocorre, porque o contentor está alocado numa *slot* que está a barrar o acesso a uma outra, logo é necessário colocar este contentor noutra localização ou retirá-lo para o cais e voltar a colocá-lo no porta-contentor. Um *shift* demora bastante tempo logo a sua minimização é muito importante, sendo para tal necessário um planeamento de estiva eficiente. O rearranjo da carga deve também ser tido em conta isto porque em cada porto, existem vários contentores que podem ter de ser movimentados, forçando a uma modificação do plano de estiva. Fatores que levam a que o plano de estiva tenha de ser modificado são:

- i) Contentores que tem de ser descarregados pois chegaram ao seu porto de destino, logo é necessário reorganizar a carga para que a estabilidade seja garantida;

- ii) Movimentos de *shift*, o que implica um reposicionamento do contentor numa outra posição, sempre diferente da posição inicial, garantindo também a estabilidade do porta-contentor.

O desafio deste trabalho foi, desenvolver um modelo de programação inteira mista e aplicá-lo a problemas reais (problemas de distribuição marítima de curta distância) sendo esta a principal contribuição do presente trabalho.

3.2 Modelo de Programação Inteira Mista para o problema CSSRP

Nesta secção apresenta-se o modelo de programação inteira mista desenvolvido para o problema CSSRP. Este modelo visa a determinação de uma solução ótima que minimize os custos de distribuição e o número de *shifts*. Isto é, vai permitir a gestão da frota de dois ou mais porta-contentores, que se movimentam entre vários portos, respeitando sempre os prazos de entrega dos contentores. A minimização dos tempos de execução das rotas e a alocação das cargas nos navios, respeitando a regra LIFO, tem de ser cumprida para que possa existir uma minimização de *overstows* e consequentemente de *shifts*, assim como uma minimização dos custos totais de distribuição.

O número de *overstows* encontra-se diretamente ligado à rota. Tal como referido na secção anterior, secção 3.1, o modelo em questão apenas efetua o carregamento dos contentores no porto inicial e nos seguintes efetua apenas descargas (excetuando situações de *shifts*).

Para a elaboração do modelo foram consideradas várias restrições: restrições relacionadas com a rota, restrições relacionadas com os porta-contentores e restrições relacionadas com ambos.

As restrições das rotas, são relativas aos prazos de entrega dos contentores e à constituição da rota. A restrição de prazo de entrega implica que o instante de chegada do porta-contentores ao porto deve ser menor ou igual ao prazo de entrega dos contentores para esse mesmo porto. De forma a simplificar o problema, foi considerado que todos os contentores com o mesmo destino possuem a mesma data de entrega. Seria o mesmo que considerar o menor dos prazos de entrega dos contentores para esse porto. Quanto às restrições relacionadas com os porta-contentores, temos: restrições de capacidade do navio e restrições de posicionamento dos contentores no mesmo. A restrição de capacidade é o limite máximo de peso admitido pelo porta-contentor. A restrição do posicionamento está relacionada com o posicionamento dos contentores nas *slots*. Isto é, um contentor só pode ser colocado numa *slot* que seja posicionada diretamente no casco do porta-contentores, ou então a *slot* imediatamente a baixo tem de estar ocupada. Para simplificação do problema foi considerado que cada conjunto de contentores com o mesmo porto de destino preenche uma única *slot*. Seria o mesmo que considerar o conjunto de *slots* necessárias para acomodar todos os contentores com um dado destino. Assim, nas restrições de posicionamento há ainda que garantir que numa dada *slot* apenas é colocada a carga de um dado destino.

Esta simplificação foi considerada, devido à grande complexidade dos posicionamentos dos *slots* de um porta-contentor como se pode constatar na Figura 6.

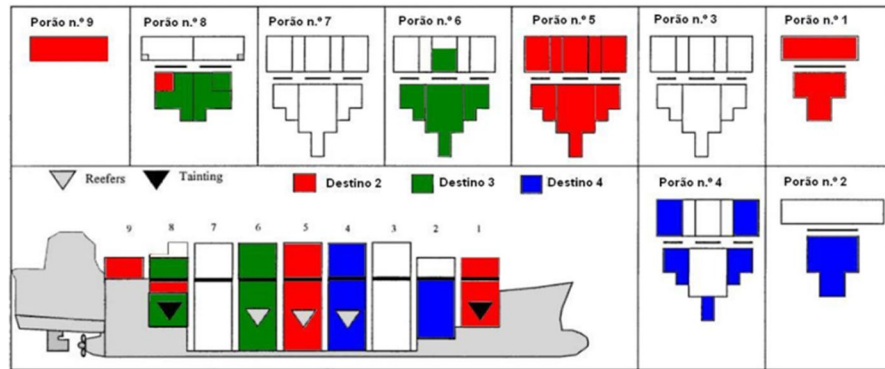


Figura 6 Constituição das slots de um porta-contentores (Martins *et al.*, 2009)

A restrição que relaciona o problema de rotas com o problema de alocação de cargas diz respeito à regra LIFO.

A explicação do modelo de programação inteira mista é feita de forma conceptual. Primeiro são apresentados todos os dados do problema, assim como todas as variáveis, em seguida é apresentado o modelo completo do CSSRP. Os dados do modelo foram divididos em quatro grupos que se apresentam nos pontos seguintes.

1. Dados do porto

Cada porto encontra-se numa localização geográfica diferente e é representado por um conjunto de nós através de um grafo $G(P, A)$, onde $P = \{1, \dots, p\}$ representa o conjunto de portos e $A = \{(i, j) : i, j \in P, i \neq j\}$ o conjunto de arcos em G . O comprimento de cada arco está associado a d_{ij} que corresponde à distância entre o porto i e o porto j em milhas náuticas. u_{ik} é o custo de visita, em euros, no porto i pelo porta-contentores k , que depende das taxas e dos custos de utilização de cada porto marítimo. Assume-se que o porto inicial de onde parte o porta-contentores é o porto com índice um e o custo de visita deste mesmo porto marítimo também é contabilizado.

2. Dados dos porta-contentores

Os dados dos porta-contentores estão essencialmente relacionados com as suas características. $V = \{1, \dots, v\}$ é o conjunto de porta-contentores e, de forma a simplificar o problema, assume-se que a velocidade de viagem dos porta-contentores (vel_k) é constante ao longo de toda a rota. Considera-se também: o custo operacional de viagem c_k (por unidade de distância, em euros) que depende do custo de combustível/milhas náuticas; e o custo de utilização

do porta-contentores uc_k que depende do número de tripulantes a bordo no porta-contentores (por dia, em euros). Q_k é a capacidade do porta-contentores k em peso e t_{ik} é o tempo de serviço do porta-contentores k no porto i .

3. Dados dos contentores

Assume-se que todos os contentores possuem dimensões *standard* em TEU's. O porto inicial possui um conjunto de contentores $Cp = \{\alpha_i, \dots, \alpha_p\}$ que devem ser entregues a vários portos de destino. Cada porto marítimo possui uma procura α_i definida pelo número de contentores para o porto i . No entanto, e de forma a simplificar o problema, cada procura é caracterizada pelo seu peso total (q_i) e pela sua data de entrega (dl_i).

4. Dados da Carga/Posicionamento

Considera-se um único *bay* associado a uma matriz T_k de *slots*. Cada *slot* está posicionado numa linha que varia entre $1, \dots, Z$ onde a primeira linha corresponde à posição inicial a partir do topo da matriz e na coluna $x = \{1, \dots, X\}$ onde a primeira coluna é a coluna do lado esquerdo da matriz. Tal como já referido, cada *slot* corresponde um conjunto de contentores α_i para serem transportados do porto inicial para o porto i . A matriz de transporte é admissível se a carga total requerida pela estiva dos contentores não for superior à capacidade do porta-contentores. O custo de cada movimentação (*shift*), como já referido anteriormente é de extrema importância para o problema em questão sendo assim, m_α representa o custo incorrido no movimento de uma determinada carga que se encontra alocada numa *slot*. É de realçar que o *shift*, envolve um processo de carga e outro de descarga, logo o custo m_α é incluído duas vezes.

Modelo de programação inteira mista

De forma a construir o modelo, várias variáveis de decisão foram consideradas. Algumas das variáveis são exclusivas do problema de rotas, outras do problema de estiva e outras interligam os dois problemas. Como é típico de um problema de VRP, o modelo considera um conjunto de variáveis binárias, x_{ijk} que indicam se o porta-contentores k atravessa ou não o arco (i, j) . Os porta-contentores devem chegar aos portos dentro do prazo de entrega. Assim, s_{ik} é a variável de decisão que determina o instante de chegada do porta-contentores k ao porto i . Considera-se outro conjunto de variáveis binárias, y_{ijk} , que assumem o valor 1 se o porta-

contentores k visita o porto i depois de visitar o porto j e assumem o valor zero caso contrário. Estas variáveis são necessárias para garantir alocação dos contentores de acordo com a filosofia LIFO.

Outro conjunto de variáveis binárias, δ_{kizx} , são utilizadas para determinar em que *slot* (z, x) do porta-contentores k estão posicionados os contentores para um determinado porto i . Estas variáveis de decisão são necessárias para integrar o problema de rotas e o problema de estiva.

Como variável de decisão para determinar o número de *shifts* utiliza-se uma variável binária β_{ijk} que será igual a um se a procura do porto i e do porto j do porta-contentores k causam uma situação de *overstowing*.

De seguida é apresentado o modelo de programação inteira mista.

Função Objetivo:

$$\text{Min} \left[w_1 \sum_{k=1}^v \sum_{i=1}^p \sum_{j=1, j \neq i}^p (d_{ij} c_k x_{ijk} + x_{ijk} u_{jk} + x_{ijk} m_\alpha) + w_2 \sum_{k=1}^v u c_k s_{1k} + (w_3 \times 2 \times m_\alpha) \sum_{k=1}^v \sum_{i>1}^p \sum_{j>1, j \neq i}^p \beta_{ijk} \right] \quad (1)$$

Sujeito a:

Restrições de rota:

$$\sum_{i=1, i \neq j}^p \sum_{k=1}^v x_{ijk} = 1 \quad \forall j \neq 1 \in P \quad (2)$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^p \sum_{k=1}^v x_{ijk} = 1 \quad \forall i \neq 1 \in P \quad (3)$$

$$\sum_{i=1, i \neq j}^p (x_{ijk} - x_{jik}) = 0 \quad \forall k \in V, \forall j \in P \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^p x_{1jk} \leq 1 \quad \forall k \in V \quad (5)$$

$$s_{ik} + t_{ik} + \frac{d_{ij}}{vel_k} \leq s_{jk} + M(1 - x_{ijk}) \quad \forall k \in V, \forall i, j \in P \quad (6)$$

$$s_{ik} \leq dl_i \quad \forall k \in V, \forall i \in P \quad (7)$$

Restrições de carga:

$$\sum_{i=1, i \neq 1}^p q_i \sum_{j=1}^p x_{jik} \leq Q_k \quad \forall k \in V \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^v \sum_{z=1}^Z \sum_{x=1}^X \delta_{kizx} = 1 \quad \forall i \in P, i \neq 1 \quad (9)$$

$$\sum_{i>1}^p \delta_{kizx} \leq 1 \quad \forall k \in V, \forall z, x \in T_k \quad (10)$$

$$\delta_{kizx} \leq \sum_{j>1, j \neq i}^p \delta_{kjax} \quad \forall k \in V, \forall i \in P, i \neq 1, \forall z, a, x \in T_k, a > z \quad (11)$$

Restrições de rota e carga:

$$\sum_{i=1}^p x_{ijk} + \sum_{l=1, l \neq j}^p x_{jlk} \leq 1 + \sum_{z=1}^Z \sum_{x=1}^X \delta_{kzax} \quad \forall k \in V, \forall j \in P, j \neq 1 \quad (12)$$

$$s_{ik} - s_{jk} \leq M \times y_{ijk} \quad \forall k \in V, \forall i, j \in P, i \neq 1, j \neq 1, i \neq j \quad (13)$$

$$y_{ijk} + \delta_{kizx} + \delta_{kjax} \leq 2 + \beta_{jik} \quad \forall k \in V, \forall i, j \in P, i \neq 1, j \neq 1, i \neq j, \forall z, a, x \in T_k, a > z \quad (14)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, y_{ijk} \in \{0,1\}, \delta_{kizx} \in \{0,1\}, \beta_{jik} \in \{0,1\}, s_{ik} \geq 0$$

Como se pode verificar na equação (1), a função objetivo minimiza o custo da rota e o número de *shifts*. É atribuído um peso a cada componente da função objetivo: w_1, w_2, w_3 . O valor concreto destes pesos depende da aplicação prática a que o problema está sujeito e da importância que cada componente possui para o elemento de decisão. Na maioria dos casos o principal objetivo é o custo total, logo estas constantes tomam o valor um, para que se possa contabilizar todos os custos com igual importância.

A primeira componente da função objetivo, corresponde ao somatório dos custos de deslocação dos porta-contentores do porto i para o porto j com os custos de visita a esse porto e com os custos de movimentação da carga (carga e descarga dos contentores). A segunda componente corresponde ao somatório dos custos relacionados com a utilização do navio, custos estes que dependem do tempo total necessário para realizar a viagem. A última componente da função objetivo demonstra os custos ocorridos caso existam *shifts*.

Os primeiros seis conjuntos de restrições estão relacionados com o problema das rotas. As restrições (2), (3) e (4) são restrições de conservação de fluxo. As equações (2) e (3) asseguram que cada porto é visitado apenas por um único porta-contentores. A equação (4) assegura que se o porta-contentores chega a um determinado porto, então parte desse mesmo porto para outro porto. A equação (5) garante que se um porta-contentores é utilizado, então este inicia a sua viagem no porto marítimo inicial.

As equações (6) e (7) são relativas à restrição do prazo de entrega. Estas duas equações garantem a viabilidade dos tempos utilizados durante a viagem e nas operações ocorridas nos portos. O instante de partida do porta-contentores de um porto nunca pode ser inferior ao instante de chegada a esse mesmo porto, mais o tempo que este permanece no porto marítimo. M é uma constante de valor muito elevado. Por outro lado, a restrição (7) garante que o instante de chegada a um determinado porto nunca é superior ao prazo de entrega desse porto.

Relativamente aos conjuntos de restrições relacionadas com a estiva, a equação (8), está ligada à capacidade em termos de peso do navio. Aqui garante-se que o peso transportado ao longo da viagem pelo porta-contentores nunca é superior à sua capacidade máxima. As três restrições seguintes asseguram o posicionamento dos contentores. A equação (9) garante que a procura de um determinado porto é colocada apenas num determinado porta-contentores e num e um só *slot*. A equação (10) assegura que cada *slot* de um determinado porta-contentores transporta no máximo uma e uma só procura de um porto. A equação (11) garante que se a procura de um porto marítimo está numa determinada *slot* então a *slot* imediatamente abaixo dessa está ocupada.

A equação (12) integra os dois problemas. Esta garante que se um porta-contentores visita um determinado porto então a procura para esse mesmo porto encontra-se dentro do porta-contentores. De forma a garantir que a condição LIFO e que o número de *shifts* são minimizados, devem ser consideradas mais duas equações. Estas equações estão relacionadas com as restrições de *overstowing*. A equação (13) define o posicionamento dos portos na rota. Esta equação foi criada com o objetivo de determinar o número de *shifts*. A combinação desta equação com a equação (14) assegura a estratégia LIFO. A equação (14) assegura que se a carga para um determinado porto é alocada a uma *slot* e se por cima desta *slot* se encontra carga para um porto visitado mais tarde, então ocorre *overstowing*. Quando ocorre um *overstow* então um movimento de *shift* é efetuado.

4. Discussão, Validação e Teste do modelo

O presente capítulo é dedicado à validação do modelo de programação inteira mista e à discussão de resultados, através da resolução de algumas instâncias, assim como à análise do desempenho global do mesmo. Na secção 4.1 encontra-se a caracterização das instâncias utilizadas para teste do modelo e na secção 4.2 faz-se uma análise dos resultados obtidos.

4.1 Caracterização das Instâncias

O principal objetivo deste trabalho foi resolver o problema de “*short sea shipping*”, onde para tal aplicou-se o modelo desenvolvido no capítulo 3, a problemas reais.

As instâncias utilizadas para validar o modelo, foram adotadas do trabalho de (Martins *et al.*, 2009) onde é resolvido o problema de *short sea shipping*. Como o presente trabalho apresenta algumas diferenças em termos de estrutura do problema abordado foram efetuadas algumas alterações. Ao contrário do que se encontra em (Martins *et al.*, 2009) o problema em questão apenas considera as operações de carga no porto inicial (porto número 1), enquanto nos restantes portos só efetua descargas de contentores.

De forma a comprovar a robustez do modelo, foram geradas instâncias de várias dimensões. Como no trabalho realizado por Martins *et al.* o problema foi simplificado assumindo-se que:

- i) As tarifas portuárias são iguais independentemente do porto marítimo;
- ii) O consumo de combustível e a velocidade do porta-contentores é sempre a mesma independentemente da carga transportada.

Com o intuito de validar o modelo matemático desenvolvido para o problema CSSRP foram utilizadas 5 instâncias. No texto que se segue descrevem-se as características dessas instâncias.

As instâncias do problema diferem no número de portos, onde se utilizou $P = 5, P = 10, P = 15$. A razão pela qual se testou problemas com maior dimensão, 10 e 15 portos, ao contrário de (Martins *et al.*, 2009) que só testaram problemas com 5 portos, foi para testar o comportamento do modelo desenvolvido em termos de tempo computacional. Nas instâncias com 5 e 15 portos marítimos apenas se consideraram dois porta-contentores. Para a instância com 10 portos marítimos, considerou-se o número de porta-contentores igual a dois, três e quatro. O motivo pelo qual se realizou uma variação do número de porta-contentores para o mesmo número de portos ($P=10$), foi com o intuito de se estudar se a variação do tempo computacional, era muito significativa aumentando o tamanho da frota. Cada instância possui uma capacidade Q_k fixa para todos os porta-contentores e o peso total da procura dos portos $\sum_{i=2}^P q_i$ é superior à capacidade de cada porta-contentores. Isto significa que é necessário mais do que um porta-contentores para realizar a entrega das procuras de cada porto marítimo.

As distâncias utilizadas entre os cinco portos são as mesmas utilizadas por (Martins *et al.*, 2009), uma vez que correspondem a distâncias reais em milhas de portos marítimos europeus (Figura 7). Para a instância $P=10$, aproveitou-se as distâncias entre os 5 portos da instância $P=5$, e gerou-se aleatoriamente distâncias para os restantes cinco portos em falta. Para a instância $P=15$, optou-se pelo mesmo raciocínio anterior.

A capacidade máxima utilizada para as instâncias $P=5$, $P=10$ e $P=15$ foi a capacidade máxima utilizada por (Martins et al., 2009) ($Q_k=8445$) a qual corresponde também a uma capacidade real de um tipo de navios. Considerou-se este valor porque dos dois navios utilizados no estudo, o que tinha maior capacidade era o que podia transportar maior número de contentores. A velocidade do navio utilizada é a velocidade do navio com maior capacidade no estudo de (Martins et al., 2009), sendo também uma velocidade média real para este tipo de porta-contentores. A velocidade é assumida sempre constante independentemente da carga transportada e independentemente também das condições do mar. Foi uma simplificação utilizada para reduzir a complexidade do problema. Relativamente aos custos calculados para cada instância estes seguem a lógica de cálculo adotada por (Martins et al., 2009). Os tempos de serviço utilizados em cada instância encontram-se dependentes da procura de cada porto marítimo. A fórmula utilizada para o seu cálculo, foi também baseada no estudo de (Martins et al., 2009).

Quanto à distribuição dos contentores pelos portos marítimos esta varia consoante a distância a que estes portos se encontram do porto inicial. Para a instância $P=5$, foram atribuídas as seguintes percentagens, para o porto mais distante do porto inicial irão ser transportados 50% do número máximo de contentores que o navio suporta, 30% para o segundo porto mais distante, 10% para o terceiro mais distante e os restantes 10% para o porto mais próximo do porto inicial.

Para a instância $P=10$, as percentagens atribuídas à distribuição de carga foram de 20%-20%-20%-15%-5%-5%-5%-5%-5%, sendo a primeira percentagem correspondente ao porto mais distante do porto inicial e a última ao porto mais próximo do porto inicial. Para a instância $P=15$, a linha de raciocínio é a mesma que para $P=10$. Sendo as percentagens de distribuição de 30%-10%-5%-5%-5%-5%-5%-5%-5%-5%-5%-5%-5%-5%.

Cada contentor possui um determinado peso, podendo este ser de 8, 10, 15 ou 25 toneladas. Em cada instância o peso dos contentores varia. Para tal, para $P=5$, 50% dos contentores pesam 15 toneladas/contentor, 30% pesam 25 toneladas/contentor, 10% pesam 8 toneladas/contentor e 10% pesam 10 toneladas/contentor. Esta distribuição é efetuada de modo a que cada procura de um porto tenha contentores com um só peso. Para a instância $P=10$, 40% da carga tem um peso unitário de 10 toneladas, 30% tem um peso de 25 toneladas/contentor, 20% têm um peso de 15 toneladas/contentor e 10% tem um peso 8 toneladas/contentor. Para a instância $P=15$, 40% do número de contentores pesa 20 toneladas/contentor, 30% 10 toneladas/contentor, 15% 15 toneladas/contentor e 15% 8 toneladas/contentor.

A forma como varia a atribuição dos prazos de entrega é igual à forma como variam os pesos dos contentores, sendo os prazos de entrega possíveis 12, 8 e 5 dias. Logo para a instância $P=5$ 50% dos contentores têm um prazo de entrega de 8 dias, 40% com 12 dias de prazo de entrega e 10% com cinco dias de prazo de entrega. Para a instância $P=10$, 50% dos contentores tem um prazo de entrega de 12 dias, 30% 5 dias e os restantes 8 dias de prazo de entrega. Para a

instância P=15, 60% da carga transportada possui um prazo de entrega de 8 dias, 15% têm um prazo de 5 dias e os restantes 25% podem ser entregues até um máximo de 12 dias.

Nos problemas de 10 portos em que se utilizam 3 e 4 porta-contentores para efetuar o transporte, a distribuição de carga é efetuada da mesma forma que nas instâncias com 2 navios. No entanto o número de contentores a transportar duplica quando se utiliza três porta-contentores e triplica quando se utilizam os 4 porta-contentores. Isto efetuou-se com o intuito de serem sempre necessários os 3 ou 4 navios para a distribuição.



Figura 7 Mapa de um problema real de *short sea shipping* (Ana Moura *et al.*, 2012)

A figura 7 mostra os portos marítimos utilizados nos dados do estudo elaborado por (Martins *et al.*, 2009), isto é, para as instâncias com 5 portos.

Todos os portos marítimos possuem prazos de entrega apertados. Considera-se que os valores dos pesos da função objetivo w_1, w_2, w_3 são todos iguais a um. Esta consideração foi efetuada de forma a atribuir a mesma importância a cada componente da função objetivo. A primeira componente corresponde à distância total, a segunda ao tempo total de viagem e a terceira ao número de *overstows*.

4.2 Análise de Resultados

A forma como foi efetuada a introdução do modelo no *software* comercial utilizado (IBM ILOG CPLEX 12.4 *Academics*) encontra-se no Anexo 1, detalhadamente explicada.

As instâncias foram executadas no CPLEX, que se encontrava instalado num computador Intel CORE i7 vPro 2,2GHz com 8Gb de memória.

A implementação do modelo, forçou a que o método de tentativa-erro fosse adotado. Isto porque a formulação matemática teve de ser adaptada para que fosse funcional em *software*.

A implementação foi efetuada em duas partes: a criação dos dados e a implementação do modelo. Em termos de *software* os dados encontram-se num ficheiro do tipo *.dat* e as restrições do modelo matemático num ficheiro do tipo *.mod* (Anexo 2 e 3). Implementada a formulação

matemática na sua totalidade, foram efetuados vários testes para garantir a robustez do modelo. Estes testes tiveram como objetivo, fazer variar:

- i) O número de portos a visitar pelos porta-contentores;
- ii) O número de porta-contentores para efetuar a distribuição;
- iii) A distribuição da carga pelos portos;
- iv) A distribuição dos prazos de entrega dos contentores;
- v) Os pesos da função objetivo (w_1, w_2, w_3);

A título de exemplo, apresenta-se de seguida a solução obtida, Figura 8, para um exemplo com quinze portos e dois porta-contentores. Essa solução foi obtida em 957,85 segundos.

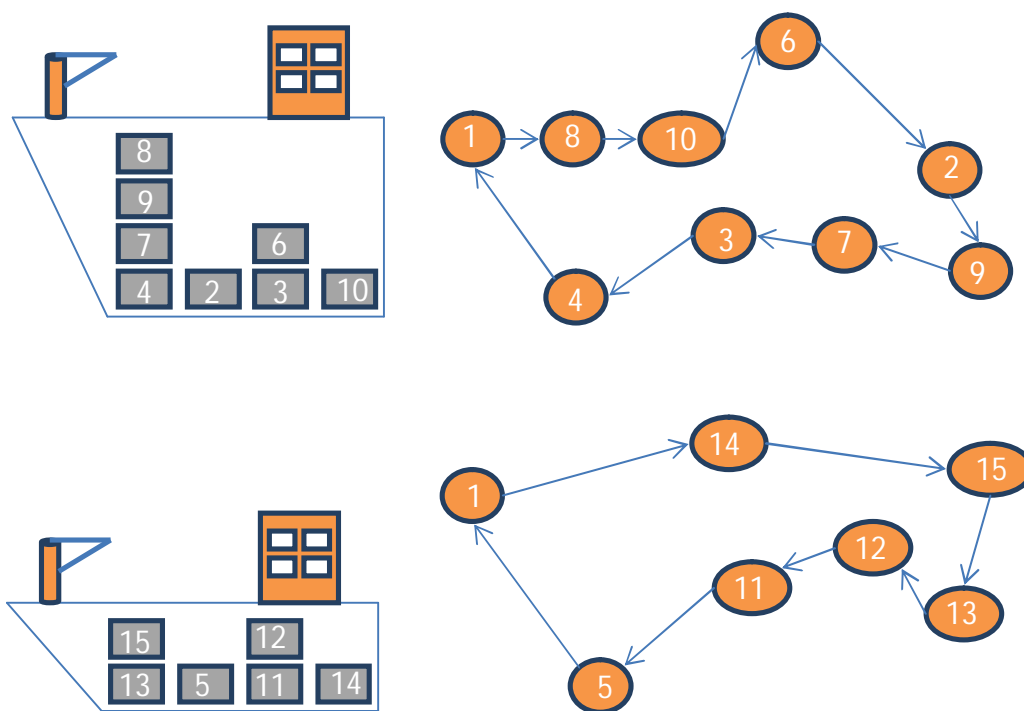


Figura 8 Solução gerada para 15 portos e 2 navios

A tabela 1 é um resumo dos resultados computacionais obtidos para as cinco instâncias geradas. A estrutura da tabela 1 permite verificar: o número de porta-contentores (V) utilizado encontra-se ligado ao número de portos marítimos (P) a visitar. É efetuada a interligação entre ($V= 2, 3$ e 4) e ($P= 5, 10$ e 15). Para as cinco instâncias geradas foram identificados os valores da função objetivo para o problema de programação inteira mista (PIM) e respetivo número de variáveis e número de restrições, bem como o tempo computacional de resolução para a obtenção da solução ótima. Nas colunas mais à direita da tabela 1, apresentam-se os valores da função objetivo após a resolução da relaxação linear (RL) e respetivo tempo computacional para a obtenção da solução.

Note-se que na relaxação linear do modelo todas as variáveis de decisão do tipo booleano (que no modelo de PIM assumiam o valor zero ou um) passam a poder assumir valores entre zero e um. O motivo desta alteração teve como intuito calcular o menor valor da função objetivo para uma dada instância, para ser utilizado na avaliação da qualidade do modelo de PIM. Para a avaliação da qualidade do modelo fez-se o cálculo dos GAPs de integralidade das instâncias geradas, cujos resultados se apresentam na última coluna da tabela 1. Como o modelo desenvolvido tem associada uma função objetivo de minimização, o GAP de integralidade é dado pela divisão, da diferença entre o valor da solução ótima inteira e o valor da solução ótima da relaxação linear, pelo valor da solução ótima inteira. No texto abaixo apresenta-se a expressão de cálculo do GAP de integralidade, onde Z_{pi}^* está associado à solução ótima inteira e Z_{rl}^* à solução ótima da relaxação linear.

$$GAP = (Z_{pi}^* - Z_{rl}^*) / Z_{pi}^* \quad (15)$$

Tabela 1 Resultados computacionais para as cinco instâncias de problema

Porta – contentores	Portos Marítimos	Função Objetivo PIM (€)	Tempo resolução PIM (s)	Nº de variáveis	Nº de restrições	Função Objetivo RL (€)	Tempo resolução RL (s)	GAP (%)
2	5	161560,61	1,65	181	424	79687,85	0,095	50,68
	10	224295,23	52,82	671	1909	167916,65	1,154	25,14
	15	362368,20	857,85	1657	10388	296716,70	0,930	18,12
3	10	282647,06	161,87	1006	2850	167916,85	0,445	40,59
4	10	330654,72	180,46	1341	3791	167916,85	1,127	49,22

De seguida são analisados os resultados das soluções obtidas. As soluções foram geradas em tempos computacionais que se podem considerar reduzidos.

Para o conjunto de problemas de teste o modelo obteve sempre uma solução ótima sem *overstows*.

Os gráficos 1, 2 e 3 mostram a variação do tempo computacional, do número de variáveis e do número de restrições com a variação do número de portos, para cada um dos problemas de teste.

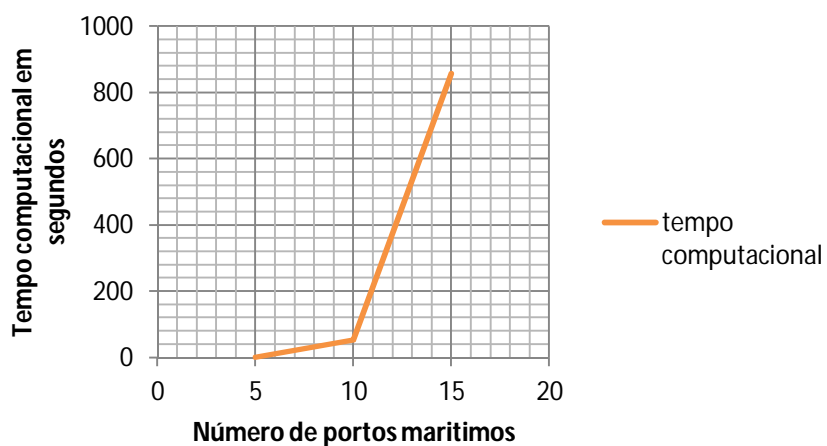


Gráfico 1 Comportamento do tempo computacional em função do número de portos marítimos

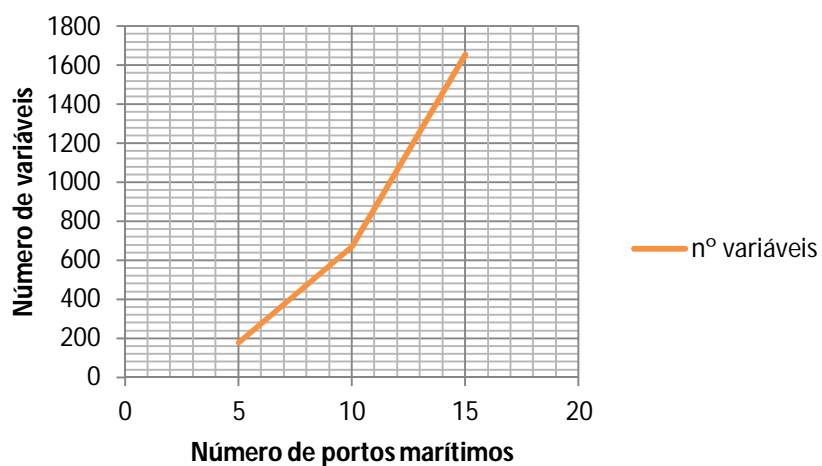


Gráfico 2 Comportamento do número de variáveis em função do número de portos marítimos

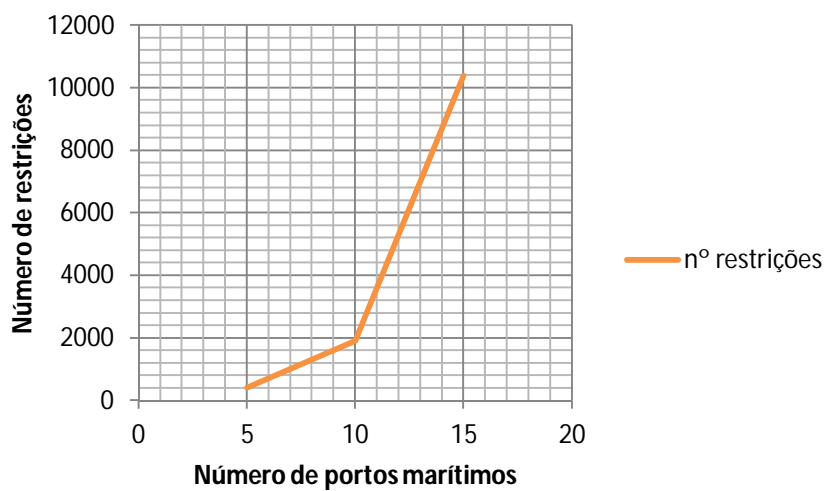


Gráfico 3 Comportamento do número de restrições em função do número de portos marítimos

Os gráficos anteriores demonstram a complexidade agregada ao modelo de programação inteira mista. Verifica-se que existe um crescimento exponencial das três variáveis analisadas (tempo computacional, número de variáveis e número de restrições) em função do número de portos analisados, sendo o crescimento entre $P=10$ e $P=15$ maior que o crescimento entre $P=5$ e $P=10$. À medida que se aumenta o número de portos existe um aumento considerável do número de variáveis.

Analisando as soluções ótimas obtidas para as três instâncias do problema de teste com 10 portos, onde se fez variar o número de porta-contentores, a variação dos tempos computacionais, número de variáveis e o número de restrições relativamente à variação do número de porta-contentores, é mostrada nos gráficos 4, 5 e 6.

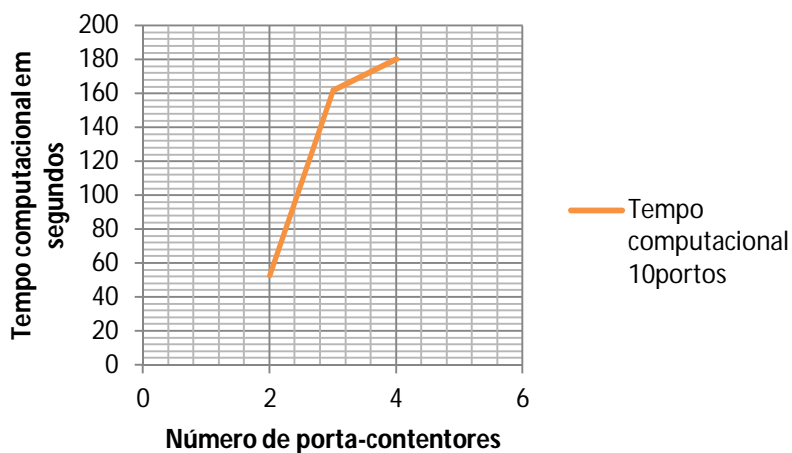


Gráfico 4 Comportamento do tempo computacional em função do número de porta-contentores

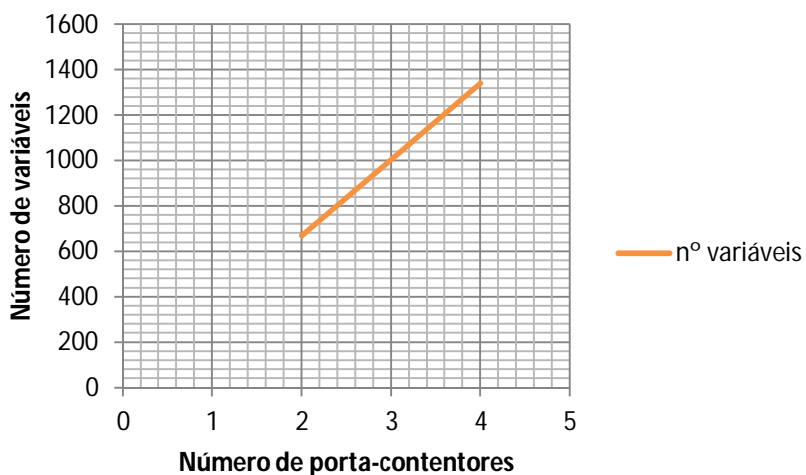


Gráfico 5 Comportamento do número de variáveis em função do número de porta-contentores

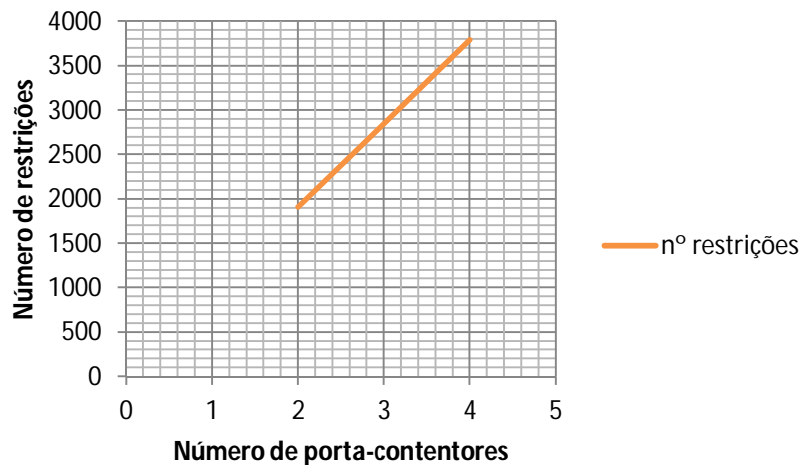


Gráfico 6 Comportamento do número de restrições em função do número de porta-contentores

Verifica-se, como seria de esperar, um aumento do tempo computacional, número de restrições e número de variáveis quando se faz variar o número de porta-contentores, mas no entanto estas variações não são muito significativas. Normalmente o problema de “*short sea shipping*” inclui em média cinco portos marítimos, e dois porta-contentores no entanto o uso de problemas de teste com mais portos e mais porta contentores, foi uma forma de analisar o comportamento do modelo desenvolvido.

Procedeu-se também a uma análise de sensibilidade, variando o peso da carga transportada, para compreender-se como esta iria fazer variar o tempo computacional. De uma outra forma o objetivo foi o de comparar os tempos computacionais de três distribuições de peso diferentes para cada uma das instâncias geradas ($P=5$, $P=10$, $P=15$), com o intuito de se perceber até que ponto a distribuição da carga pode ser fundamental para o tempo necessário até encontrar uma solução ótima do problema. Isto porque, caso uma das procuras de um porto seja igual ou muito próximo da capacidade total do navio, o número de iterações vai decrescer, uma vez que o navio serve um único porto. Foram então criadas três distribuições de carga para cada instância. A cada distribuição foi atribuída uma designação: distribuição de peso homogénea, fracamente heterogénea e fortemente heterogénea. Entenda-se por:

- i) Distribuição homogénea quando o peso da carga, para cada porto é igual ou muito próximo.
- ii) Distribuição fracamente heterogénea quando as diferenças dos pesos das cargas para cada porto tem pequenas diferenças.
- iii) Distribuição fortemente heterogénea quando a distribuição do peso é significativamente diferente.

Os gráficos seguintes mostram a variação do tempo computacional em função da distribuição dos pesos dos contentores por porto.

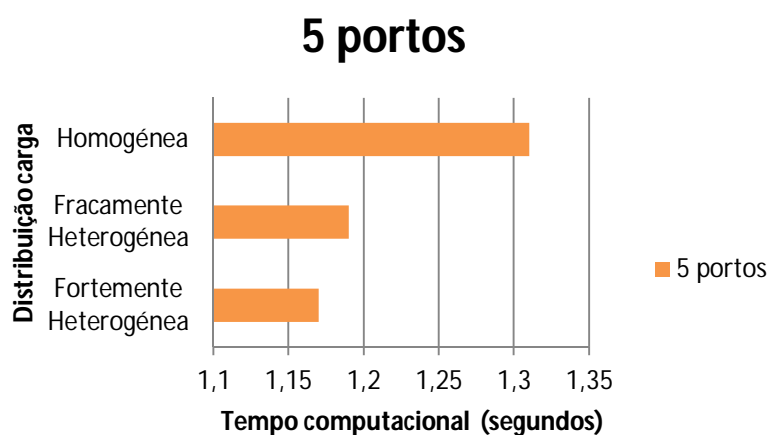


Gráfico 7 Variação do tempo computacional em função da distribuição da carga para 5 portos

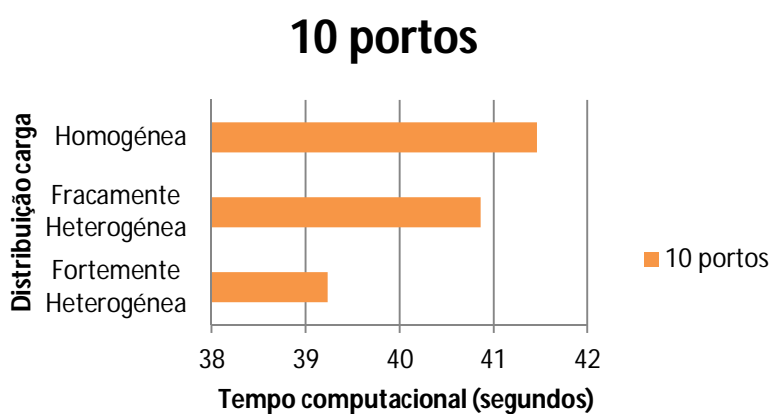


Gráfico 8 Variação do tempo computacional em função da distribuição da carga para 10 portos

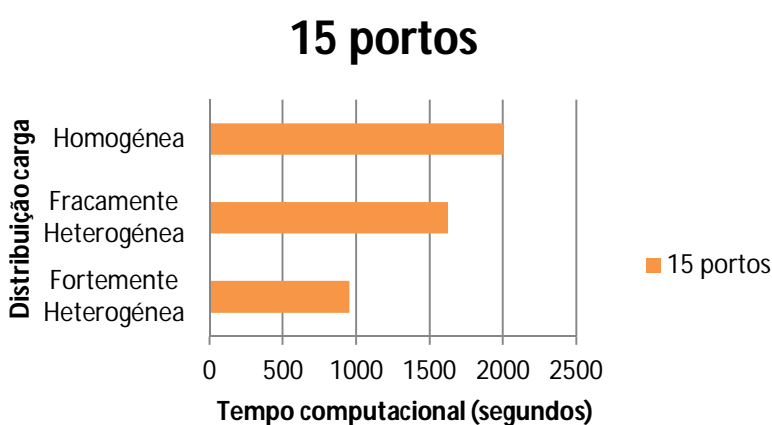


Gráfico 9 Variação do tempo computacional em função da distribuição da carga para 15 portos

Analisando os três gráficos anteriores, verifica-se que existe uma relação entre o perfil da distribuição da carga pelos portos marítimos e o tempo computacional para a determinação da solução. Verifica-se que os tempos computacionais para distribuições fortemente heterogéneas são os menores das três distribuições possíveis. Analisando o gráfico 7, conclui-se que existe uma relação entre a distribuição de carga e o tempo computacional. Quanto mais homogénea é a distribuição da carga maior é o tempo computacional. A diferença de tempos computacionais existente entre as três distribuições para as instâncias $P=5$, não é muito significativa (muito inferior a 1 segundo), no entanto existe uma relação de crescimento para quanto mais homogénea é a distribuição. O mesmo se verifica para as instâncias $P=10$.

No entanto para as instâncias $P=15$, verifica-se que a diferença de tempos computacionais entre as três distribuições de carga é bastante significativa. Este facto deve-se ao número de portos a visitar pelos porta-contentores, ser superior. O número de variáveis e de restrições existentes nestas instâncias é muito superior às instâncias $P=5$, $P=10$ o que aumenta de forma exponencial o tempo computacional de cálculo de uma solução. Como a instância $P=15$ apresenta um tempo computacional mais elevado, quando se considera uma distribuição mais homogénea da carga o tempo computacional cresce. Desta forma verifica-se que a criação de distribuições de carga mais homogéneas aumenta o tempo computacional de resolução, porque o número de iterações e de combinações é maior.

5. Conclusão

No presente trabalho é apresentado um modelo de programação inteira mista para o problema CSSRP. Este problema surge da integração de dois outros problemas: *Vehicle Routing Problem* e *Container Stowage Problem*. Devido à grande complexidade do problema, complexidade essa, característica dos problemas de otimização combinatória, o CSSRP é considerado NP-difícil. No entanto, e como o objetivo deste estudo é resolver problemas de pequena dimensão (*short sea shipping*) foi desenvolvido um modelo de programação inteira mista para a determinação da solução ótima de problemas reais. Além disso, como não existe na literatura nenhum estudo que combine o planejamento de rotas e carga dos navios e os resolva de uma forma integrada usando métodos exatos, seria bastante interessante entender e estudar qual o comportamento do modelo na resolução destes problemas.

Não obstante e sem perda de generalidade, este modelo foi alvo de algumas simplificações, tais como: as tarifas portuárias são iguais independentemente do porto visitado; a velocidade e consumo de combustível dos porta-contentores são constantes, não se encontrando dependente dos pesos do porta-contentores nem das condições marítimas. Estas simplificações não colocam em causa a validade do modelo, uma vez que a única alteração que pode existir é em termos de custo total da função objetivo, uma vez que estão relacionados única e exclusivamente com custos de utilização dos porta-contentores. Além disso, foi também considerada uma outra simplificação ao nível da estiva. Esta simplificação está relacionada com a matriz de carga dos porta-contentores, que foi simplificada. O objetivo principal deste problema é a minimização dos custos totais de distribuição marítima.

O modelo foi testado, com cinco instâncias e conseguiu-se provar que com a aplicação deste modelo é possível aumentar a flexibilidade do “*short sea shipping*” e aumentar a competitividade do transporte marítimo em relação aos concorrentes, uma vez que se consegue obter soluções em tempos computacionais reduzidos.

Ao efetuar uma análise de sensibilidade verificou-se que o aumento do número de portos a visitar aumenta exponencialmente o tempo computacional para a determinação da solução ótima, uma vez que também aumenta significativamente o número de variáveis e restrições do problema. Verifica-se também que o tempo computacional não se encontra apenas dependente do número de portos a visitar, como também, do número de navios, da forma como é efetuada a distribuição dos contentores e respetivos pesos totais para cada porto marítimo.

Em termos de trabalho futuro este modelo pode ainda ser consideravelmente melhorado para que seja possível traduzir integralmente a realidade. Estas melhorias passam por exemplo, por uma das simplificações adotadas, a matriz de alocação dos contentores, que de momento está bastante simplificada. Outra melhoria é relativa à consideração da restrição de estabilidade da carga dos contentores no porta-contentores. Seria também interessante o aumento do número de instâncias de teste, fazendo variar outras características do problema e testar o modelo num número maior de problemas.

6. Referências Bibliográficas

- Agarwal, R., & Ergun, O. (2008). Ship scheduling and network design for cargo routing in liner shipping. [Article]. *Transportation Science*, 42(2), 175-196. doi: 10.1287/trsc.1070.0205
- Ambrosino, D., Sciomachen, A., & Tanfani, E. (2004). Stowing a containership: the master bay plan problem. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38(2), 81-99. doi: 10.1016/j.tra.2003.09.002
- Ambrosino, D., Sciomachen, A., & Tanfani, E. (2006). A decomposition heuristics for the container ship stowage problem. *Journal of Heuristics*, 12(3), 211-233. doi: 10.1007/s10732-006-5905-1
- Aslidis, A. (1989). *Combinatorial algorithms for stacking problems*. Ph. D.
- Assad, A. A. (1988). Modeling and implementation issues in vehicle routing *Vehicle Routing: Methods and Studies: 7-45 North-Holland, Amesterdam*.
- Atkins, W. H. (1991). Modern marine terminal operations and management. *Boyle, Oakland*
- Avriel, M., & Penn, M. (1993). Exact and approximate solutions of the container ship stowage problem. *Computers & Industrial Engineering*, 25(1-4), 271-274. doi: 10.1016/0360-8352(93)90273-z
- Avriel, M., Penn, M., & Shpirer, N. (2000). Container ship stowage problem: complexity and connection to the coloring of circle graphs. *Discrete Applied Mathematics*, 103(1-3), 271-279. doi: 10.1016/s0166-218x(99)00245-0
- Avriel, M., Penn, M., Shpirer, N., *et al.* (1998). Stowage planning for container ships to reduce the number of shifts. *Annals of Operations Research*, 76(0), 55-71. doi: 10.1023/a:1018956823693
- Bodin, L., & Golden, B. (1981). Classification in vehicle routing and scheduling. [10.1002/net.3230110204]. *Networks*, 11(2), 97-108.
- Borkar, V., Chandru, V., & Sathiya Keerthi, S. (1997). Optimization. *Sadhana*, 22(4), 483-483. doi: 10.1007/bf02745574
- Botter, R. C., & Brinati, M. A. (1992). *Stowage Container Planning: A Model for Getting an Optimal Solution*. Paper presented at the Proceedings of the IFIP TC5/WG5.6 Seventh International Conference on Computer Applications in the Automation of Shipyard Operation and Ship Design, VII.

- Chang, T.-S., & Liao, Y.-F. (2008). Path finding with stowage planning consideration in a mixed pickup–delivery and specified-node network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(6), 970-985. doi: 10.1016/j.tre.2007.10.003
- Chou, M. C., & Ding, D.). *Stowage Planning for Container Ships to Achieve Operations Efficiency*. Theory and Methodology Paper, (EJOR-D-08-02210). European Journal of Operational Research, Singapore.
- CPLEX. (2012). Otimização de rotas de distribuição marítima.
- de Castillo, B., & Daganzo, C. F. (1993). Handling strategies for import containers at marine terminals. *Transportation Research Part B*, 27(2), 151-166.
- Dubrovsky, O., Levitin, G., & Penn, M. (2002). A Genetic Algorithm with a Compact Solution Encoding for the Container Ship Stowage Problem. *Journal of Heuristics*, 8(6), 585-599. doi: 10.1023/a:1020373709350
- Fisher, M. L. (1995). Vehicle Routing. *Network routing, handbooks in Operations Research and Management Science*, 1-33. Amesterdam.
- GÄumÄu, M., Kaminsky, P., Tiemroth, E., *et al.* (2008). A Multi-stage Decomposition Heuristic for the Container Stowage Problem. *Desautels Faculty of Management*.
- Giemsch, P. (2004). Stowage planning and pile problems. Karlsruhe: Institut für Anwendungen des Operations Research.
- Haghani A, & I, K. E. (2001). *A model for designing container loading plans for containerships*. . Paper presented at the Transportation Research Board 2001 Annual Meeting University of Maryland.
- Han, X.-l., Lu, Z.-q., & Xi, L.-f. (2010). A proactive approach for simultaneous berth and quay crane scheduling problem with stochastic arrival and handling time. *European Journal of Operational Research*, 207(3), 1327-1340. doi: 10.1016/j.ejor.2010.07.018
- <http://www.containerhandbuch.de>. (2012).
- <http://www.marineinsight.com>. (2012).
- <http://www.neptunepacific.com/containers.php>. (2008).
- <http://www.sillanpaashipping.fi/References.htm>. (2008).

- Imai, A., Sasaki, K., Nishimura, E., *et al.* (2006). Multi-objective simultaneous stowage and load planning for a container ship with container rehandle in yard stacks. *European Journal of Operational Research*, 171(2), 373-389. doi: 10.1016/j.ejor.2004.07.066
- Janstrup, K., Rose, T. H., Andersen, K. H., *et al.* (2010). The Container Stowage Problem. In I. U. T. R. Series (Ed.). Copenhagen: Department of Transport Technical University of Denmark, Department of Mathematical Sciences University of Copenhagen, Department of Mathematical Science. Aarhus University Denmark, IT University of Copenhagen.
- Jongen, H., Meer, K., & Triesch, E. (2004a). Integer Linear Programming Optimization Theory (pp. 257-270): Springer US.
- Jongen, H., Meer, K., & Triesch, E. (2004b). Optimality Criteria on Simple Regions Optimization Theory (pp. 3-18): Springer US.
- Kim, K. H. (1999). An optimal routing algorithm for a transfer crane in port container terminals. *Transportation Science*, 33(1), 17-33.
- Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59(3), 345-358. doi: 10.1016/0377-2217(92)90192-c
- Laporte, G., & Nobert, Y. (1987). Exact Algorithms for the Vehicle Routing Problem. In G. L. M. M. Silvano Martello & R. Celso (Eds.), *North-Holland Mathematics Studies* (Vol. Volume 132, pp. 147-184): North-Holland.
- Liu, G. (2007). *Profit Optimization for Container Carriers*, Chengdu, China.
- Liu, Y., Zhou, C., Guo, D., *et al.* (2010). A decision support system using soft computing for modern international container transportation services. *Applied Soft Computing*, 10(4), 1087-1095. doi: 10.1016/j.asoc.2009.06.015
- Martin Jr, G. L., Randhawa, S. U., & McDowell, E. D. (1988). Computerized container-ship load planning: A methodology and evaluation. *Computers and Industrial Engineering*, 14(4), 429-440.
- Martins, P. T., Lobo, V. J. A. S., & Vairinhos, V. (2009). *Container Stowage Problem Solution for Short Sea Shipping*. Paper presented at the 14^o Congresso da APDIO.
- Meisel, F., & Wichmann, M. (2010). Container sequencing for quay cranes with internal reshuffles. *OR Spectrum*, 32(3), 569-591. doi: 10.1007/s00291-009-0191-6

- Moura, A. (2005). *Abordagens Heurísticas para o Planeamento de Rotas e Carga de Veículos*. PhD Thesis.
- Moura, A., Oliveira, J., & Pimentel, C. (2012). *A mathematical model for the Container Stowage and Ship Routing Problem*. Paper presented at the The 12th International Conference on Computational and Mathematical Methods in Science and Engineering, CMMSE2012, La Manga, Spain.
- Nehrling, B. C. (1970). CONTAINER SHIP LOADING AND UNLOADING SIMULATION. *University of Michigan, Ann Arbor*.
- Ratcliffe, A. T., & Sen, P. (1987). *Computer aided stowage and lashings strategies for containerships*. Paper presented at the Proceedings of Cargo Systems: Safe Ship-Safe Cargo Conference,, London.
- Saginaw li, D. J., & Perakis, A. N. (1989). Decision support system for containership stowage planning. *Marine Technology*, 26(1), 47-61.
- Sciomachen, A., & Tanfani, E. (2007). A 3D-BPP approach for optimising stowage plans and terminal productivity. *European Journal of Operational Research*, 183(3), 1433-1446. doi: 10.1016/j.ejor.2005.11.067
- Shields, J. J. (1984). CONTAINERSHIP STOWAGE: A COMPUTER-AIDED PREPLANNING SYSTEM. *Marine Technology*, 21(4), 370-383.
- Taleb-Ibrahimi, M., de Castilho, B., & Daganzo, C. F. (1993). Storage space vs handling work in container terminals. *Transportation Research Part B*, 27(1), 13-32.
- Wei-ying, Z., Yan, L., & Zhuo-shang, J. (2005). Model and algorithm for container ship stowage planning based on bin-packing problem. *Journal of Marine Science and Application*, 4(3), 30-36. doi: 10.1007/s11804-005-0018-z
- Wilson I. D., & A., R. P. (1999). Principles of Combinatorial Optimization Applied to Container-Ship Stowage Planning. *Journal of Heuristics*, 5, 403-418.
- Wilson, I. D., Roach, P. A., & Correspondence. (2000). Container stowage planning: a methodology for generating computerised solutions. *Journal of the Operational Research Society*, 51(11), 1248-1255.
- Wilson, I. D., Roach, P. A., & Ware, J. A. (2001). Container stowage pre-planning: using search to generate solutions, a case study. *Knowledge-Based Systems*, 14(3-4), 137-145. doi: 10.1016/s0950-7051(01)00090-9

Zhang, C., Wan, Y. W., Liu, J., *et al.* (2002). Dynamic crane deployment in container storage yards. *Transportation Research Part B: Methodological*, 36(6), 537-555.

Zhang, W.-y., Lin, Y., Ji, Z.-s., *et al.* (2008). Review of containership stowage plans for full routes. *Journal of Marine Science and Application*, 7(4), 278-285. doi: 10.1007/s11804-008-7087-8

7. Anexos

Anexo 1- Implementação do modelo de programação inteira mista

Na implementação do modelo no IBM ILOG CPLEX, foi necessário definir as variáveis, assim como as variáveis de decisão. As variáveis do modelo apresentam diferenças tipológicas, sendo estas:

- i) *Int*, variável do tipo inteira;
- ii) *Float*, variável do tipo real;
- iii) *Char*, variável do tipo caracter;
- iv) *Boolean*, variável do tipo booleano;
- v) *Dvar*, variável do tipo variável de decisão.

As variáveis *int*, *float* e *char* necessitam de ser inicializadas, porque no ficheiro .dat serão definidos os valores que estas variáveis podem tomar. A figura 9 demonstra a inicialização de variáveis do tipo *int* e *float*.

```
//Dados Portos e navios
int P =...; //numero de portos
range portos = 1..P;
int V =...; // numero de navios
range navios = 1..V;
int d_i_j[portos][portos] =...; // dist
float u_i_k[portos][navios] =...; // cu
int aux_d = 0;
int Z =...; //posicionamentos em z
range posz = 1..Z;
int X =...; //n° de Posicionamentos
range posx = 1..X;
```

Figura 9 Inicialização dos índices (excerto)

O modelo possui três tipos de estruturas: índices, dados e variáveis. A figura anterior demonstra o formato de inicialização de variáveis no *software* IBM ILOG CPLEX. Analisando em detalhe esta figura 9 verifica-se que:

- A variável P é do tipo inteiro e vai conter o número de portos a considerar e está a ser inicializada;
- A variável portos é uma variável que irá assumir o intervalo de valores compreendido entre 1 e o valor de P que foi definido no ficheiro .dat;
- A variável d_i_j corresponde à distância entre portos, e esta terá uma dimensão matricial de [portos]x[portos]. Exemplo disto é que se o valor de P, for igual a 5 então a matriz d_i_j terá dimensão [5]x[5]. A mesma situação se aplica à variável u_i_k do tipo real, embora esta tenha dimensão matricial de [portos]x[navios];


```

// Dados de Carga
int M1 = 100;

// dados função objectivo

float w1=1;
float w2=1;
float w3=1;

```

Figura 10 Inicialização direta(CPLEX, 2012) (excerto)

A figura 10, apresenta como uma variável pode ser inicializada diretamente no ficheiro .mod. Esta situação é mais recorrente para casos onde a inicialização possui um vetor de dimensão [1]x[1].

```

// Variaveis de Decisão

dvar boolean x_i_j_k [portos][portos][navios]; //arcos por
dvar boolean delta_i_z_x_k [navios][portos][posz][posx]; /
dvar float+ s_i_k[portos][navios]; // instante de tempo de
dvar boolean beta_o[portos][portos][navios]; //shifts
dvar boolean xyz_i_j[portos][portos][navios];

```

Figura 11 Definição das variáveis de decisão

A figura 11, demonstra como se definem as variáveis de decisão. Estas não necessitam de ser inicializadas porque as variáveis de decisão serão o resultado pretendido, quando são do tipo *float* ou *int*. No entanto quando estas são do tipo *boolean* estas irão assumir o valor zero ou um, caso a restrição onde estão inseridas seja verdadeira ou falsa.

Definidas todas as variáveis, procedeu-se à implementação da função objetivo. Esta função será a que retribuirá o valor mínimo ou máximo que pretendemos obter para o modelo implementado. A figura 12 demonstra a função objetivo do modelo, onde esta procede ao cálculo do custo mínimo da distribuição dos contentores pelos vários portos.

```

minimize
w1*sum(k in navios, i in portos, j in portos :i!=j)
(d_i_j[i][j] * c_k[k] * x_i_j_k[i][j][k] + x_i_j_k[i][j][k] * u_i_k[j][k]
+ x_i_j_k[i][j][k] * m_alfa) + w2*sum(k in navios)uc_k[k] * s_i_k[1][k]
+ w3*2*m_alfa*sum(k in navios, i in portos:i>1, j in portos:j!=i && j>1)beta_o[j][i][k];

```

Figura 12 Função Objetivo

Criada a função objectivo, procedeu-se à implementação das restrições constituintes do modelo. A figura 13 apresenta as restrições relativamente ao VRP. Aqui estão definidas as restrições básicas de um problema de rotas.

```
// Sai uma e uma só vez de um porto e chega uma e uma só vez a outro porto
forall(j in portos:j!=1)
    sum(i in portos:i!=j, k in navios) x_i_j_k[i][j][k]==1;

// O navio inicia viagem no porto 1
forall(i in portos:i!=1)
    sum(j in portos:j!=i, k in navios) x_i_j_k[i][j][k] == 1;

// Se um navio entra num porto então tem de sair desse porto para outro
forall(j in portos, k in navios)
    sum(i in portos:i!=j) (x_i_j_k[i][j][k]-x_i_j_k[j][i][k])==0;

forall(k in navios)
    sum(j in portos) x_i_j_k[1][j][k] <= 1;

// Calcula tempo de chegada em cada porto -> garante que a descarga não é feita antes do navio chegar ao porto
forall (k in navios, i in portos, j in portos){
    if (i==1) t_i_k[i][k] + ((d_i_j[i][j]/vel_k[k])/24)<= s_i_k[j][k] + M1*(1- x_i_j_k[i][j][k]);
    else s_i_k[i][k] + t_i_k[i][k] + ((d_i_j[i][j]/vel_k[k])/24)<= s_i_k[j][k] + M1*(1- x_i_j_k[i][j][k]);
}

// garante que o deadline não é violado
forall(k in navios, i in portos)
    s_i_k[i][k] <= dl_i[i];
```

Figura 13 Restrições de VRP

Comparando o modelo matemático apresentado na secção 3.2 para a primeira restrição da figura 13, com a implementação em *software* verifica-se que:

- O elemento *forall* é o que está a definir que se considera todos os índices da variável *j* exceto o índice 1 para qualquer cálculo ($\forall j \neq 1 \in P$);
- Analisando o somatório verifica-se que para cada *j* executa-se todos os *i* exceto quando igual a

$$j \text{ e todos os } k \left(\sum_{i=1, i \neq j}^p \sum_{k=1}^v x_{ijk} = 1 \right).$$

Este procedimento analisado para a primeira restrição também se verifica para as seguintes. É dada especial atenção à restrição de cálculo dos instantes de tempo de chegada dos porta-contentores aos portos marítimos. O modelo matemático para esta restrição encontra-se neste formato:

$$s_{ik} + t_{ik} + \frac{d_{ij}}{vel_k} \leq s_{jk} + M(1 - x_{ijk}) \quad \forall k \in V, \forall i, j \in P.$$

Se verificarmos na figura 14 que mostra a implementação das restrições de VRP, a correspondente aos instantes de tempo é a restrição que contém um ciclo *if else*. Como a viagem se inicia no porto um restringiu-se a secção do *if* apenas para *i=1* e como aqui só se necessitaria de calcular o instante de chegada ao porto *j*, o s_{i_k} do porto *i* será zero, logo não foi introduzida. Como na segunda iteração do ciclo o valor de *i* é diferente de um, a fórmula de cálculo será executada apenas na secção do *else*. O valor de s_{i_k} para o porto *i* na segunda iteração deriva do valor calculado para *j* em *i* igual a um. Desta forma conseguiu-se calcular os instantes de tempo

de chegada dos porta-contentores aos portos marítimos, que dependem dos instantes de chegada aos portos que são visitados previamente na sequência de visitas.

```
// garante que a capacidade dos navios não é violada
forall(k in navios)
    sum(i in portos:i!=1) q_i[i] * sum(j in portos) x_i_j_k[j][i][k] <= Q_k[k];

// a carga de cada porto só pode ir numa única posição do navio
forall (i in portos: i!=1)
    sum(k in navios, z in posz, x in posx) delta_i_z_x_k[k][i][z][x] == 1;

// em cada posição pode ir no máximo uma carga
forall (k in navios, z in posz, x in posx)
    sum(i in portos: i!=1) delta_i_z_x_k[k][i][z][x] <= 1;

// se um porto é visitado, então os contentores para esse porto têm de ir no navio
forall (k in navios, j in portos:j!=1, z in posz, x in posx)
    sum(i in portos) x_i_j_k[i][j][k] + sum(l in portos:l!=j) x_i_j_k[j][l][k] <= 1+ (sum(z in posz, x in posx) delta_i_z_x_k [k][j][z][x]);

// Se um pedido de um porto está num slot, então os slots debaixo devem estar ocupados
forall (k in navios, i in portos:i!=1, z in posz, p in posz: p>z, x in posx)
    delta_i_z_x_k[k][i][z][x] <= sum(j in portos: j!=i && j!=1) delta_i_z_x_k[k][j][p][x];
```

Figura 14 Restrições de CSP

Em seguida é apresentada a implementação das últimas duas restrições, relativas ao *Container Stowage Ship Routing Problem* Figura 15.

```
// contar overstay
forall(k in navios, j in portos: j>1 , i in portos: j!=i && i>1)
    s_i_k[i][k] - s_i_k[j][k] <= M1*xyz_i_j[i][j][k];

forall (k in navios, i in portos:i!=1, j in portos: j!=i && j>1, z in posz, p in posz:p>z, x in posx)
    xyz_i_j[i][j][k] + delta_i_z_x_k[k][i][z][x] + delta_i_z_x_k[k][j][p][x] <= 2+beta_o[j][i][k];
```

Figura 15 Implementação de restrições do CSSRP

Por fim, a implementação do modelo, termina com a impressão dos resultados, para uma melhor visualização das soluções geradas. A figura 16 apresenta o código de execução para que a impressão possa ser feita de forma mais perceptível para análise.

```

execute{

writeln();
writeln();
writeln("Valor da função objectivo: ", cplex.getObjValue ());
writeln();

    for(var i in portos){

        for(var j in portos){

            for(var k in navios){

                if ((x_i_j_k[i][j][k]==1)){

writeln("Rota do navio : ", i, " -> ", j, " ");
writeln();
writeln("Navio : ", k);
writeln();
writeln("Instante de Chegada ao porto: ", s_i_k[i][k]);
writeln();

}

}

}

}

```

Figura 16 Excerto da implementação da secção gráfica do modelo

Depois de feita toda a implementação foi necessário efetuar a inicialização das variáveis no ficheiro .dat. Aqui serão atribuídos os valores que cada variável deverá tomar ao longo da execução do modelo. A figura 17 demonstra como a inicialização foi efetuada para uma das instâncias.

```

//numero portos
P = 5;

//numero navios
V = 2;

//Posicionamentos
Z = 3;
X = 3;

//distâncias de i para j
d_i_j = [[0, 850, 387, 673, 437]
          [850, 0, 583, 525, 285]
          [387, 583, 0, 244, 849]
          [673, 525, 244, 0, 674]
          [437, 285, 849, 674, 0]];

//Capacidade máxima peso por navio
Q_k = [2200, 5445];

```

Figura 17 Inicialização das variáveis no ficheiro .dat (excerto) (CPLEX, 2012)

Implementado e testado o modelo, os resultados foram lidos através do output gerado pelo próprio IBM ILOG CPLEX figura 18. Os dados eram apresentados através de matrizes constituídas por zeros e uns, o que tornava de difícil leitura. Para tal foi necessário proceder à criação de um ficheiro de output de mais simples leitura. A figura 18 demonstra o antes e o depois da impressão dos resultados.

<pre> x_i_j_k = [[[0 0] [0 0] [0 1] [1 0] [0 0]] [[0 0] [0 0] [0 0] [0 1]] [[0 0] [0 1] [0 0] [0 0]] [[1 0] [0 0] [0 0] [0 0]] [[0 1] [0 0] [0 0] [0 0]]]; s_i_k = [[4.8867 6.5732] [0 3.3666] [0 1.29] [2.2433 0] [0 4.9832]]; </pre>	<pre> Valor da função objectivo: 166898.9868 Rota do navio : 1 -> 3 Navio : 2 Instante de Chegada ao porto: 6.5732000000000093 posição em Z de3 3 posição em x de3 2 Rota do navio : 1 -> 4 Navio : 1 Instante de Chegada ao porto: 4.8866666666666667 posição em Z de4 3 posição em x de4 1 Rota do navio : 2 -> 5 Navio : 2 Instante de Chegada ao porto: 3.3666333333333362 posição em Z de5 3 posição em x de5 1 </pre>
Antes	Depois

Figura 18 Antes e depois a implementação gráfica de impressão (excerto)

Anexo 2- Ficheiro do software IBM ILOG CPLEX do tipo .dat

```
//numero portos
P = 5;

//numero navios
V = 2;

//Posicionamentos
Z = 3;
X = 3;

//distâncias de i para j
d_i_j = [[0, 850, 387, 673, 437]
         [850, 0, 583, 525, 285]
         [387, 583, 0, 244, 849]
         [673, 525, 244, 0, 674]
         [437, 285, 849, 674, 0]];

//Capacidade máxima peso por navio
Q_k = [8445, 8445];

//velocidade dos navios
vel_k = [12.5, 12.5];

//custo de utilizacao do navio €/milles
c_k = [32.59, 32.59];

//custo de navegação do navio €/dia
uc_k = [12, 12];

//custo load e unload
m_alfa = 10;

//custo overstow
m_overstow = 10;

// custo de visita dos portos €/hours (custo utilização + taxas)
u_i_k = [[11191.41, 11191.41],[11392.40, 11392.40],[11231.61,
11231.61],[11312.01, 11312.01],[11231.61, 11231.61]];

//tempo de serviço em cada porto dias
t_i_k = [[0, 0],[0.6666, 0.6666],[0.1333, 0.1333],[0.4, 0.4],[0.1333,
0.1333]];

// conjunto de contentores para cada porto
alfa_i_k = [[0, 0],[320, 320],[64, 64],[192, 192],[64, 64]];

// peso dos contentores para cada porto
q_i = [0, 3200, 640, 1920, 512];

// deadline dos contentores para cada porto
dl_i = [20, 8, 12, 12, 5];
```

Anexo 3- Ficheiro do software IBM ILOG CPLEX do tipo .mod

```
//Dados Portos e navios
int P =...; //numero de portos
range portos = 1..P;
int V =...; // numero de navios
range navios = 1..V;
int d_i_j[portos][portos] =...; // distância entre portos
float u_i_k[portos][navios] =...; // custo de visita €/hours (custo
utilização + taxas)
int Z =...; //posicionamentos em z
range posz = 1..Z;
int X =...; //nº de Posicionamentos
range posx = 1..X;

float vel_k[navios] =...; //velocidade dos navios
float c_k[navios] =...; //custo de utilizacao do navio
float uc_k[navios] =...; //custo navegação por dia
float m_alfa =...; //custo load e unload
float m_overstow =...; //custo overstow
float t_i_k[portos][navios] =...; //tempo de serviço em cada porto
int alfa_i_k[portos][navios] =...; // conjunto de contentores para cada
porto
int q_i[portos] =...; // peso dos contentores para cada porto
int dl_i[portos] =...; // deadline dos contentores para cada porto
float Q_k [navios] =...; //Capacidade máxima navio

// Dados de Carga
int M1 = 100;

// dados função objectivo

float w1=1;
float w2=1;
float w3=1;

// Variaveis de Decisão

dvar boolean x_i_j_k [portos][portos][navios]; //arcos por navio
dvar boolean delta_i_z_x_k [navios][portos][posz][posx]; //Garante que
os contentores alfa_i estão posicionados num único local do navio
dvar float+ s_i_k[portos][navios]; // instante de tempo de chegada ao
porto i
dvar boolean beta_o[portos][portos][navios]; //shifts
dvar boolean xyz_i_j[portos][portos][navios];

//função objectivo

minimize
    w1*sum(k in navios, i in portos, j in portos :i!=j)(d_i_j[i][j] *
c_k[k] * x_i_j_k[i][j][k] + x_i_j_k[i][j][k] * u_i_k[j][k] +
x_i_j_k[i][j][k] * m_alfa) + w2*sum(k in navios)uc_k[k] * s_i_k[1][k] +
w3*2*m_alfa*sum(k in navios, i in portos:i>1, j in portos:j!=i &&
j>1)beta_o[j][i][k];

// restrições da F.O
```

```

subject to {

// Sai uma e uma só vez de um porto e chega uma e uma só vez a outro
porto
    forall(j in portos:j!=1)
        sum(i in portos:i!=j, k in navios)x_i_j_k[i][j][k]==1;

// O navio inicia viagem no porto 1
    forall(i in portos:i!=1)
        sum(j in portos:j!=i, k in navios) x_i_j_k[i][j][k] == 1;

// Se um navio entra num porto então tem de sair desse porto para outro
    forall(j in portos, k in navios)
        sum(i in portos:i!=j)(x_i_j_k[i][j][k]-x_i_j_k[j][i][k])==0;

    forall(k in navios)
        sum(j in portos) x_i_j_k[1][j][k] <= 1;

// garante que a capacidade dos navios não é violada
    forall(k in navios)
        sum(i in portos:i!=1) q_i[i] * sum(j in portos) x_i_j_k[j][i][k] <=
Q_k[k];

// Calcula tempo de chegada em cada porto -> garante que a descarga não é
feita antes do navio chegar ao porto
    forall (k in navios, i in portos, j in portos){
        if (i==1) t_i_k[i][k] + ((d_i_j[i][j]/vel_k[k])/24)<=
s_i_k[j][k] + M1*(1- x_i_j_k[i][j][k]);
        else s_i_k[i][k] + t_i_k[i][k] +
((d_i_j[i][j]/vel_k[k])/24)<= s_i_k[j][k] + M1*(1- x_i_j_k[i][j][k]);
    }

// garante que o deadline não é violado
    forall(k in navios, i in portos)
        s_i_k[i][k] <= dl_i[i];

// a carga de cada porto só pode ir numa única posição do navio
    forall (i in portos: i!=1)
        sum(k in navios, z in posz, x in posx) delta_i_z_x_k[k][i][z][x]
== 1;

// em cada posição pode ir no máximo uma carga
    forall (k in navios, z in posz, x in posx)
        sum(i in portos: i!=1) delta_i_z_x_k[k][i][z][x] <= 1;

// se um porto é visitado, então os contentores para esse porto têm de ir
no navio
    forall (k in navios, j in portos:j!=1, z in posz, x in posx)
        sum(i in portos) x_i_j_k[i][j][k] + sum(l in portos:l!=j)
x_i_j_k[j][l][k] <= 1+ (sum(z in posz, x in posx) delta_i_z_x_k
[k][j][z][x]);

// Se um pedido de um porto está num slot, então os slots debaixo devem
estar ocupados
    forall (k in navios, i in portos:i!=1, z in posz, p in posz: p>z, x
in posx)

```