



**BRUNO AFONSO
FERNANDES**

**Otimização de Rotas de Distribuição Marítima de
Curta Distância**



**BRUNO AFONSO
FERNANDES**

**Otimização de Rotas de Distribuição Marítima de
Curta Distância**

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.

o júri

presidente

Prof. Doutora Ana Luísa Ferreira Andrade Ramos
professora auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor António Gil D'Orey de Andrade Campos
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

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

agradecimentos

Quero agradecer aos meus pais e amigos pelo apoio que me deram em todos os momentos durante não só este último ano, mas ao longo de cada um dos dias da minha formação académica. Especial agradecimento à Professora Ana Moura pelo apoio concedido, orientação e disponibilidade. Muito obrigado a todos!

palavras-chave

Container Stowage Problem, Heurística, Problema de Rotas de Veículos, CSSRP

resumo

A presente dissertação tem por objetivo o desenvolvimento de uma heurística para resolução do problema de *Container Stowage and Ship Routing Problem* (CSSRP). O transporte marítimo de curta distância envolve a gestão de porta-contentores e respectivas cargas que têm de ser entregues dentro de prazos pré-definidos a um conjunto de portos marítimos. O problema é constituído por duas decisões importantes que devem ser tomadas: qual a rota que os navios deverão percorrer e como deverá ser elaborado o plano de carga para cada navio tentando evitar cargas e descargas desnecessárias. Para isso foi desenvolvida uma heurística e apresentam-se os resultados obtidos, comparando-os com a solução ótima obtida pelo modelo matemático desenvolvido em (Moura et al., 2012a). Pretende-se com a heurística desenvolvida obter soluções admissíveis próximas da solução ótima. A solução ótima é calculada recorrendo a um modelo de programação linear inteira que entre outros objetivos minimiza movimentos de cargas e descargas desnecessárias de contentores. A heurística aqui apresentada privilegia a sequência de visita aos portos pelos navios que seja mais curta, considerando restrições de capacidade dos navios e deadlines dos contentores. Para validação da heurística, esta foi testada com problemas baseados em dados reais e apresentados por (Moura et al., 2012a).

keywords

Container Stowage Problem, Heuristic, Vehicle Routing Problem

abstract

This work aims to develop a heuristic to resolve the Container Stowage and Ship Routing Problem (CSSRP). The short sea shipping involves the management of container vessels and respective cargo with delivered date predefined to a set of seaports. The problem consists of two important decisions that must be made: which route the ships should take and how the cargo plan should be prepared for each ship to avoid unnecessary loads and unloads of containers. For that was developed an heuristic and the results obtained were compared with the optimal solution obtained by the mathematical model developed by Moura et al. (Moura *et al.*, 2012a) . The intention of the heuristics developed is to obtain admissible solutions near the optimal solution. The optimal solution is calculated using a mixed integer programming model that among other objectives minimizes the movements of unnecessary loading and unloading of containers. The heuristic here presented favours the shorter sequence of ports visit by vessels, considering capacity constraints of ships and containers deadlines. To validate the heurist, that was tested with problems based on real data and presented at (Moura *et al.*, 2012a).

Índice

1. Introdução	3
2. Estado da Arte.....	7
2.1 Otimização.....	8
2.2 História do Transporte Marítimo	9
2.3 Container Stowage Problem	13
2.4 Vehicle Routing Problem.....	21
3. Problema CSSRP (Container Stowage Ship Routing Problem)	25
3.1 Explicação e Caracterização do CSSRP.....	26
3.2 Heurística construtiva.....	30
3.3 Fluxogramas	33
4. Teste da Heurística desenvolvida e análise de resultados.....	41
4.1 Caracterização das Instâncias	42
4.2 Análise dos Resultados obtidos	45
5. Conclusão	51
6. Referências Bibliográficas	55

Índice de Figuras

Figura 1 - Contentor de 20 e 40 ft (http://www.anj.com.au/?page_id=1422 , 2013).	9
Figura 2 - Variação mundial no volume de transporte marítimo entre 1980 a 2004 (Liu <i>et al.</i> , 2010).	10
Figura 3 - Evolução da dimensão dos porta-contentores (http://portosdeportugal.pt/sartigo/index.php?x=4713 , 2010)	11
Figura 4 - The General Arrangement (Wilson <i>et al.</i> , 1999).	15
Figura 5 – The Outline Plan (Wilson <i>et al.</i> , 1999).	16
Figura 6 - Número de artigos publicados desde 1954 até 2006 (Eksioglu <i>et al.</i> , 2009).	23
Figura 7 - Matriz de alocação dos contentores.	32
Figura 8 - Fluxograma com a demonstração do cálculo da rota.	34
Figura 9 - Fluxograma que demonstra o carregamento do navio.	36
Figura 10 - Fluxograma que demonstra o descarregamento do navio.	38

Índice de Gráficos

Gráfico 1 - Comparação do custo da Heurística vs Solução Ótima.	46
Gráfico 2 - Tempo de processamento da heurística e da solução ótima.	49
Gráfico 3 - Rácio em (%) dos tempos obtidos pela heurística e solução ótima.	49

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Distribuição de contentores para cada instância/teste.	43
Tabela 2 - Variação do peso dos contentores para cada porto.	44
Tabela 3 - Resultados obtidos pela heurística e comparação com os resultados da solução ótima.....	45
Tabela 4 - Comparação das rotas e distâncias obtidas pela heurística e solução ótima	47
Tabela 5 - Tempos de processamento obtidos pela heurística e pela solução ótima. .	48

1.Introdução

No momento atual, em que aumentam o comércio e transporte de bens globalmente, torna-se relevante encontrar formas de o fazer que sejam rápidas, económicas e eficientes.

Dado o aumento do volume de bens comercializados entre diferentes países e as quantidades que são cada vez superiores, o transporte marítimo veio afirmar-se como a forma mais eficaz de realizar transporte de bens, para condições gerais.

O transporte marítimo apresenta inúmeras vantagens, mas nesta conjuntura económica proceder a melhoramentos, otimizações do processo de carga, escolha de rota e tempo despendido nos portos marítimos, certamente trarão enormes ganhos financeiros a todos os envolvidos nestas atividades.

Economias em escala levaram ao uso de porta-contentores com maior capacidade. Estes transportam artigos para portos que funcionam como centros de carga de onde são posteriormente distribuídos.

A União Europeia está muito dependente do transporte marítimo, possui mais de 67 000 kms de costa e 25 000 kms de linhas internas navegáveis. Hoje em dia mais de 90% do comércio externo e 43% do comércio interno é realizado por via marítima.

O transporte marítimo a curta distância tem vindo a tornar-se cada vez mais importante, dado que está a tornar-se cada vez mais competitivo em comparação com os outros meios de transporte. Essa competitividade deve-se ao facto de ser amigo do ambiente, capacidade em termos de vias, praticamente ilimitada (mar), não há restrições sobre o uso das infraestruturas, vantagens geográficas e é um meio de transporte bastante seguro.

No entanto o transporte marítimo também possui pontos fracos, é o caso de complexos documentos e procedimentos administrativos, não assenta em realidades logísticas modernas, como o *just-in-time*, não se torna competitivo se for realizado a distâncias demasiado curtas, fraco serviço ao cliente e operações relacionadas com os portos (por exemplo, capacidade insuficiente, manuseamento lento das cargas, demasiado tempo nos portos marítimos, custos de visita).

Este trabalho pretende analisar e contribuir com uma solução, através do desenvolvimento de uma heurística, cujo objetivo é diminuir os custos totais associados ao transporte marítimo de curta distância. Para o efeito, estudou-se o problema planeamento de rotas e carga de porta-contentores, denominado na literatura por *Container Stowage Ship Routing Problem* (CSSRP). Sendo este

problema bastante complexo em termos de dados e restrições, é aqui abordado segundo três perspectivas:

1. Pretende-se obter uma rota marítima cuja distância total percorrida seja minimizada;
2. Os custos de carga e descarga dos contentores para os vários portos nos porta-contentores têm também de ser minimizados;
3. Numa perspectiva mais geral deve ser também minimizado o custo total de transporte.

Foi desenvolvida uma heurística construtiva em C#, para obtenção de uma solução para o CSSRP. Para isso o primeiro passo foi realizar uma pesquisa bibliográfica, presente no capítulo 2, sobre o VRP (Vehicle Routing Problem) e o CSP (Container Stowage Problem). No capítulo 3 descrevem-se as principais características do CSSRP, que é a integração dos problemas acima referidos, desenvolve-se e implementa-se uma heurística construtiva com vista à obtenção de soluções admissíveis para o CSSRP. No capítulo 4 é feita uma análise e discussão dos resultados obtidos com a heurística para vários cenários. Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalho futuro.

2. Estado da Arte

Neste capítulo é apresentada uma breve história sobre transporte marítimo (secção 2.2) de forma a contextualizar este tipo de distribuição e problemas associados. Também se realiza uma revisão bibliográfica acerca dos temas abordados neste trabalho: Otimização (secção 2.1), CSP (secção 2.3) e VRP (secção 2.4).

2.1 Otimização

Todas as atividades humanas racionais são caracterizadas por um esforço contínuo para o progresso e desenvolvimento. Nesse sentido surge a otimização como ferramenta para atingir o contínuo desenvolvimento (Sieniutycz *et al.*, 2013).

Existem várias definições para o conceito de Otimização. Segundo (Singh, 2012) é a tendência de procurar obter a melhor solução em circunstâncias definidas. Otimização é uma ferramenta simples que utiliza o potencial de formulações lineares e não-lineares para resolver concisamente grandes problemas e analisar as soluções. A modelagem de otimização tornou-se uma poderosa ferramenta para resolver problemas emergentes de logística (Sieniutycz *et al.*, 2013) .

Frequentemente é preciso tomar decisões que possibilitem controlar um processo real. Também existem decisões a serem tomadas no desenvolvimento de um novo processo ou equipamento. Um modelo matemático de otimização pode ser criado formulando um problema em linguagem matemática usando funções, equações, desigualdades, entre outras. Um procedimento de otimização está relacionado com a melhor escolha no processo de decisões que satisfaça um certo número de restrições e torne possível um critério de otimização (índice de desempenho) (Sieniutycz *et al.*, 2013). Ajuda a encontrar a resposta que produz o melhor resultado; atinge o maior lucro, melhor *output*, felicidade, atinge o menor custo, resíduos ou desconforto. Muitas vezes, esses problemas envolvem fazer o uso mais eficiente dos recursos disponíveis, incluindo tempo, dinheiro, máquinas, pessoal, stock, terra, água, etc. (Singh, 2012).

2.2 História do Transporte Marítimo

O uso de contentores veio revolucionar o método de transporte de mercadorias. Inventado por Malcom Mclean, o contentor assume duas formas, a *standard* de 20 *foot* (6 metros) ou 40 *foot* (12 metros) identificados na Figura 1, permitindo que sejam facilmente transportados por camiões, comboios e navios. Dos métodos de transporte onde o uso de contentores teve maior impacto foi no transporte marítimo.



Figura 1 - Contentor de 20 e 40 ft (http://www.anj.com.au/?page_id=1422, 2013).

O aumento a nível mundial do comércio e negócios levou ao acréscimo de contentores e porta-contentores cada vez maiores (capacidade a rondar os 8000 contentores no ano 2000) (Sciomachen *et al.*, 2007).

Uma das principais áreas para obter ganhos a nível de custos e eficiência ocorre nos portos onde o carregamento, descarregamento e alocação dos contentores sendo otimizados podem levar a grandes ganhos financeiros.

O carregamento e devida alocação dos contentores no porta-contentores é um dos grandes problemas que se deparam todos os dias as companhias que gerem o terminal de contentores (Thomas, 1989).

No passado o plano de alocação dos contentores era elaborado pelo capitão, hoje o terminal de contentores é quem estabelece o *master bay plan*. (Sciomachen *et al.*, 2007).

O *master bay plan* trata-se da elaboração de um plano que encontre a solução ótima para alocação de contentores no navio, respeitando um conjunto de restrições estruturais e operacionais (Ambrosino *et al.*, 2004).

A Figura 2 mostra as variações que ocorreram a nível mundial no volume de transporte marítimo entre 1980 e 2004. As barras cilíndricas denotam o volume de contentores usados e a curva a percentagem de contentores movimentados por transporte marítimo (Liu *et al.*, 2010).

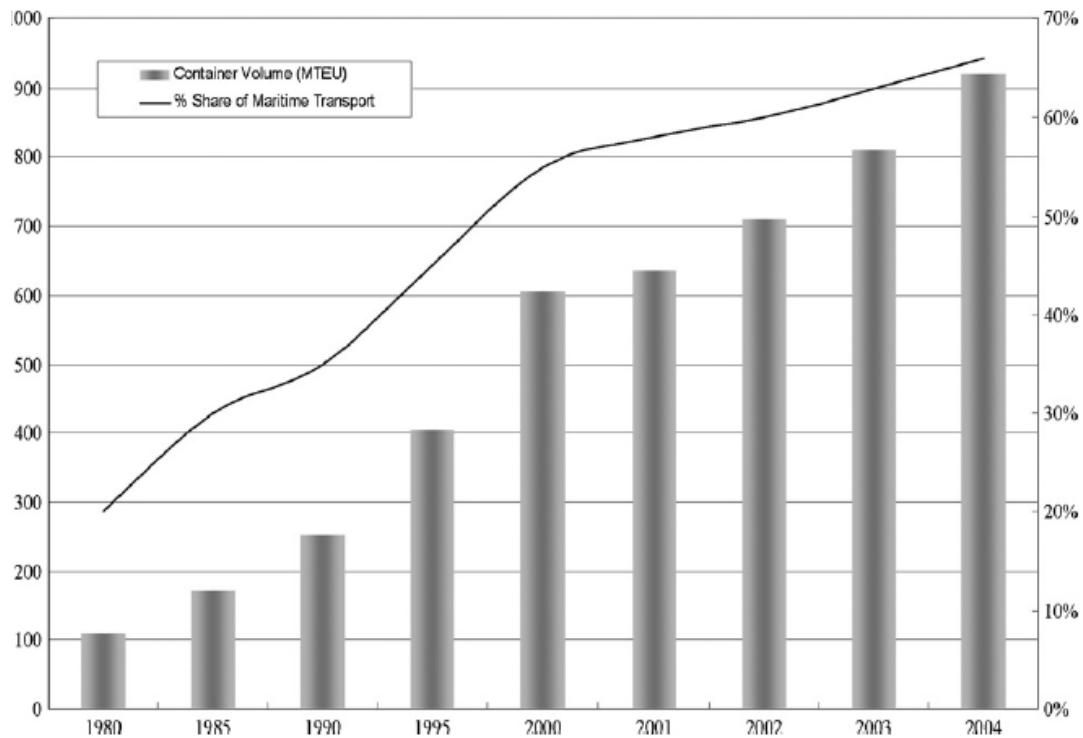


Figura 2 - Variação mundial no volume de transporte marítimo entre 1980 a 2004 (Liu *et al.*, 2010).

O serviço de transporte de contentores apresenta vários desafios e as companhias precisam de aumentar os seus lucros, tudo isto cria a necessidade de desenvolver novos *softwares* e sistemas de suporte à tomada de decisão.

Todos os dias em pequenas e grandes distâncias uma enorme quantidade de artigos são transportados pelo mundo e com o aumento da globalização torna-se importante fazê-lo o mais barato e rápido possível. Como tal a competição entre diferentes meios de transporte para movimentar os bens é elevada.

Devido ao aumento de trocas comerciais entre a Ásia, América e Europa o transporte de mercadorias por navio tornou-se mais eficiente devido às longas travessias oceânicas. Aviões também podem ser usados mas não conseguem transportar tantas quantidades como os navios, portanto o uso de navios para transporte que envolvam longas distâncias é mais barato e apesar de levar mais tempo continua a ser o preferido (Janstrup *et al.*, 2010).

Tudo começou depois da Segunda Guerra Mundial onde os petroleiros que até então eram utilizados em grande número foram convertidos para porta-contentores, com capacidade máxima para 58 contentores de metal. Desde então o desenvolvimento industrial naval fez com que houvesse mais variedade de navios com

capacidade para mais de 10000 TEU (*twenty-foot equivalent unit*) (Janstrup *et al.*, 2010). Na Figura 3 é perceptível a dimensão que estão a tomar os porta- contentores.

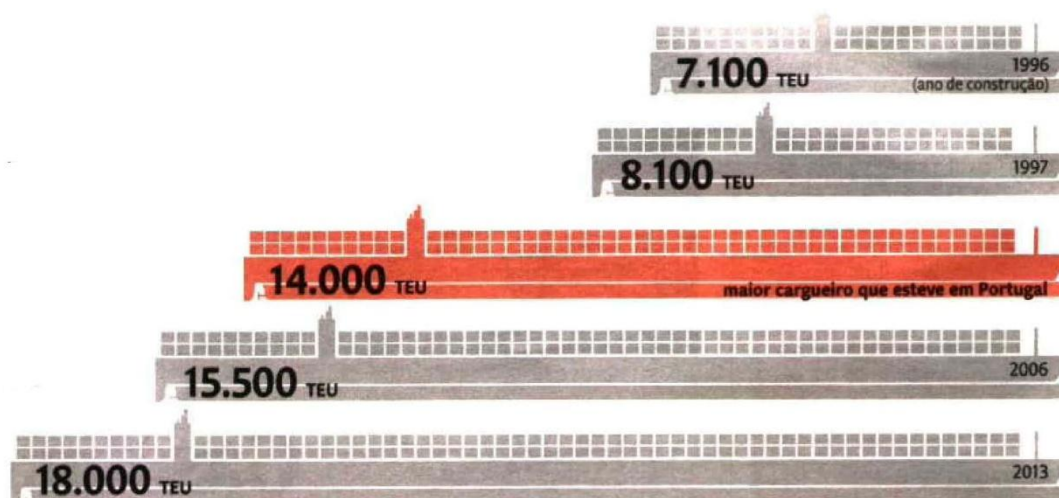


Figura 3 - Evolução da dimensão dos porta-contentores (<http://portosdeportugal.pt/sartigo/index.php?x=4713>, 2010)

Não só em transporte de grandes distâncias, mas também em distâncias pequenas (entre portos europeus), desde sempre que os navios foram usados como meio de transporte e até hoje o transporte marítimo de curta distância é responsável por uma significativa parte da carga movimentada entre a Europa. Cerca de 70% das trocas comerciais internacionais são realizadas por transporte marítimo em contentores. Na Europa o comércio marítimo representa 40% dos intercâmbios intracomunitários, implicando que grande parte dessa carga seja transportada entre curtas distâncias (Moura *et al.*, 2012b). O transporte marítimo tem menores taxas de frete comparativamente ao transporte aéreo, as taxas alfandegárias marítimas são aproximadamente 1/10 das taxas de transporte aéreo (Agarwal *et al.*, 2006). Outra vantagem é o reduzido número de acidentes e níveis de poluição que este meio de transporte produz. Os membros da comunidade são sensíveis a estes aspetos. Este meio de transporte possui níveis de poluição razoáveis, é seguro, tem baixos custos de infra-estruturas (o mar/oceano é por si próprio uma enorme auto estrada) e consegue atingir a maior parte das regiões periféricas europeias. Contudo também tem desvantagens: burocracias relacionadas com as alfândegas, custos e serviços dos portos e eficiência, duração das viagens, inflexibilidade das rotas e dependência de fatores ambientais (Moura *et al.*, 2012b).

A partir de 1970, a contentorização (o uso de contentores para transporte de produtos/materiais) veio facilitar a movimentação de mercadorias e revolucionar o transporte marítimo (Wilson *et al.*, 1999).

Segundo (Drewry, 2002), nos inícios de 1980 apenas 20% de toda a carga transportada era efetuada através do uso de contentores. Em 2001 verifica-se um aumento de 60%. Um problema com a contentorização é a utilização de contentores vazios de forma a melhorar a estabilidade do navio. O reposicionamento de contentores vazios contribui cerca de 1/15 do tráfego total de contentores e apresenta custos semanais na ordem dos milhões de dólares (Wong *et al.*, 2009).

De acordo com (Roi, 2002) uma redução de 10% no equipamento e custos de reposição pode potenciar aumentos na ordem dos 30-50% . Daí resultarem imensos estudos relacionados com a resolução do problema MBP.

O aumento da globalização e interdependência de várias economias mundiais levam a um enorme aumento do crescimento da indústria do transporte de mercadorias. Segundo a (Authorities, 2006) que é a associação Americana de Autoridade Portuária nos Estados Unidos, a maior nação do mundo a realizar trocas comerciais (importação e exportação), o transporte marítimo é responsável pela movimentação de 20% das trocas comerciais internacionais. Os portos marítimos dos Estados Unidos e hidrovias lidam com 2.5 biliões de toneladas de mercadorias anualmente e está previsto que o volume aumente para o dobro nos próximos 15 anos.

O aumento de comércio marítimo levou a similares aumentos no crescimento das frotas a nível mundial. Em 2005 o comércio marítimo registou crescimentos de 7.11 biliões de toneladas (Agarwal *et al.*, 2006). Apesar das alterações efetuadas no *mix* e tamanho das frotas, a eficiente utilização dos navios continua a ser um dos fatores determinantes para a lucratividade das empresas. Um navio representa um enorme investimento, são milhões de dólares investidos e custos operacionais diários na ordem das dezenas de milhares de dólares. Tendo todos estes valores em consideração, o desenvolvimento de um sistema de decisão baseado na otimização da utilização eficiente dos navios é uma forma de melhorar a gestão das frotas e obter mais lucros.

Outra situação é o aumento de *transshipment*. Esta prática diz respeito à ocorrência de movimentação de contentores de um navio diretamente para outro. Para tal usam-se gruas que fazem a transferência dos contentores de um navio para outro. Ocasionalmente num *transshipment* é necessário colocar os contentores

temporariamente no porto à espera de serem carregados num próximo navio (Agarwal *et al.*, 2006).

Portos onde ocorrem grandes volumes de *transshipment* são: Port Klang na Malásia, Hong Kong e Singapura. Neste último aproximadamente 80% dos contentores movimentados correspondem a operações de *transshipment* (Agarwal *et al.*, 2006).

Alianças estratégicas entre operadoras de forma a controlar as tarifas do mercado é algo que vem acontecendo desde 1875. Recentemente as alianças estratégicas têm sido realizadas numa tentativa de obter economias de escala, ampliar a base de clientes e aumentar a utilização dos ativos proporcionando aos clientes travessias frequentes e tempos de trânsito mais rápidos (Song *et al.*, 2002).

Desde 1990, quando a Sea-Land and Maersk introduziram o sistema de alianças e começaram a partilhar navios no oceano Atlântico e Pacífico, as alianças estratégicas tornaram-se comuns. (Agarwal *et al.*, 2006).

2.3 Container Stowage Problem

Os planos de carga dos contentores num porta-contentores têm sido determinados por planeadores humanos. Apesar dos porta-contentores possuírem uma estrutura própria para transporte de contentores que facilita a carga e descarga dos mesmos, alocar da melhor forma os contentores representa um enorme desafio. Determinar uma configuração viável e eficiente para o posicionamento dos contentores no porta-contentores é o objetivo principal do CSP. Um porta-contentores atual pode exigir milhares de movimentos dos contentores (carregamento, descarregamento e reposicionamento) para cada porto de destino (POD) para completar todo o processo de carga e descarga. Logo é necessário que este procedimento seja otimizado e de preferência feito recorrendo a um sistema de apoio à decisão. Devido à grande complexidade do problema, isto é, ao elevado número de contentores por porta-contentores e também de possíveis movimentos, obter o plano de carga ótimo é computacionalmente complexo.

A eficiência num porta-contentores é largamente determinada pelo posicionamento dos contentores no porto e no navio. O planeador deve determinar o melhor posicionamento dos contentores para que todas as restrições sejam satisfeitas e os custos do equipamento usado para manusear os contentores sejam minimizados.

Como este processo é realizado por um planeador humano e dado o elevado número de contentores e restrições, todo este processo não se encontra isento de erros.

No porta-contentores o espaço disponível para carga de contentores está dividido por células que agrupadas verticalmente formam uma pilha, e um conjunto de pilhas formam *bays* (Wilson et al., 1999).

O acondicionamento de contentores está dividido em duas fases – a conceção a longo prazo (generalizado) e a curto prazo (especializado = estratégias de acondicionamento). Na realização da conceção a longo prazo os planeadores esperam carregamentos nos portos seguintes, contudo no comércio de carga é frequente que a lista de reserva chegue em parcelas, com o passar do tempo, e só é completamente conhecida já próximo da data de carregamento – por essa razão utiliza-se informação estatística para obter uma previsão geral dos carregamentos nos portos seguintes. Na conceção a curto prazo os planeadores dispõem os contentores no porta-contentores utilizando estratégias que evitem o *overstow* (contentores que bloqueiam o acesso a outros que precisam de ser descarregados). Também é levado em consideração o tipo de contentor (normal, carga perigosa ou refrigerado) posicionando os contentores nos locais adequados às suas características (ex: o contentor refrigerado tem de ser transportado numa *slot* (local de armazenamento) com abastecimento elétrico e um contentor que transporte matérias perigosas necessita de ser posicionado num local afastado dos restantes e com bons acessos para a tripulação poder vigia-lo).

Os planeadores para elaborar o plano de carga usam uma combinação de dois documentos: *The General Arrangement* e *Outline Plan and Bay Plan* (Wilson et al., 1999).

The General Arrangement, representado na Figura 4, é um modelo, em pequena escala, da secção longitudinal vertical do centro do navio, vista do lado estibordo. O planeador “reserva” áreas do navio para grupos de contentores com destinos específicos. Para efetuar esta tarefa é preciso saber quantos contentores o navio transportará e o porto marítimo a que se destina cada contentor.

Através do uso deste documento o planeador pretende minimizar o número de *slots* ocupadas para cada porto destino e maximizar o número de guias em funcionamento em cada porto. Para maximizar o número de guias em funcionamento por porto, o planeador elabora o plano de carga tendo em atenção que as guias podem não trabalhar simultaneamente em *bays* adjacentes, ou seja, opta por colocar

contentores para o mesmo porto em *bays* não adjacentes, garantindo assim o uso eficiente das gruas.

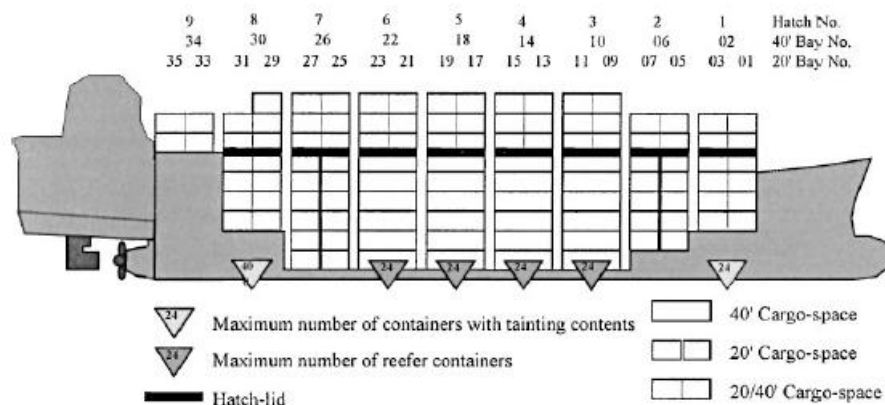


Figura 4 - The General Arrangement (Wilson *et al.*, 1999).

The General Arrangement não indica quantos contentores podem ser armazenados acima ou abaixo do convés do navio. Essa informação é fornecida pelo *The Outline Plan* representada na Figura 5. Aqui os locais do navio destinados ao carregamento de contentores estão minuciosamente retratados, em forma de uma série de colunas verticais que atravessam as várias seções do navio, ou *bays*. Cada *slot* é apresentada como uma pequena caixa. *The Outline Plan* mostra exatamente quantos contentores podem ser carregados em cada *bay*. Cada *slot* é marcada através do uso de letras e cores para indicar em que porto o contentor que transporta será descarregado. As *slots* também indicam as posições que possuem fornecimento elétrico e a presença e tipo de carga especial ou perigosa. Os contentores também podem conter símbolos que apontam para demasiada altura ou largura do mesmo.

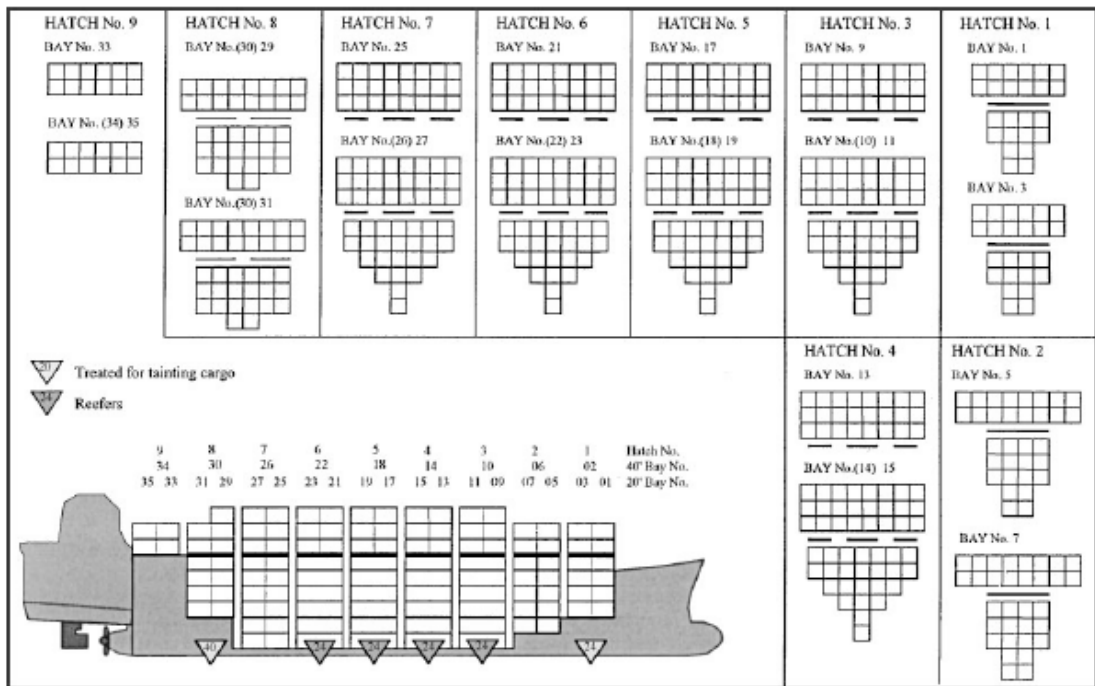


Figura 5 – The Outline Plan (Wilson *et al.*, 1999).

Os planeadores usam o *The Outline Plan* para conseguirem da melhor forma possível acondicionar os contentores latitudinalmente. Os contentores são carregados em colunas verticais (*stacks*). Sempre que um contentor esteja a bloquear o acesso a outros contentores que precisam de ser descarregados, origina a que contentores tenham de ser descarregados e carregados para obter o contentor pretendido. Quando este processo ocorre nos contentores abaixo do convés origina um custo bastante significativo. *Re-handles* (rearranjo dos contentores) também originam custos adicionais, e como já foi referido tais movimentos acontecem quando é preciso mover contentores para permitir acesso a outros que precisam de ser descarregados ou simplesmente para melhorar o plano de carga do navio.

O movimento de contentores incorre num aumento de tempo de permanência do navio no porto, portanto a carga deve ser organizada para que este tempo seja minimizado.

Após a aplicação dos dois documentos o planeador aplica três heurísticas com objetivos diferentes (Wilson *et al.*, 1999):

1. Minimizar o número de escotilhas movidas;
2. Minimizar o número de *overstows*;

3. Minimizar o número de blocos (considera-se um bloco o conjunto de *slots* que se encontram por baixo de uma escotilha) de carga ocupada, de modo a reduzir movimentos de grua e de escotilha.

Depois do uso da combinação dos dois documentos e destas heurísticas o plano de carga do porta-contentores está finalmente terminado.

Como referenciado acima, o modo como é efetuado o carregamento do porta-contentores está pendente dos planeadores e da sua experiência, com a ajuda de certos documentos. Vários autores cientes da dificuldade que representa a elaboração de um plano de carga estudaram o CSP e apresentaram várias abordagens de como resolve-lo.

O problema de alocação de contentores (CSP) também conhecido como *Master Bay Problem*, é um problema NP difícil (Avriel *et al.*, 1999). Isto é o mesmo que dizer que não é possível garantir uma solução ótima para navios de dimensões razoáveis num tempo de processamento razoável. O CSP é um problema de otimização combinatória que depende da dimensão do navio (dado em TEUs) e, da procura e oferta em cada porto destino (Wilson *et al.*, 1999). Para um porta-contentores de 2000 TEUs o número de possibilidades de *overstow* é de aproximadamente 3.3×10^{5735} e quando o tamanho do porta-contentores aumenta, diminui a confiança nos sistemas manuais (Sciomachen *et al.*, 2007). Mesmo para navios pequenos o CSP é considerado grande devido ao enorme número de variáveis e restrições (estabilidade do porta-contentores, separação de carga perigosa, acondicionamento dependente do número de portos, etc). O CSP pode ser explicado como sendo o problema de alocar em slots (posições) diferentes tipos de contentores cada um com características próprias, como o peso, dimensões e tipo de contentor (refrigerado, perigoso, etc.). O objetivo é reduzir os custos de transporte e o número de *overstows*, tendo em conta restrições como a ordem de visita dos portos e restrições relativas aos porta-contentores (Martins *et al.*, 2009). A distribuição tem de ser feita tendo em conta que durante a viagem o navio tem de visitar vários portos onde descarregará contentores e por sua vez carregará novos contentores.

No que diz respeito ao porta-contentores existem certas limitações como o espaço disponível, estabilidade e resistência. Outros aspetos estão relacionados com a velocidade, autonomia e comportamento do navio no caso de intempéries.

O aumento do tamanho dos porta-contentores, a procura de eficiência, disponibilidade de técnicas de otimização e poder computacional, levaram a que este problema tenha sido amplamente estudado nesta última década.

Existem várias abordagens ao CSP que consideram diferentes tipos de restrições. Wilson et al. (Wilson *et al.*, 2000) dividem essas abordagens em três categorias:

- *Simulation based* que combinam simples heurísticas de carga com métodos de simulação;
- *Rule based systems* que usa métodos de inteligência artificial com metaheurísticas;
- *Mathematical programming* que usa métodos de programação matemática com relaxação de várias restrições.

Avriel et al. (Avriel *et al.*, 1998) apresentam uma abordagem exata de programação linear binária para resolver o problema e concluíram que devido ao tamanho dos problemas é impossível aplicar esta abordagem a problemas reais. Portanto os autores desenvolveram uma heurística, *Suspensory Heuristic Procedure*, que permite obter bons resultados em tempos computacionais reduzidos. Contudo o método prova ser muito inflexível no que diz respeito à implementação de restrições.

Aslidis em 1990 apresenta um algoritmo para resolver o caso em que se alocam contentores no navio por colunas, ou seja, os contentores preenchem o navio do fundo até ao topo por colunas (Aslidis, 1990). Havendo numerosas colunas no porta-contentores é possível alocar contentores de modo a que não seja necessário recorrer a *shifts* (mudança de posição dos contentores) em toda a rota que o navio tenha de percorrer. Portanto sempre que numa coluna surgisse a necessidade de usar *shifts*, porque algum contentor bloquearia o acesso a outro, o algoritmo iniciaria a alocação dos contentores que bloqueavam o acesso numa nova coluna evitando o uso de *shifts*.

A Pesquisa Tabu foi pela primeira vez sugerida por Glover (Glover, 1977) e a partir daí passou a ser largamente utilizada. Tem sido aplicada com sucesso para obtenção de soluções em problemas que envolvam horários, entregas tabeladas, problema caixeiro-viajante e otimizações de *layouts*. O principal método explora o espaço de soluções possíveis fazendo uma sequência de movimentos (Glover *et al.*, 1993). Um movimento é a passagem de uma solução para outra melhor. Contudo,

para limitar o espaço de pesquisa, em particular iterações, alguns movimentos são considerados tabu. Por exemplo, um movimento pode ser classificado como tabu se o movimento inverso foi realizado recentemente (dentro de um dado número de iterações) ou pela frequência (um determinado número de vezes).

Martins et al. (Martins *et al.*, 2009) usam um método de duas fases. Na primeira fase os contentores são agrupados por destino usando o algoritmo *Branch and Bound*, tendo por objetivo reduzir o número de *overstows* e movimentos de escotilha. Na segunda fase a Pesquisa Tabu é aplicada para generalizar a solução, numa tentativa de mover os contentores e aloca-los numa *slot* específica, de maneira a reduzir os *re-handles* mantendo sempre presentes as restrições de estabilidade.

Uma das primeiras tentativas para explicar este problema utiliza a técnica de Monte-Carlo e interação humana para providenciar possíveis planos para os navios (Shields, 1984).

Desde então, foram levadas a cabo investigações por Ractliffe et al. (Ractliffe *et al.*, 1994) utilizando sistemas especializados e técnicas *Rule-based* para ajudar o estivador a encontrar configurações adequadas.

Sistemas de decisão *Rule-based* para lidar com o MBPP (*Master Bay Plan Problem*) foram apresentados por Ambrosino et al. em 1998 (Ambrosino *et al.*, 1998), onde utilizam restrições para definir e caracterizar o espaço de possíveis soluções sem necessitarem de usar uma função otimizadora, conseguindo obter bons resultados.

Dubrovsky et al. (Dubrovsky *et al.*, 1999) apresentam um algoritmo genético para minimizar o número de movimentos no problema de planeamento de carga, com a capacidade de incluir restrições apropriadas sobre a estabilidade do navio. Os autores reduzem significativamente o espaço de procura usando um compacto e eficiente esquema de codificação obtendo boas soluções para porta-contentores com 1000 TEUs.

Wilson em 1999 e 2001 (Wilson *et al.*, 1999) e (Wilson *et al.*, 2001) testam a aplicação de algoritmos de pesquisa local e técnicas baseadas na otimização combinatória. Os autores dividem o processo de alocação em duas fases, uma a nível estratégico e outra a nível tático, respetivamente. Usam o algoritmo *Branch and Bound* para resolver o problema de alocar os contentores em compartimentos do navio; depois elaboram um detalhado plano onde designam posições específicas ou localizações no bloco de compartimentos para contentores exclusivos, para tal empregam o algoritmo de Pesquisa Tabu. Os autores apresentam resultados onde

demonstram as soluções sub-ótimas obtidas em tempos computacionais a rondar os 90 minutos para navios de 688 TEUs.

Martins et al. (Martin Jr et al., 1988) desenvolveram um algoritmo heurístico para o MBPP com o objetivo de minimizar o número total de cargas durante a viagem e obter um aceitável nível de estabilidade durante o processo de carga do navio. Terno et al. (Terno et al., 2000) consideram nas suas análises o peso dos contentores e a estabilidade do navio decorrente do MBPP ao (“*multi-pallet loading problem*”).

Sciomachen et al. (Sciomachen et al., 2007) analisaram a conexão entre MBPP e 3D-BPP (*three-dimensional bin packing problem*), que é baseado no algoritmo *Branch and Bound* para 3D-BPP apresentado por (Martello et al., 2000) e estende o procedimento numa abordagem em três fases para incluir a maximização da produtividade do equipamento no cais. Não consideram o envolvimento de contentores com dimensões não standardizadas, assim como contentores que transportam carga especial (materiais perigosos e contentores refrigerados). Consideram que o navio parte do porto onde realizam este estudo e nos portos seguintes só pode descarregar contentores. O algoritmo demonstrou obter soluções com bom desempenho, qualidade e tempo computacional. Um aspeto importante é a capacidade de encontrar planos de carga que maximizam a produtividade dos equipamentos no cais.

Investigadores incluindo Endoth et al. (1998) propuseram um algoritmo de otimização baseado no sistema imunológico e aplicaram-no no problema do caixeiro-viajante.

Wong et al. (Wong et al., 2009), introduzem um algoritmo evolutivo híbrido baseado na imunidade, também conhecido por sistemas imunológicos artificiais híbrido (HAIS) para resolver problemas de otimização multi objetivos de carga de contentores. Desenvolvem uma procura ótima global através da seleção de teorias de seleção clonal, de imunossupressão e inclui características chave de *crossover* e mutação multiponto para eficientemente atingir a curva de Pareto. Os resultados demonstraram que o HAIS conseguiu gerar planos de reposicionamento eficientemente com poupanças em média de 30% dos custos totais de reposicionamento quando comparado com as correntes práticas de reposicionamento numa empresa de transporte marítimo.

Algoritmos Genéticos (AG) têm sido aplicados para vários problemas de rotas e transporte de contentores (Xing et al., 2008). Gehring et al. (Gehring et al., 2002) aplicam AG para maximizar o volume de carregamentos de contentores. Chin et al. (Chin et al., 1999) usam AG para resolver problemas de rotas para veículos.

Rana et al. (Rana *et al.*, 1991) apresentam um modelo de programação inteira não linear para maximizar os lucros totais através da escolha ótima da melhor sequência de portos a visitar para cada porta-contentores e a carga ótima a transportar. O modelo não considera *transshipment* uma vez que não permite a carga de contentores que não são carregados no porto de origem nem descarregados num dos portos a visitar. Os algoritmos que eles desenvolveram resolvem problemas com 3 navios e 20 portos ao fim de uma hora de computação.

Botter et al. (Botter *et al.*, 1991) desenvolveram um modelo matemático para descrever todo o processo de acondicionamento de contentores. Defendem que o modelo pode ser aplicado para obter uma solução ótima, contudo para isso o problema foi bastante simplificado para conseguir atingir esse objetivo. Desta forma demonstram a complexidade computacional deste problema, uma vez que não garante que uma solução ótima seja obtida num tempo de processamento aceitável.

2.4 Vehicle Routing Problem

O VRP é um assunto que tem vindo a ser estudado por diferentes autores e possui grande importância nas áreas de transporte, logística e distribuição.

O VRP tem tomado cada vez proporções maiores dada a sua importância atual para as empresas que possuem uma frota de veículos e necessitem de visitar um conjunto de clientes.

Na origem do VRP está o problema do caixeiro viajante (TSP), onde um caixeiro necessita de visitar um conjunto de cidades e regressar à cidade inicial (Moura, 2005).

Em termos gerais o objetivo do VRP é minimizar os custos globais de transporte tendo um conjunto de veículos que têm de visitar um conjunto de clientes, encontrando a melhor rota para os veículos, de modo a que consigam visitar todos os clientes, garantindo que satisfaçam os seus pedidos e no final cada veículo regresse ao ponto de partida.

O artigo de Dantzig et al. (Dantzig *et al.*, 1954) é o primeiro registo na literatura do VRP, que estuda numa relativa larga escala o TSP (*travelling salesman problem*) e no final propõe uma solução. Após esse estudo seguiram-se inúmeros artigos acerca do TSP. Foi demonstrado que o VRP é uma generalização do TSP. Clarke et al.

(Clarke *et al.*, 1963) foram os primeiros a incorporar mais de um veículo na formulação desse problema.

Outras versões do VRP surgiram nos inícios de 1970, exemplo disso é o encaminhamento de veículos (Levin, 1971) , sistemas dial-a-bus (Wilson *et al.*, 1971), design de rede de transportes (O'connor *et al.*, 1970), encaminhamento de veículos de serviço público (Marks *et al.*, 1971), gestão de distribuição (Eilon *et al.*, 1971), e *solid waste collection* (Liebman, 1970).

Durante os anos de 1980, a pesquisa acerca de VRP gerou diferentes configurações acerca do problema original. Devido à complexidade computacional e escassez de microcomputadores vários estudos acerca do VRP não foram iniciados.

A partir de 1990 registou-se uma aceleração nos trabalhos desenvolvidos acerca do VRP. Uma das causas que levou a essa aceleração foi o aumento da capacidade de processamento dos computadores, sendo assim os investigadores conseguiram desenvolver e implementar algoritmos mais complexos. Durante esta época o termo meta-heurística foi introduzido para denominar um número de algoritmos para resolver o VRP assim como outros problemas de otimização combinatória. Bianchi et al. (Bianchi *et al.*, 1998) estudaram aplicações de VRP com meta-heurísticas tais como:

- *Simulated annealing*;
- *Deterministic annealing*;
- Pesquisa Tabu;
- Algoritmos genéticos;
- *Ant systems*;
- *Neural networks*.

À medida que o poder de computação foi aumentado, pesquisadores e profissionais foram capazes de resolver VRPs mais complexos. Como resultado disso, o número de artigos publicados nesta área durante a década de 1980 e na maior parte da década de 1990 aumentou significativamente. Durante a década de 1990, os métodos computacionais para a obtenção de soluções com maior qualidade levou ao desenvolvimento de novos campos como meta-heurísticas e heurística em tempo real que exigem altas capacidades de programação. A Figura 6 mostra o número de

artigos VRP publicados desde o início da década de 1950. Como pode ser visto, existe uma tendência de aumento do número de artigos publicados sobre o assunto.

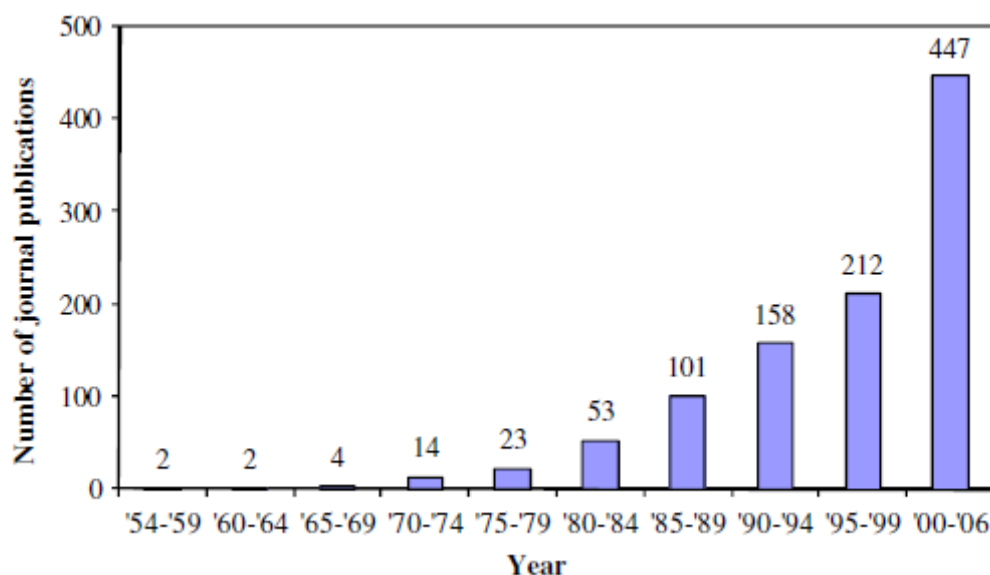


Figura 6 - Número de artigos publicados desde 1954 até 2006 (Eksioglu *et al.*, 2009).

No que diz respeito ao CSSRP, a primeira parte do problema, obtenção da rota, foi considerado por Martins *et al.* em (Martins *et al.*, 2009) como sendo similar ao problema do caixeiro-viajante (TSP) mas neste caso as distâncias entre as cidades seriam obtidas em função dos custos de *overstow* e milhas percorridas entre os portos marítimos.

Considerando esta ideia e que o VRP é uma generalização do TSP, no caso do transporte marítimo o número de portos serão os clientes, cada porto é detentor de uma encomenda (contentores) que será entregue por uma frota de porta-contentores (veículos).

Cada navio iniciará a sua viagem num determinado porto, entregará as encomendas a um conjunto de portos respeitando as datas de entrega para cada porto e no final regressará ao porto de partida.

3.Problema CSSRP (Container Stowage Ship Routing Problem)

Neste capítulo pretende-se abordar o problema CSSRP e caracteriza-lo (secção 3.1). Em seguida apresenta-se a heurística construtiva para resolução do CSSRP (secção 3.2) e os fluxogramas explicando como se procede ao cálculo da rota, carga do navio e descarga do mesmo (secção 3.3).

3.1 Explicação e Caracterização do CSSRP

O CSSRP é obtido através da junção dos dois problemas apresentados no capítulo anterior, o CSP e o VRP.

Pretende-se otimizar a forma de alocação dos contentores nas *slots* do porta-contentores de forma a reduzir o número de *overstows* e *shifts*. A rota obtida deve ser a que minimize as distâncias percorridas na visita a todos os portos. Com estes dois objetivos conseguimos minimizar o tempo despendido na viagem e o tempo de permanência nos portos para a descarga de contentores, logo, minimizar os custos totais de transporte.

No problema CSSRP é necessário considerar as seguintes decisões:

- 1 – que portos cada navio deve visitar;
- 2 – a sequência de visita de cada navio aos portos;
- 3 – que contentores carregar e descarregar em cada navio;
- 4 – como carregar os contentores a bordo do navio tendo em conta a estratégia LIFO (*Last-In-First-Out*) (Moura *et al.*, 2012b).

A importância de reduzir os *overstows* prende-se com o facto de sempre que ocorra um *overstow* este implica a realização de pelo menos um *shift* pois pelo menos um contentor tem de ser retirado e voltar a ser colocado numa outra *slot*. Estas situações surgem por necessidade de descarregar contentores porque chegaram ao porto destino ou em situações em que um contentor bloqueie o acesso a outro. O recurso a *shifts* e *re-handles* consomem tempo. Tendo em conta as taxas alfandegárias e custos de visita nos portos marítimos a redução do tempo consumido em atividades que devem ser evitadas (*shifts*, *re-handles*), com certeza implicará uma enorme redução nos custos.

A forma como é realizado o plano de carga do navio terá repercussões com a necessidade de realizar ou não *shifts* ou *re-handles*.

Minimizar o *overstow* faz parte dos objetivos de um bom plano de carga, conseguindo-se minimizar o *overstow* também se minimiza o uso de *shifts* ou *re-handles*. Após saber a sequência de portos marítimos a visitar aplica-se a estratégia LIFO para elaborar o plano de carga do navio e deste modo reduzir drasticamente a ocorrência de *overstow*.

No caso da ocorrência de *overstow*, um ou mais contentores terão de ser reposicionados obtendo-se um novo plano de carga.

A seleção da rota é uma decisão que terá repercussões no custo total do transporte de contentores. Porta-contentores possuem enormes custos, desde custos operacionais, custos de utilização e custos relacionados com o consumo de combustível. Naturalmente optar por uma rota que minimize a distância total que o porta-contentores terá de percorrer, terá como consequência uma redução nos custos totais, uma vez que minimiza os custos acima mencionados.

Sendo assim, os custos do problema CSSRP estão pendentos da rota escolhida e da forma como serão alocados os contentores no navio. Uma terceira fase é interligar a rota com a alocação dos contentores, ou seja, todas as restrições do CSP e do VRP devem ser consideradas de uma forma integrada.

Com o intuito de reduzir o custo global de distribuição marítima a curta distância neste trabalho desenvolveu-se uma heurística que determina e minimiza as rotas e planos de carga dos contentores, considerando os deadlines dos contentores e a regra LIFO.

De seguida apresentam-se todos os dados do problema CSSRP.

- Dados dos portos

Os portos situam-se em posições geográficas distintas e correspondem a um conjunto de nós do grafo $G(P, A)$, onde $P = \{1, \dots, p\}$ diz respeito ao conjunto de portos e $A = \{(i, j): i, j \in P, i \neq j\}$ o conjunto de arcos em G . A distância relativa a cada arco está associada a d_{ij} que por sua vez corresponde à distância entre o porto i e o porto j em milhas náuticas. O porto i quando recebe a visita do porta-contentores k , incorre num custo, denominado de custo de visita μ_{ik} (em euros), que se obtém através das taxas e custos de utilização de cada porto marítimo. O porto com índice um é de onde parte o porta-contentores e o custo de visita deste porto também é contabilizado.

- Dados dos porta-contentores

Os porta-contentores possuem diversas características. Essas características influenciam a heurística e têm de ser abordadas. O conjunto de porta-contentores é representado por $V = \{1, \dots, v\}$. Estes possuem uma velocidade máxima, velocidade

essa que é influenciada por diversos fatores, como a agitação marítima ou o peso total dos contentores. Neste caso assume-se que a velocidade é a mesma em toda a extensão da rota e é representada por vel_k . Um porta-contentores possui diversos custos, desde o custo de utilização do porta-contentores uc_k , que provém do número de tripulantes a bordo pelo número de dias da viagem (por dia, em euros). C_k representa o custo operacional da viagem (por unidade de distância, em euros) e está dependente do custo de combustível/milhas náuticas. A capacidade do porta-contentores é Q_k , em que k é o peso. O tempo de serviço do porta-contentores k no porto i está representado por t_{ik} .

- Dados dos contentores

Os contentores têm dimensões *standard* (TEU's). O porta-contentores é carregado no porto inicial com todos os contentores que serão descarregados nos portos seguintes, o conjunto de contentores é definido por $C_p = \{\alpha_i, \dots, \alpha_p\}$. Os contentores são carregados mediante a procura de cada porto marítimo, sendo definida a procura em número de contentores por α para o porto i . No entanto no problema soma-se a procura total de todos os portos obtendo o peso total da procura (q_i) para a data de entrega (dl_i).

- Dados da Carga/Posicionamento

O carregamento do porta-contentores é elaborado segundo uma matriz que indica as *slots* disponíveis para carga de contentores normais, refrigerados e locais que estão incapacitados de acolher contentores por estarem ocupados com maquinaria e outros equipamentos. Cada *slot* situa-se numa matriz constituída por linhas que variam entre 1 e 9 e colunas que variam entre 1 e 15. Na matriz a primeira linha corresponde à posição inicial a partir do topo da matriz e a primeira coluna é a do lado esquerdo da matriz. O conjunto de contentores α_i , que correspondem à procura de cada porto i , serão alocados nas *slots* do navio. O porta-contentores será carregado cumprindo as restrições acima descritas, ou seja, o conjunto de contentores não pode ultrapassar a capacidade total do navio. Os contentores serão alocados nas *slots*, no caso de ocorrer *overstow* e portanto seja necessário proceder a *shifts*, o custo derivado da movimentação do(s) contentor(es) está representado por m_α , e como um *shift* envolve uma descarga e carga de contentor, m_α obtém-se

multiplicando por 2. De salientar que a heurística calcula o número de contentores a serem movimentados e incorre m_α para cada contentor, sendo que no final procede ao seu somatório.

A heurística desenvolvida para dar resposta ao problema CSSRP tem como objetivo minimizar o custo total de distribuição considerando todas as restrições do problema. Este objetivo é definido pela seguinte equação, de acordo com (Moura *et al.*, 2012a).

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

Tal como já referido, a função objetivo pretende minimizar os custos totais do transporte marítimo. É composta por três componentes. As duas primeiras estão relacionadas com os custos de deslocação e a terceira com o custo dos *overstows*. Cada componente tem associado um peso: w_1 , w_2 , w_3 . Cada peso, atribuído a cada parcela varia consoante o decisor, isto é, de acordo com o peso que este pretenda atribuir a cada uma delas.

A primeira componente da função objetivo diz respeito ao somatório dos custos de deslocamento dos porta-contentores do porto i para o porto j . Estes custos são obtidos através da distância a percorrer pelo porta-contentores entre os portos, custo operacional da viagem, o custo de visita do porta-contentores k ao porto i e custo de carregamento dos contentores no navio.

A segunda componente corresponde ao somatório dos custos de utilização dos porta-contentores, que se obtém multiplicando o custo de utilização pelo número de dias que demora a efetuar a viagem.

A terceira e última componente trata do número de *shifts* necessários fazer para gerir a carga de cada navio em cada porto. Como referido anteriormente, considera-se um *shift* um processo que envolve uma descarga e posterior carga do mesmo contentor, como tal este custo é contabilizado a dobrar.

3.2 Heurística construtiva

De seguida apresenta-se a heurística criada para resolução do CSSRP. O algoritmo heurístico tem como objetivo minimizar os custos totais de transporte marítimo de curta distância. A heurística pode ser dividida em duas fases: encontrar uma rota para o navio e alocar os contentores no mesmo.

Numa primeira instância a heurística calcula a melhor rota a seguir pelo(s) navio(s). A melhor rota é aquela que minimiza a distância e por conseguinte o tempo despendido na viagem. A rota inicia-se e termina no mesmo porto, obrigando assim o navio a regressar ao porto de origem. A restrição inerente à construção da rota é o deadline dos contentores para cada porto. Com vista à simplificação dos dados, considera-se o deadline de um porto, o menor dos deadlines de todos os contentores a entregar nesse mesmo porto.

A segunda fase da heurística é proceder à alocação dos contentores no porta-contentores de acordo com a rota determinada e seguindo a estratégia LIFO, uma vez que os primeiros contentores a serem carregados serão os últimos a serem descarregados. Durante este procedimento a heurística está sujeita a inúmeras restrições, como a dimensão dos contentores (20' ou 40'), tipo de contentor: normal ou refrigerado. No caso de ser refrigerado este terá posições pré-definidas na matriz de posicionamento, uma vez que estes precisam de estar conectados à rede elétrica. Cada navio (escolhidos para este problema) possui 11 *slots* para contentores refrigerados, caso estas não sejam todas ocupadas por contentores refrigerados podem ser utilizadas por contentores normais, aproveitando ao máximo a capacidade do navio.

O algoritmo heurístico garante que a capacidade do navio não é excedida, tanto em número de contentores como a nível de peso total dos mesmos. Caso existam mais contentores do que lugares disponíveis no navio, ou o peso total dos contentores exceda o peso máximo que o navio pode suportar, a heurística utilizará outro navio para proceder à distribuição. Não existe limitação à utilização do número de navios, sendo o objetivo inicial a utilização de apenas um navio, mas quando não é possível (por violação de uma das restrições de capacidade ou mesmo de deadlines) pode incluir-se na solução um maior número de navios.

Normalmente o carregamento dos porta-contentores é efetuado por colunas (*stacks*) desde o fundo do navio até ao topo, mas esta heurística carregará o navio na horizontal começando pelo fundo repetindo este processo até ao topo do navio. Desta

forma garante-se a estabilidade do navio. Outra vantagem deste tipo de carregamento é a redução de *overstows* e *re-handles*. No entanto, estes podem ocorrer. Quando isto sucede a função objetivo é penalizada. Isto é, por cada *overstow* existente num determinado porto, calcula-se o número de contentores que precisam ser removidos e posteriormente realocados até dar acesso ao contentor (ou contentores) que precisa ser descarregado. Para cada contentor que esteja em *overstow* é adicionado um custo, custo esse que corresponde à sua descarga e carga. Sempre que um *overstow* ocorra ou seja simplesmente descarregado porque chegou ao seu destino, obtém-se um novo plano de carga que a heurística calcula e disponibiliza graficamente.

Sendo um algoritmo guloso, a sequência da rota é obtida da seguinte forma: a partir do porto inicial, escolhe-se aquele que se encontra mais próximo, ou seja, aquele que está mais perto e que demora menos tempo a alcançar. No entanto a rota possui uma restrição adicional, a sequência da rota tem de obedecer ao deadline imposto pelos contentores. A partir do porto inicial a heurística adiciona à rota aquele que se encontra mais próximo, verifica se a restrição do deadline não é violada. Se respeitar o deadline o porto passa a pertencer à rota, sempre que o deadline não seja respeitado, a heurística exclui o porto selecionado (este será usado posteriormente) e procura o 2º porto mais próximo que respeite o deadline. Repetindo este processo até que já não existam portos para adicionar à rota ou até que de todos os portos ainda não pertencentes à rota, violem pelo menos uma das restrições.

Após criada a sequência de visita aos portos, segue-se a alocação dos contentores nos porta-contentores.

Estes serão alocados segundo a estratégia LIFO. O porta-contentores é composto por *slots*. Uma *slot* pode ser composta por um contentor de 40' ou por dois contentores de 20'. Os contentores refrigerados, que podem ser de 40' ou 20', só podem ser alocados em *slots* dedicadas, porque necessitam de estar ligados à eletricidade. Na Figura 7 encontram-se as posições onde são colocados os contentores refrigerados.

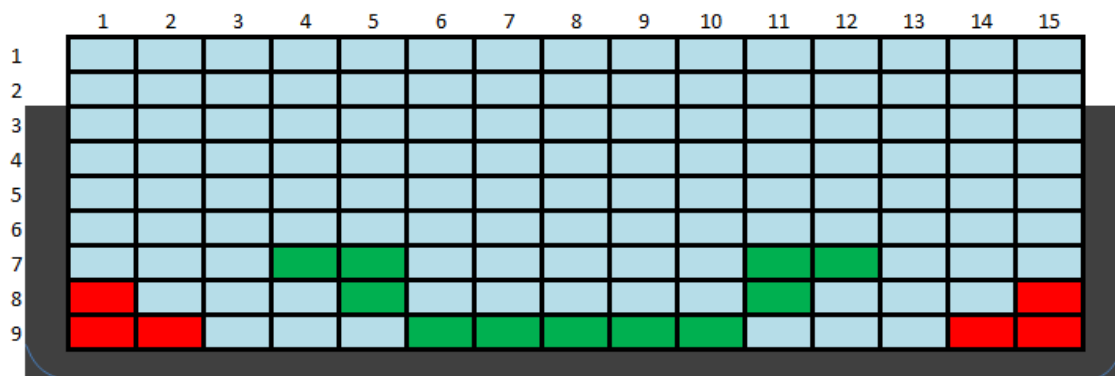


Figura 7 - Matriz de alocação dos contentores.

A azul estão indicadas as *slots* onde podem ser colocados os contentores normais de 20' e 40'. A verde encontram-se as *slots* reservadas para os contentores refrigerados e a vermelho são *slots* indisponíveis (ocupadas com maquinaria, equipamentos, tanques de água e forma do casco do navio).

Apesar de os contentores refrigerados poderem apenas ser transportados nas condições anteriores, os contentores normais podem ser alocados nas *slots* dos refrigerados caso não exista mais espaço disponível nas *slots* disponibilizadas para os contentores normais. Pretende-se assim maximizar a capacidade de transporte do porta-contentores.

A heurística preenche o porta-contentores na horizontal, começando pelo fundo, *slot* (9,3) até à *slot* (9,13), repetindo este processo nas *slots* acima. O motivo de ser assim preenchido prende-se com a necessidade de garantir estabilidade ao navio. A outra opção seria preencher o porta-contentores por colunas, por exemplo, da *slot* (7,1) à (1,1) e seguidamente a adjacente, *slot* (8,2) à (1,2), contudo se o navio não fosse todo preenchido estaria com um plano de carga instável.

Nos casos em que seja necessário utilizar todas as *slots* pertencentes aos refrigerados, mas não há número suficiente de contentores normais para ocupar as *slots* abaixo das refrigeradas, a heurística coloca contentores vazios para garantir suporte aos contentores refrigerados, evitando que estes fiquem suspensos. Isto é uma prática corrente nas estivas dos porta-contentores. Algo semelhante acontece quando o número de contentores de 20' é ímpar, ou seja, uma das *slots* ficará meia preenchida. Nestes casos a heurística adiciona um contentor vazio de 20' para desta forma ocupar devidamente a *slot* e garantir sustentação necessária a possíveis contentores que tenham de ser transportados em cima deles. A heurística garante sempre que nenhum contentor fique suspenso.

3.3 Fluxogramas

De seguida apresentam-se três fluxogramas para explicação da heurística atrás apresentada. Cálculo da rota (Figura 8), carregamento do navio (Figura 9) e descarga do mesmo (Figura 10).

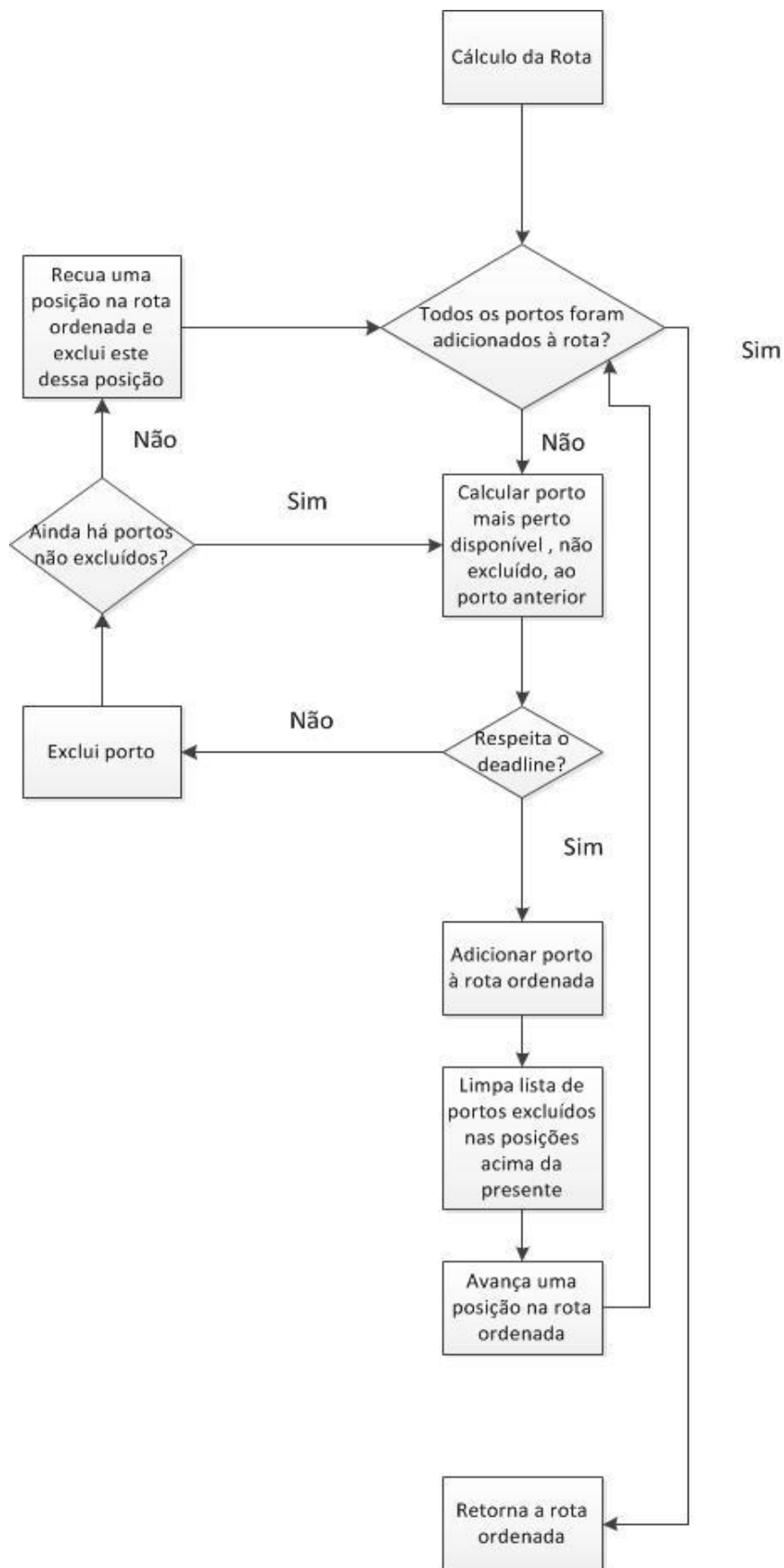


Figura 8 - Fluxograma com a demonstração do cálculo da rota.

No fluxograma da Figura 8 mostra-se como é calculada a rota que o navio percorrerá. O primeiro porto que adiciona à rota é aquele que se encontra mais próximo do porto de partida e que respeite o deadline imposto pelos contentores. Caso não respeite o deadline exclui-se este porto e procura o segundo porto mais próximo do porto de partida e que respeite o deadline. Este processo repete-se até encontrar um porto que respeite as restrições ou até que não existam mais portos. Se todos os portos forem excluídos, a heurística recua uma posição na rota e exclui esse porto dessa posição e repete o processo acima descrito.

Sempre que adiciona um porto à rota, limpa a lista de portos excluídos ficando todos os portos disponíveis para serem adicionados na próxima posição da rota. O cálculo da rota termina assim que todos os portos forem adicionados à rota.

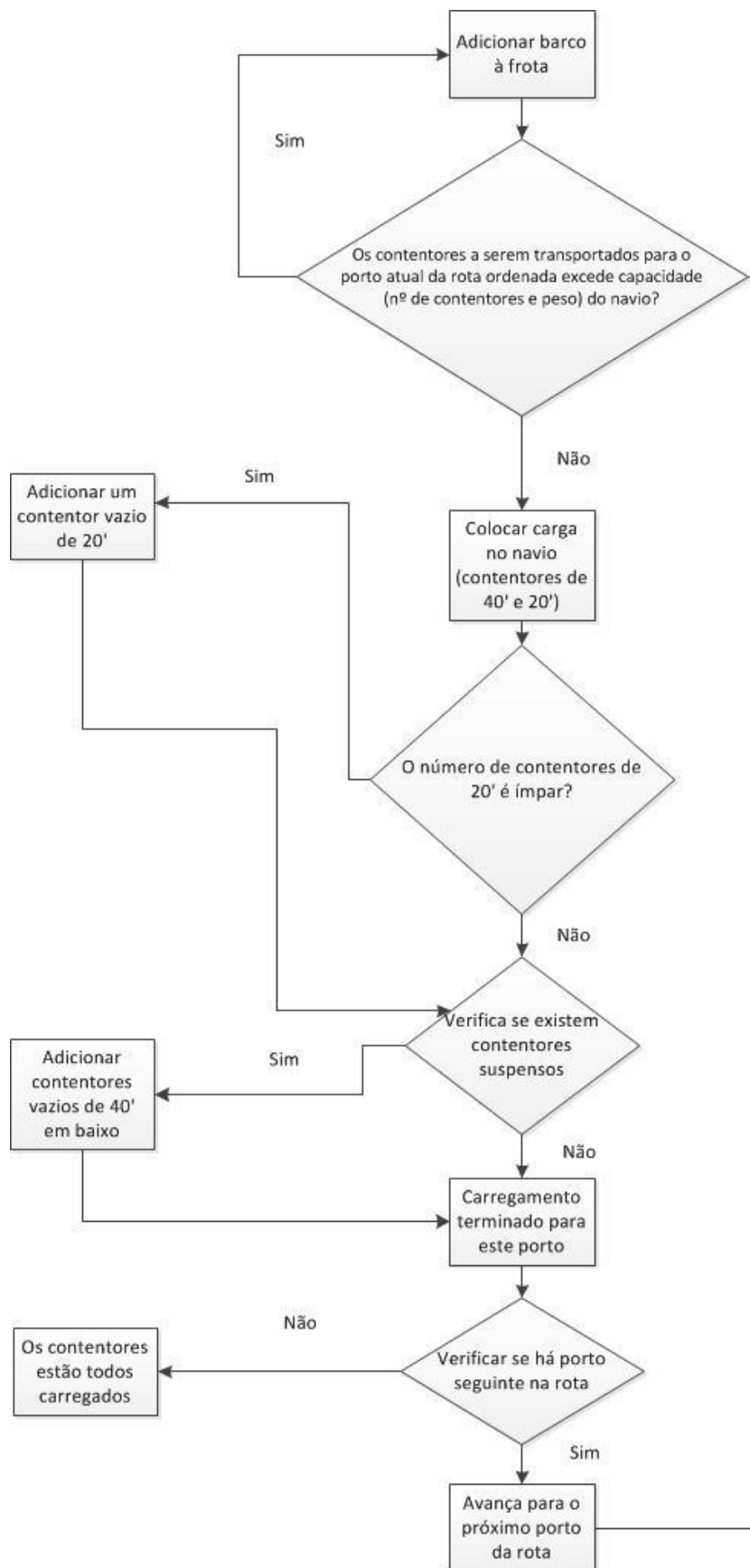


Figura 9 - Fluxograma que demonstra o carregamento do navio.

No fluxograma da Figura 9 descreve-se como é efetuado o carregamento do navio. Primeiro verifica-se se há capacidade para transportar os contentores para o próximo porto da rota anteriormente calculada. Caso não tenha capacidade adiciona um novo barco para transportar os contentores em questão.

A heurística coloca a carga no navio pela estratégia LIFO, carregando os contentores de 40' e 20'. Quando o número de contentores de 20' a serem transportados é ímpar, a heurística adiciona um contentor vazio de 20' de forma a completar a *slot*. Depois verifica se existem contentores suspensos. Na existência de contentores suspensos adiciona contentores de 40' em baixo do contentor suspenso. Após estas verificações o carregamento para o porto atual está terminado. O passo seguinte é verificar se existem mais portos na rota por carregar. No caso de existirem mais portos com carga para ser carregada a heurística repete o processo, se a carga de todos os portos já tiver sido carregada o carregamento do navio está terminado.

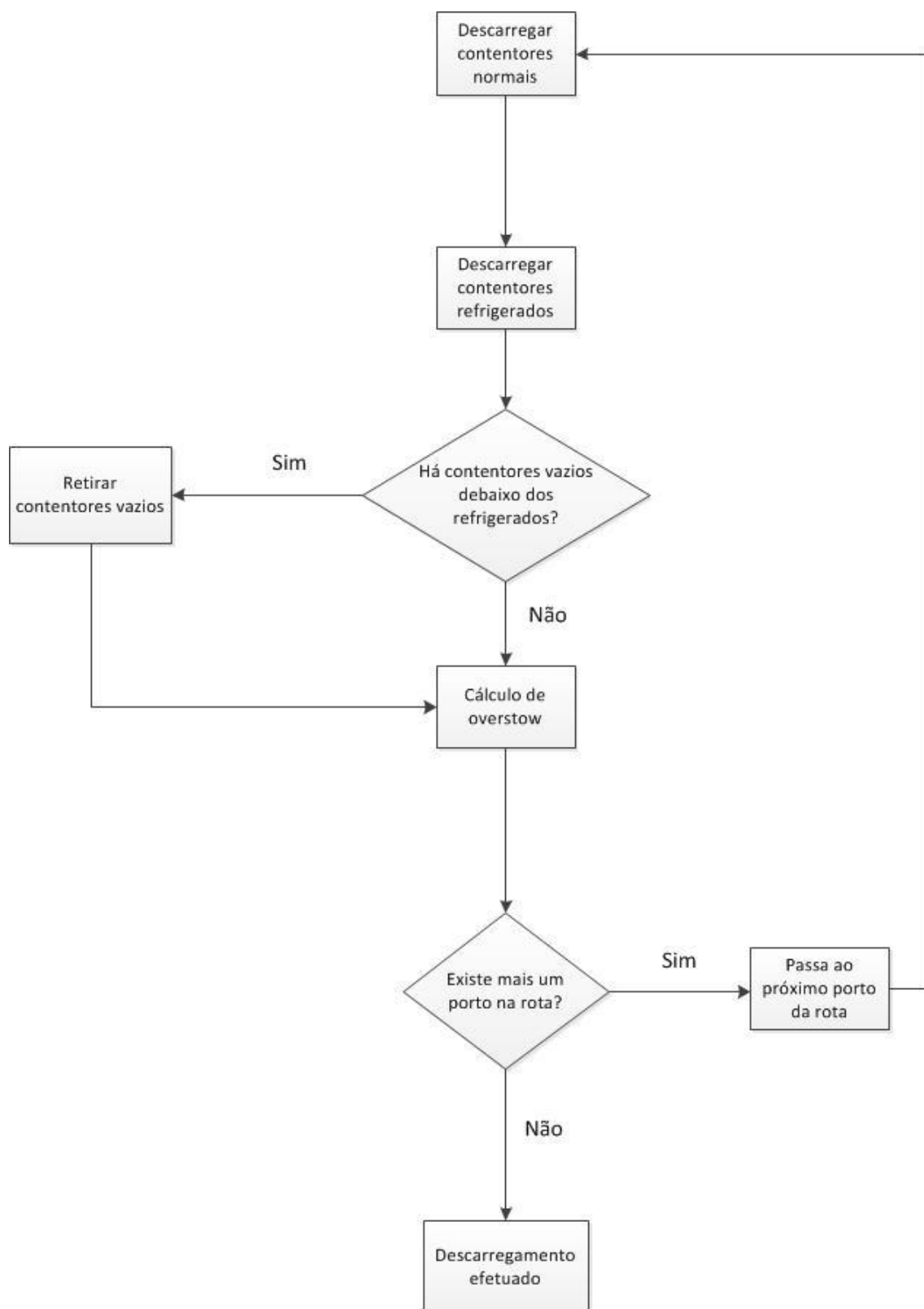


Figura 10 - Fluxograma que demonstra o descarregamento do navio.

A Figura 10 representa o fluxograma para a descarga do porta-contentores. Os primeiros contentores a serem descarregados são os normais, seguindo-se a descarga dos contentores refrigerados. Se existem contentores vazios debaixo dos refrigerados estes também são descarregados. Após o descarregamento dos contentores efetua-se o cálculo do *overstow* contabilizando o número de contentores que tiveram de ser retirados, e posteriormente carregados, por estarem a bloquear o acesso aos contentores que precisavam de ser descarregados por terem chegado ao seu destino.

Seguidamente verifica se existe mais um porto na rota, se sim passa ao próximo porto e repete o processo descrito acima, caso contrário o descarregamento está terminado.

4. Teste da Heurística desenvolvida e análise de resultados

Este capítulo destina-se a testar a heurística desenvolvida para diferentes instâncias e diferentes valores (secção 4.1) de forma a testar a sua robustez, desempenho e comportamento. Seguidamente analisam-se os resultados obtidos com a heurística (secção 4.2).

4.1 Caracterização das Instâncias

As instâncias utilizadas para validação da heurística são baseadas em dados reais, mas foi feita uma simplificação nos dados em termos de alguns custos.

As tarifas portuárias são as mesmas para todos os portos marítimos. Além disso, o custo de movimentação dos contentores nos diferentes portos (*shifts*) e o custo de utilização dos navios também foram considerados sempre os mesmos, assim como a sua velocidade de navegação que foi considerada constante independentemente da carga e intempéries.

As instâncias utilizadas possuem dimensões diferentes no que diz respeito ao número de portos com o intuito de testar a robustez, capacidade de resolução da heurística e tempo computacional. Além disso, a ideia é comparar as soluções obtidas pela heurística, com a solução ótima deste problema, para ver até que ponto as soluções estão perto ou não do valor ótimo. Assim, foram testados os problemas desenvolvidos por Moura et al. (2012) (Moura *et al.*, 2012a) onde são apresentadas as soluções ótimas para cada uma das instâncias. Sendo assim, os problemas testados variam em número de portos: P=5, P=10.

O número de porta-contentores varia consoante o número de portos. Para instâncias de 5 portos marítimos serão utilizados 1 e 2 porta-contentores. Por sua vez para instâncias de 10 portos usa-se 1 único porta-contentores.

As distâncias consideradas entre os diferentes portos marítimos são as mesmas que foram utilizadas por (Moura *et al.*, 2012a). Estas distâncias (em milhas) para os 5 portos marítimos são reais e correspondem a portos marítimos europeus. Para as instâncias em que P=10 geraram-se distâncias aleatórias a partir das distâncias dos 5 portos marítimos europeus.

A capacidade máxima de cada porta-contentores é, $Q_k = 8445$, este valor mantém-se inalterado para todas as instâncias. A velocidade de cada navio diz respeito à velocidade média dos porta-contentores, esta como já foi referido considera-se constante em todas as situações, não sendo alterada pelo número de contentores, agitação marítima, entre outros. O consumo de combustível também é constante independentemente do número de contentores transportados.

Os custos operacionais, custos de visita, custo de realização de um *shift*, custos de utilização do porta-contentores por dia e tempos de serviço para cada instância são os mesmos que foram usados em (Moura *et al.*, 2012a) .

O número de contentores que se destina a cada porto marítimo varia consoante a instância que estamos a considerar. A distribuição de contentores para cada porto encontra-se na Tabela 1:

Tabela 1 - Distribuição de contentores para cada instância/teste.

Portos	Caraterização	Tipo Contentor	Quantidade
5	Normal 1	20'	4
		40'	4
		20' Refer	1
		40' Refer	1
	Normal 2	20'	40
		40'	33
		20' Refer	7
		40' Refer	4
	Fracamente Heterogéneo	20'	46
		40'	75
		20' Refer	8
		40' Refer	3
	Fortemente Heterogéneo	20'	38
		40'	85
		20' Refer	8
		40' Refer	3
	Deadline Curto	20'	90
		40'	64
		20' Refer	11
		40' Refer	11
Deadline Longo	20'	90	
	40'	64	
	20' Refer	11	
	40' Refer	11	
10	Normal	20'	57
		40'	24
		20' Refer	5
		40' Refer	6
	Fracamente Heterogéneo	20'	51
		40'	20
		20' Refer	5
		40' Refer	6
	Fortemente Heterogéneo	20'	47
		40'	24
		20' Refer	5
		40' Refer	6

Nos testes fez-se alterar o número de portos, número de contentores, o deadline (curto ou longo) e a forma como foi carregado o porta-contentores. O carregamento do porta-contentores varia entre normal (não há grande variação em termos de quantidades por porto de cada tipo de contentor), fracamente heterogéneo (alguma variação entre quantidades de contentores por porto) e fortemente heterogéneo (quantidades de contentores por porto bastante diferentes).

Cada contentor e procura possui um determinado peso (em toneladas). A variação do peso total por porto tem a seguinte distribuição (Tabela 2).

Tabela 2 - Variação do peso dos contentores para cada porto.

Porto	Peso de cada contentor (ton)
A	0
B	1
C	2
D	1,5
E	1,7
F	1,6
G	2
H	1,4
I	1,8
J	1,9

Os contentores têm um tempo máximo para chegarem a cada porto de destino, esse tempo varia entre 4 a 20 dias. O porta-contentores tem de garantir que chega dentro do prazo de entrega dos contentores.

4.2 Análise dos Resultados obtidos

Os resultados obtidos com a heurística são comparados com a solução ótima apresentada em (Moura *et al.*, 2012a) calculada através de um modelo matemático.

O objetivo é obter resultados iguais ou muito próximos aos da solução ótima.

Na Tabela 3 apresentam-se os resultados obtidos com a heurística desenvolvida neste trabalho e a solução ótima obtida pelo modelo de programação linear.

Tabela 3 - Resultados obtidos pela heurística e comparação com os resultados da solução ótima.

Nº Instância	Portos	Caraterização	Nº de Porta-Contentores	Overstow	Custo Total Heurística (€)	Solução Ótima (€)	Rácio custo da Heurística / Solução Ótima (% custo)
1	5	Normal 1	1	0	128.762	118.370	8,78
2	5	Normal 2	1	38	130.001	120.125	8,22
3	5	Fracamente heterogéneo	1	18	130.231	164.246	-20,71
4	5	Fortemente heterogéneo	1	46	130.531	235.544	-44,58
5	5	Deadline curto	2	56	169.052	192.488	-12,18
6	5	Deadline longo	2	56	169.052	192.488	-12,18
7	10	Normal	1	16	207.439	196.870	5,37
8	10	Fracamente heterogéneo	1	10	207.239	196.770	5,32
9	10	Fortemente heterogéneo	1	24	207.379	196.770	5,39

Pode-se verificar que os custos totais de transporte obtidos pela heurística desenvolvida quando testado para 5 portos e 1 navio são muito perto da solução ótima. A distinção do carregamento entre fracamente ou fortemente heterogéneo para 5 portos provoca uma alteração insignificante no custo total de transporte, o mesmo sucede quando testado nestas condições para 10 portos, a única alteração é o número de *overstow* que é superior no fortemente heterogéneo. A alteração do prazo de entrega (deadline curto ou longo) recorrendo a 2 porta-contentores não interfere no custo total do transporte.

No Gráfico 1 compara-se e analisam-se os dados relativos ao custo total de transporte da heurística e da solução ótima.

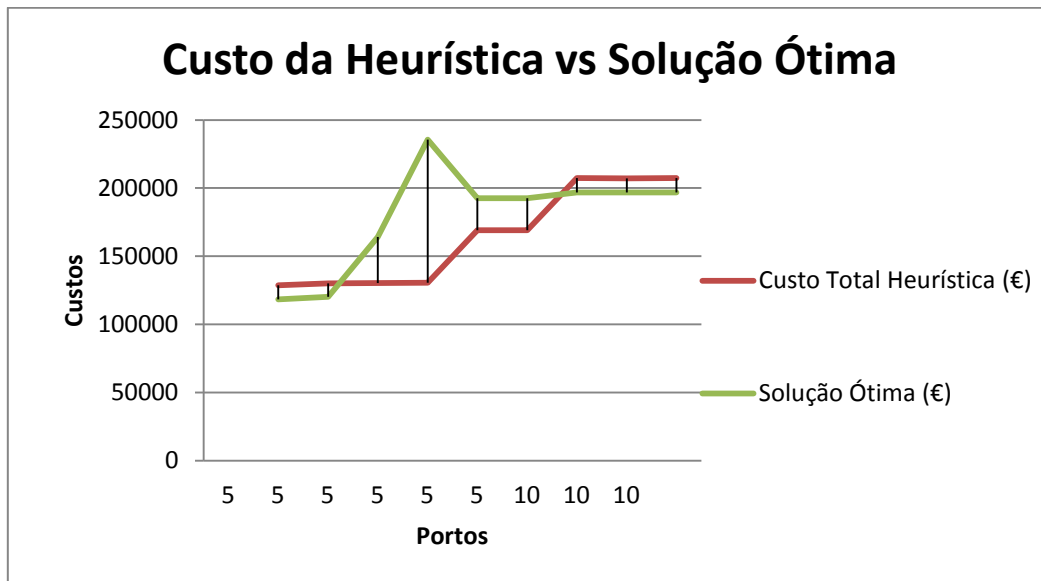


Gráfico 1 - Comparação do custo da Heurística vs Solução Ótima.

Como se pode observar pelo Gráfico 1 e Tabela 3 existem 4 situações (instâncias 3, 4, 5 e 6) onde a solução obtida pela heurística é inferior ao valor da solução ótima. Essa situação ocorre porque na resolução exata, o modelo ao minimizar os custos totais de distribuição também garante que não existem *overstows* (uma vez que é a 3ª componente da função objetivo). Ou seja, com o modelo matemático o *overstow* idealmente será 0, como tal, pode acontecer que piore a rota em detrimento dos *overstows*. Como o custo imputado às rotas (1ª e 2ª componente da função objetivo) é muito superior ao custo imputado ao *overstow*, então a alteração da ordem de visita dos portos pode resultar num custo maior, do que mantendo a melhor das rotas e considerando os custos dos *overstows*. Por outro lado, com a heurística minimiza-se a rota e só depois de ter a sequência definida é que através da regra LIFO se carrega o navio, logo permite a existência de *overstows*.

Como se pode constatar, nas instâncias 1, 2, 7, 8 e 9 os valores obtidos com a heurística são superiores aos valores ótimos, mas a diferença não é muito significativa (menor que 9%). Isto quer dizer que os resultados obtidos com a heurística estão perto do valor ótimo, logo podem ser considerados bons resultados.

Analisando a Tabela 3, verifica-se que nas instâncias 1 e 2 os custos obtidos pela heurística são 8% superiores à solução ótima. Nas instâncias 7, 8 e 9 esta diferença é cerca de 6% superior à solução ótima.

No entanto e pelos motivos já explicados, nas instâncias 3 e 4, variando a carga do navio para fracamente heterogênea e fortemente heterogênea, verifica-se uma redução de 20,71% e 44,58% respectivamente, em comparação com a solução ótima. Tais reduções devem-se à existência de *overstow* que veio reduzir o custo total de transporte.

Nas situações de 5 portos com 2 porta-contentores, variando o deadline (curto/longo) (instâncias 5 e 6) observa-se uma redução de 12,18% para os dois casos, em relação ao modelo matemático.

As reduções verificadas nas instâncias 3, 4, 5 e 6 são obtidas devido à existência de *overstow*, que conseqüentemente permite ao navio percorrer a rota mais curta (minimizando o custo total de distribuição marítima). Nas instâncias 3 e 4 a solução ótima para não obter *overstow* precisa de utilizar 2 navios (aumentando assim os custos totais), enquanto que a heurística usa apenas um navio onde ocorre *overstow*. A Tabela 4 demonstra as rotas escolhidas pela heurística e pela solução ótima. Nas instâncias 3 e 4 a heurística conseguiu uma rota 34,8% mais curta que a rota optada pela solução ótima e nas instâncias 5 e 6 a rota obtida pela heurística é 27,6% menor que a selecionada pela solução ótima.

Tabela 4 - Comparação das rotas e distâncias obtidas pela heurística e solução ótima

Comparação das rotas e distâncias (em milhas) obtidas pela heurística e solução ótima								
Instância	Navios	Rota Heurística	Distância por navio:	Distância Instância:	Rota Solução ótima	Distância por navio:	Distância Instância	Redução na distância através de heurística (%)
3	1	A-C-D-B-E-A	1878	1878	A-E-A	874	2880	34,8
	2	Não usa			A-C-D-B-A	2006		
4	1	A-C-D-B-E-A	1878	1878	A-C-D-B-A	2006	2880	34,8
	2	Não usa			A-E-A	874		
5	1	A-C-A	774	2694	A-B-D-A	2048	3721	27,6
	2	A-D-B-E-A	1920		A-C-E-A	1673		
6	1	A-C-A	774	2694	A-D-B-A	2048	3721	27,6
	2	A-D-B-E-A	1920		A-C-E-A	1673		

Na Tabela 5, estão apresentados os tempos de processamento obtidos pela heurística e pelo modelo matemático.

Tabela 5 - Tempos de processamento obtidos pela heurística e pela solução ótima.

Nº Instância	Nº de Portos	Caraterização	Nº de Porta-Contentores	Tempo de processamento (heurística) (s)	Tempo de processamento (Modelo) (s)	Rácio Heurística / Modelo (% tempo)
1	5	normal	1	0,17	5	-96,60
2	5	normal	1	0,2	17	-98,82
3	5	fracamente heterogéneo	1	0,17	20	-99,15
4	5	fortemente heterogéneo	1	0,19	17	-98,88
5	5	deadline curto	2	0,2	52	-99,62
6	5	deadline longo	2	0,21	63	-99,67
7	10	normal	1	0,33	66	-99,50
8	10	fracamente heterogéneo	1	0,3	22	-98,64
9	10	fortemente heterogéneo	1	0,36	13	-97,23

O tempo de processamento do cálculo da rota e alocação dos contentores no porta-contentores demora entre 2 a 3 décimas de segundo quando realizado pela heurística independentemente das instâncias. Por sua vez o tempo de processamento do modelo matemático varia entre 5 segundos (5 portos, 1 porta-contentores, carregamento normal) e 66 segundos para 10 portos, 1 porta-contentores e carregamento normal.

De seguida apresentam-se gráficos com uma comparação destes resultados.

No Gráfico 2 observamos que o tempo de processamento da heurística é bastante reduzido e possui pouca variação para as diferentes instâncias. O tempo de processamento do modelo matemático não é tão constante, variando bastante para diferentes instâncias.

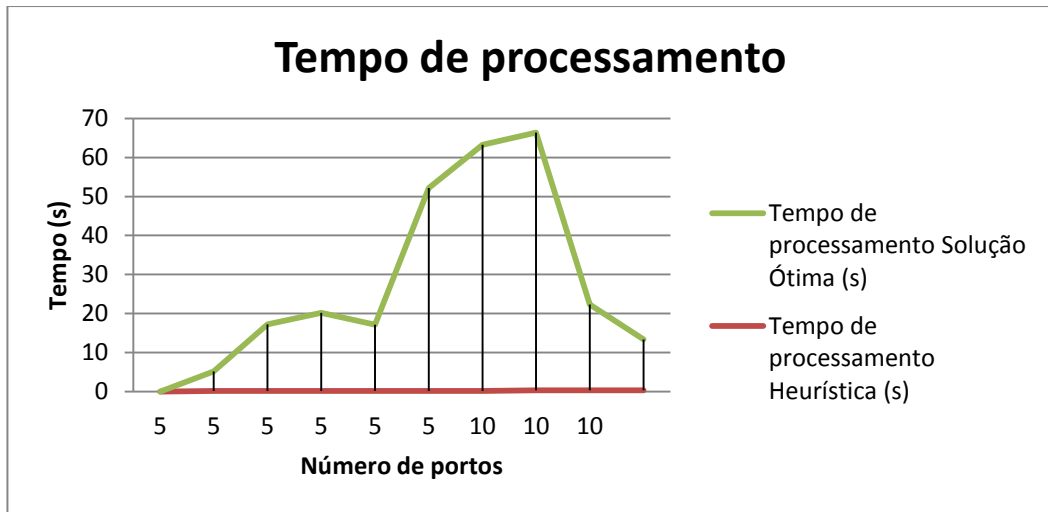


Gráfico 2 - Tempo de processamento da heurística e da solução ótima.

Como é expectável no Gráfico 3, o tempo de computação da heurística é bastante inferior ao do modelo matemático. Verificam-se reduções que variam entre os 96,60% no caso de 5 portos, 1 porta-contentores e carregamento normal e 99,67 para 5 portos, 2 porta-contentores e deadline longo para os contentores.

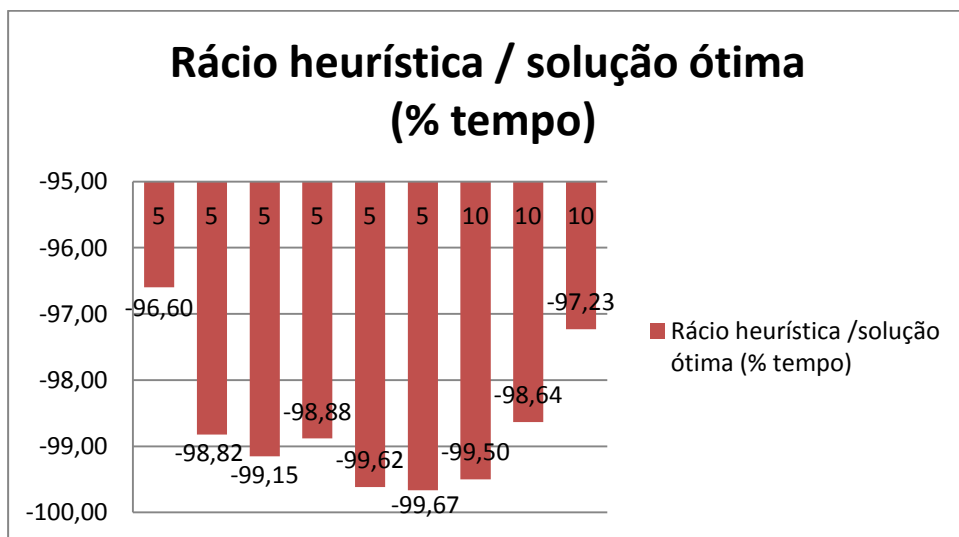


Gráfico 3 - Rácio em (%) dos tempos obtidos pela heurística e solução ótima.

5. Conclusão

A complexidade do tema CSSRP levou a que vários investigadores tivessem efetuado trabalhos nesta área, sempre à procura da melhor solução, utilizando diferentes métodos e formas de resolver o CSSRP. Várias vezes se depararam com limitações a nível de tempos computacionais quando resolviam problemas mais complexos com métodos exatos.

Neste trabalho optou-se por desenvolver uma heurística que no geral é considerada gulosa, uma vez que em cada iteração da construção de rotas escolhe sempre a melhor das opções. Esta heurística, tal como qualquer outra heurística ou algoritmo não exato, não tem garantia de chegar à solução ótima, mas sim, obtém soluções válidas para o problema, nomeadamente no que diz respeito à obtenção da rota mais curta, minimização de *overstow* e validação de todas as restrições.

Algumas características do problema foram simplificadas, como o consumo de combustível por navio, velocidade, peso, tarifas portuárias e estabilidade do navio. Desta forma pretendeu-se reduzir alguma da sua complexidade, contudo não retira validade à heurística.

Testou-se a heurística para diferentes instâncias, de forma a analisar como o número de portos e porta-contentores influenciam a obtenção de resultados, assim como o custo total do transporte marítimo e o tempo de processamento usado. Os resultados foram comparados com o modelo matemático apresentado por (Moura *et al.*, 2012a) que devolve a solução ótima. A comparação servia para verificar a variação eficácia da heurística e de que forma a permissão do uso de *overstow* pela heurística influencia os resultados finais (o modelo matemático proíbe a existência de *overstow*).

Verificou-se que o uso de *overstow* apesar de ser uma prática a ser evitada, por vezes permite que o navio percorra a rota mais curta e que em certos portos proceda a *shifts* para descarregar os contentores que chegaram ao seu destino. No global esta prática poderia compensar, uma vez que o custo do *overstow* é inferior quando comparado ao custo de alteração de visita aos portos marítimos. Mas, uma vez que a existência de *overstows* implica uma maior permanência nos portos e uma maior complexidade logística nos mesmos, esta decisão teria de ser deixada para um gestor portuário. O tempo computacional da heurística é praticamente instantâneo (menos de 0,4 segundos) e é pouco afetado por alteração do número de portos a visitar, assim como o número de navios.

Para futuros trabalhos existem várias situações que podem ser melhoradas, como a distribuição do peso pelo porta-contentores, onde os contentores mais pesados devem ser colocados no fundo do navio, ponderar a utilização de contentores

perigosos e ventilados, melhorar a matriz de alocação dos contentores, tornando-a mais próxima da realidade, incorporar uma função que relacione a estabilidade do navio com a colocação dos contentores, etc. Além disso, seria também conveniente o desenvolvimento de uma heurística de melhoria que trabalhe-se as soluções encontradas, permitindo melhorá-las e aproxima-las das soluções ótimas.

6. Referências Bibliográficas

AGARWAL, RICHA ; ERGUN, OZLEM (2006)- Ship Scheduling and Network Design for Cargo Routing in Liner Shipping. INFORMS. ISSN 0041-1655. Vol. 00.

AMBROSINO, D; SCIOMACHEN, A (1998)- A constraints satisfaction approach for master bay plans. Water studies series. ISSN 1462-6071

AMBROSINO, DANIELA; SCIOMACHEN, ANNA; TANFANI, ELENA (2004)- Stowing a containership: the master bay plan problem. Transportation Research Part A: Policy and Practice. ISSN 09658564. Vol. 38, n.º 2, p. 81-99.

ASLIDIS, T (1990)- Minimizing of overstowage in containership operations. p. 457-471.

AUTHORITIES, AMERICAN ASSOCIATION OF PORT (2006)- Americas Ports Today.

AVRIEL, MORDECAI; PENN, MICHAL; SHPIRER, NAOMI (1999)- Container ship stowage problem complexity and connection to the coloring of circle graphs. Discrete Applied Mathematics 103 - Elsevier. p. 271-279.

AVRIEL, MORDECAI [et al.] (1998)- Stowage planning for container ships to reduce the number of shifts. Annals of Operations Research. p. 55-71.

BIANCHI, LEONORA [et al.] (1998)- Metaheuristics for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands.

BOTTER, R C; BRINATI, M A (1991)- Stowage Container Planning: a Model For Getting An Optimal Solution. Transportation Research Board.

CHIN, A; KIT, H. ; LIM, A. (1999)- A new GA approach for the vehicle routing problem. Proceedings. 11th IEEE International Conference on. ISSN 1082-3409. p. 307 - 310.

CLARKE, G.; WRIGHT, J. W. (1963)- Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. Operations Research. Vol. 12, p. 568-581.

DANTZIG, G; FULKERSON, R; JOHNSON, S (1954)- Solution of a Large-Scale Traveling-Salesman Problem. Operations Research. p. 393-410.

DREWRY 2002- The Drewry Container Market Quarterly.

DUBROVSKY, OPHER; LEVITIN, GREGORY; PENN, MICHAL (1999)- A genetic algorithm with a compact solution encoding for the container ship stowage problem.

EILON, SAMUEL ; WATSON-GANDY, CARL; CHRISTOFIDES, NICOS 1971- Distribution management: mathematical modelling and practical analysis. Griffin, 1971.

EKSIOGLU, BURAK; VURAL, ARIF VOLKAN; REISMAN, ARNOLD (2009)- The vehicle routing problem: A taxonomic review. Computers & Industrial Engineering. ISSN 03608352. Vol. 57, n.º 4, p. 1472-1483.

GEHRING, HERMANN ; BORTFELDT, ANDREAS (2002)- A parallel genetic algorithm for solving the container loading problem. International Transactions In Operational Research. p. 497–511.

GLOVER, FRED (1977)- Heuristics For Integer Programming Using Surrogate Constraints. Decision Sciences. Vol. 8, n.º 1, p. 156-166.

GLOVER, FRED ; TAIUARD, ERIC ; WERRA, DOMINIQUE DE (1993)- A user's guide to tabu search. Annals of Operations Research.

<http://portosdeportugal.pt/sartigo/index.php?x=4713> -. Disponível em WWW:<URL:<http://portosdeportugal.pt/sartigo/index.php?x=4713>>.

http://www.anj.com.au/?page_id=1422 -. Disponível em WWW:<URL:http://www.anj.com.au/?page_id=1422>.

JANSTRUP, KIRA [et al.] (2010)- The Container Stowage Problem. ISSN 1600–6100.

LEVIN, AMOS (1971)- Scheduling and Fleet Routing Models for Transportation Systems. Transportation Science. Vol. 5, p. 232-255.

LIEBMAN, J. C. (1970)- Mathematical models for solid waste collection and disposal. Bulletin of the Operations Research Society of America.

LIU, YANBIN [et al.] (2010)- A decision support system using soft computing for modern international container transportation services. Applied Soft Computing. ISSN 15684946. Vol. 10, n.º 4, p. 1087-1095.

MARKS, DAVID H.; STRICKER, ROBERT (1971)- Routing for Public Service Vehicles. Journal of the Urban Planning and Development Division. Vol. 97, p. 165-178.

MARTELLO, SILVANO ; PISINGER, DAVID ; VIGO, DANIELE (2000)- The Three-Dimensional Bin Packing Problem. Journal Operations Research. Vol. 48, n.º 2, p. 256-267.

MARTIN JR, GIFFORD L. ; RANDHAWA, SABAH U. ; MCDOWELL, EDWARD D. (1988)- Computerized container-ship load planning: A methodology and evaluation. Computers & Industrial Engineering. Vol. 14, n.º 4, p. 429-440.

MARTINS, PAULO; LOBO, VICTOR J.A.S.; VAIRINHOS, VALTER (2009)- Container Stowage Problem Solution for Short Sea Shipping.

MOURA, ANA 2005-. Abordagens heurísticas para o planeamento de rotas e carregamento de veículos. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto,

MOURA, ANA; OLIVEIRA, JORGE (2012a)- Otimização de Rotas de Distribuição Marítima.

MOURA, ANA; OLIVEIRA, JORGE; PIMENTEL, CARINA (2012b)- A Mathematical Model for the Container Stowage and Ship Routing Problem. Journal of Mathematical Modelling and Algorithms. ISSN 1570-1166 1572-9214.

O'CONNOR, A. D; DE WALD, C. A. (1970)- A sequential deletion algorithm for the design of optimal transportation networks. 37th national meeting of the Operations Research Society of America.

RACTLIFFE, A T ; SEN, P (1994)- Computer Aided Stowage And Lashing Strategies For Containerships. Maritime Technical Information Facility. n.º Data and Information Technology; Marine Transportation.

RANA, KRISHAN ; VICKSON, R. G. (1991)- Routing Container Ships Using Lagrangean Relaxation and Decomposition. Transportation Science. p. 201-214.

ROI (2002)- Profit optimization for container carriers. The ROI Container Cargo Alliance.

SCIOMACHEN, ANNA; TANFANI, ELENA (2007)- A 3D-BPP approach for optimising stowage plans and terminal productivity. European Journal of Operational Research. ISSN 03772217. Vol. 183, n.º 3, p. 1433-1446.

SHIELDS, J J (1984)- Containership stowage: a computer-aided preplanning system. Marine Transportation. n.º Marine Transportation.

SIENIUTYCZ, STANISLAW ; JEZOWSKI, JACEK 2013- Energy Optimization in Process Systems and Fuel Cells (Second Edition) Elsevier Ltd.

SINGH, AJAY (2012)- An overview of the optimization modelling applications. Journal of Hydrology. ISSN 00221694. Vol. 466-467, p. 167-182.

SONG, DONG-WOOK; PANAYIDES, PHOTIS M. (2002)- A conceptual application of cooperative game theory to liner shipping strategic alliances. Maritime Policy & Management. ISSN 0308-8839 1464-5254. Vol. 29, n.º 3, p. 285-301.

TERNO, JOHANNES [et al.] (2000)- An efficient approach for the multi-pallet loading problem. European Journal of Operational Research. p. 372±381.

THOMAS, B.J (1989)- Management of port maintenance: A review of current problems and practices. H.M.S.O.

WILSON, I D; ROACH, P A (2000)- Container stowage planning: a methodology for generating computerized solutions. Journal of the Operational Research Society. ISSN 0160-5682. Vol. 51, p. 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 p. 137-145.

WILSON, I.D.; ROACH, P.A. (1999)- Principles of Combinatorial Optimization Applied to Container-Ship Stowage Planning. Journal of Heuristics. p. 403–418.

WILSON, N; SUSSMAN, J. (1971)- Implementation of computer algorithms for the dial-a-bus system. Operations Research Society of America.

WONG, EUGENE Y. C.; YEUNG, HENRY S. C.; LAU, HENRY Y. K. (2009)- Immunity-based hybrid evolutionary algorithm for multi-objective optimization in global container repositioning. Engineering Applications of Artificial Intelligence. ISSN 09521976. Vol. 22, n.º 6, p. 842-854.

XING, LING-NING [et al.] (2008)- A hybrid approach combining an improved genetic algorithm and optimization strategies for the asymmetric traveling salesman problem. Engineering Applications of Artificial Intelligence. ISSN 09521976. Vol. 21, n.º 8, p. 1370-1380.

