

Aplicação de Algoritmo Genético na disposição de cargas em camiões

Margarida Esteves

Dissertação de Mestrado

Orientador da FEUP: Prof. Paulo Osswald



Mestrado Integrado em Engenharia e Gestão Industrial

2019-06-28

À minha família.

Resumo

O projeto foi desenvolvido numa unidade fabril de uma multinacional produtora de embalagens de cartão e tinha como objetivo final diminuir o número de camiões expedidos para os clientes, aumentar as taxas de ocupação dos diferentes veículos e consequentemente reduzir os custos de transporte.

Classificou-se o problema em questão, de acordo com a literatura existente, como um problema de empacotamento em contentores. Esta categorização é fundamentada pelo número ilimitado de camiões disponíveis para o despacho de mercadorias e pela diversidade dimensional dos produtos fabricados pela empresa.

As restrições geométricas do problema dizem respeito aos volumes, ao suporte necessário ao encaixe de paletes, à sobreposição das mesmas e limitações dimensionais do veículo. Para este problema desprezou-se a distribuição de peso no camião visto que os artigos apresentam pesos bastante baixos. Além disso, destacou-se outras considerações como a ordem de entregas dos diferentes clientes e o facto de a mercadoria de um cliente ser agrupada toda junta dentro do contentor.

Verificou-se a existência de medidas impostas pela empresa para a otimização das taxas de ocupação dos veículos, como é o caso das regras de paletização implementadas pelo departamento técnico. No entanto, devido às exigências colocadas pelos clientes e à variedade dimensional das mercadorias, as medidas implementadas mostraram não ser suficientes para o bom aproveitamento da área dos camiões e resultante aumento do indicador de desempenho.

Desse modo, o projeto desenvolvido consistiu na implementação de uma ferramenta de alocação de cargas em camiões, tendo-se utilizado para o efeito o *software* Microsoft Excel e a linguagem de programação VBA. A ferramenta em causa utiliza a meta-heurística Algoritmo Genético para otimização dos resultados e permite ao utilizador identificar o número de veículos necessários ao transporte de mercadorias, visualizar a três dimensões o encaixe das cargas nos diferentes camiões, as suas taxas de ocupação, identificar antecipadamente as paletes que não serão entregues por falta de espaço ou que necessitam de ser incorporadas noutras rotas e providenciar a informação necessária aos funcionários da empresa subcontratada acerca do modo como deve ser feito o carregamento das mercadorias.

Após a implementação da ferramenta e análise de resultados, confirmou-se uma diminuição do número de camiões expedidos e resultante redução dos custos de transporte de aproximadamente 21,7%. Ainda assim, os resultados obtidos não devem ser vistos como valores de referência, dado que ainda foram realizados poucos testes e existem outros custos difíceis de contabilizar para além dos custos financeiros, como é o caso da insatisfação do cliente.

Bin Packing: A genetic algorithm approach

Abstract

The project described in this paper was developed in a multinational corrugated packaging company. The aim of the project was to decrease the number of vehicles dispatched to the customers, increase the occupancy rates of the vehicles and consequently decrease the transportation costs.

The problem, according to the literature, was classified as the Bin Packing Problem. This classification is supported by the unlimited number of trucks available to send the cargo and by the heterogeneity of the products produced by the company.

The restrictions of the problem are related to the volumes, the support needed for the pallet fitting, the overlapping of the cargo inside the truck and the dimensional limits of the vehicle. For this problem, the weight was not considered because the products have low weight. Furthermore, it was considered that the cargo of the same customer needs to be grouped together and in containers with cargo from different customers, we may give special attention to the order of delivery.

It was verified that the company was already using methodologies to optimize the occupancy rates of the vehicles such as the standard measures for the cargo. Despite the rules implemented, they were not enough to increase the vehicle occupancy rates values due to customer requirements.

In order to solve this problem, it was developed a tool to fit the cargo in vehicles using the Microsoft Excel software and the programming language VBA. The tool uses the Genetic Algorithm metaheuristic to optimize the solution and enables the user to identify the number of vehicles needed to send the products, to have a 3D perspective about how the cargo fits in each vehicle, their occupancy rates, to identify the load that will not be sent due to the lack of space and provide information about how the cargo should be placed in the vehicles to the subcontracted company.

After the implementation, it was confirmed that the number of vehicles was reduced and consequently the costs were also reduced. However, these results should not be accepted as real results once the number of tests performed was small and there are other costs difficult to measure, such as the service level. Furthermore, the tests were only performed for one of the customers which may bias the results.

Agradecimentos

A todos os funcionários da DS Smith - Guilhabreu que me receberam como um membro da empresa e sempre se prontificaram a ajudar-me, em particular Eng^a Paula Quevedo, Nelson Santos, Alfredo Almeida, Diogo Rodrigues e Ana Dias.

Ao Professor José Fernando Oliveira pela sua disponibilidade e conhecimentos transmitidos e ao Professor Paulo Osswald pelos conselhos e ajuda prestada na redação da dissertação.

Um especial agradecimento à minha família por ter proporcionado todas as condições para que o meu percurso até aqui fosse possível e pelo apoio incondicional.

À Ana Cláudia e ao Gonçalo pelo espírito de entreajuda e companheirismo ao longo deste projeto.

Aos meus amigos pela motivação e por terem tornado esta jornada incrível.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Apresentação do grupo DS Smith.....	1
1.2	Enquadramento e objetivos do projeto	2
1.3	Método seguido no projeto	2
1.4	Estrutura da dissertação	3
2	Enquadramento teórico e revisão bibliográfica.....	4
2.1	Problema de carregamento de contentores.....	4
2.1.1	Empacotamento em contentores.....	5
2.1.2	Empacotamento em vários contentores.....	5
2.2	Problema integrado de disposição de cargas no veículo e definição de rotas	5
2.3	Métodos de Otimização.....	6
2.3.1	Procura Local.....	6
2.3.2	Algoritmo Genético	6
2.3.3	Pesquisa Tabu.....	7
2.3.4	GRASP	8
2.3.5	Recozimento Simulado.....	9
3	Análise da logística externa da empresa	10
3.1	Produtos	10
3.2	Fluxo de trabalho da DS Smith	10
3.3	Departamento técnico	11
3.3.1	Paletização	11
3.4	Departamento Logístico	12
3.4.1	Planeamento de Transportes	13
3.5	Avaliação do desempenho logístico.....	14
4	Modelo de otimização de encaixe de cargas em camiões	17
4.1	Definição do modelo.....	17
4.1.1	Restrições do problema.....	17
4.1.2	Construção da solução.....	20
4.1.3	Desenvolvimento do Algoritmo Genético	21
4.2	Utilização da ferramenta	24
4.3	Implementação da ferramenta	25
4.4	Análise de resultados	26
5	Conclusões e perspetivas de trabalho futuro.....	29
	Referências	31
ANEXO A:	Códigos de disposição na palete.....	32
ANEXO B:	Tabela de alturas de paletização e quantidades máximas por pilha	33
ANEXO C:	Exemplo de mapa de carga.....	34
ANEXO D:	Teste à correlação em SPSS	35
ANEXO E:	Algoritmo 1- Pseudocódigo Algoritmo Genético.....	36
ANEXO F:	Algoritmo 2- Pseudocódigo da Função Aptidão	37
ANEXO G:	Manual de utilização da ferramenta	38

Siglas

APA – Armazém de Produto Acabado

LIFO – *Last In First Out*

KPI's – *Key Performance Indicators*

SAP – *Systems, Applications and Products*

VBA – *Visual Basic for Applications*

Índice de Figuras

Figura 1 - Diagrama de Gantt do projeto	2
Figura 2 - Tipologia de problemas (Adaptado de Wäscher <i>et al</i> 2007))	5
Figura 3 - Pseudo código Procura Local (Adaptado de Lourenço <i>et al</i> 2010).....	6
Figura 4 - Pseudo código Algoritmo Genético (Adaptado de Beasley e Chu 1994).....	7
Figura 5 - Pseudo código Pesquisa Tabu (Adaptado de Almada Lobo 2019b).....	8
Figura 6 - Pseudo código GRASP (Adaptado de Resende e Ribeiro 2002)	9
Figura 7 - Pseudo código de Recozimento Simulado (Adaptado de Almada Lobo 2019b)	9
Figura 8 - Fluxo de material na DS Smith - Guilhabreu	11
Figura 9 - a) Exemplo de palete completa e incompleta b) Exemplo paletização de prancha.....	12
Figura 10 - Taxas de ocupação diárias em 2018.....	15
Figura 11 - Taxas de entregas diárias em 2018	15
Figura 12 - Análise de Pareto às taxas de entrega em 2018.....	16
Figura 13 - Tipos de rotação das cargas	18
Figura 14 - Exemplificação de vértice inicial e final	19
Figura 15 - Ordem de construção em parede	21
Figura 16 - Exemplo de código genético.....	22
Figura 17 - Pseudo código do método da roleta	23
Figura 18 - Exemplo de <i>order crossover</i>	23
Figura 19 - Exemplo <i>crossover</i> com mais do que um ponto de entrega	24
Figura 20 - Exemplo de visualização 3D de uma solução	25
Figura 21 - Visualização 3D solução do transporte de 4 junho	27
Figura 22 - Número de pilhas e disposição na palete.....	32
Figura 23 - Regras de alturas e quantidades por pilha consoante o tipo de cartão	33
Figura 24 - Exemplo de mapa de cargas enviado à empresa subcontratada	34
Figura 25 - Teste à significância da correlação entre a taxa de ocupação e o número de produtos diferentes no camião	35
Figura 26 - Pseudocódigo do Algoritmo Genético aplicado na ferramenta	36
Figura 27 – Pseudocódigo da função aptidão.....	37

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Variáveis do problema	18
Tabela 2 - Parâmetros do Algoritmo Genético	22
Tabela 3 - Quadro resumo dos resultados do cliente Y.....	28

1 Introdução

O presente documento foi escrito no âmbito do projeto desenvolvido na empresa DS Smith, na unidade de Guilhabreu.

Nesta secção pretende dar-se a conhecer a empresa, o enquadramento do projeto e o objetivo do mesmo. Para além disso, é apresentado o método seguido no trabalho desenvolvido assim como a estrutura da dissertação.

1.1 Apresentação do grupo DS Smith

A DS Smith foi fundada nos anos 40, em Londres, por David G. e David S. Smith. O propósito do negócio era a produção de caixas de papel, no entanto, nos anos 80 a empresa iniciou a diversificação do negócio com a compra de duas empresas produtoras de embalagens de plástico. Em 1991, a empresa alargou o negócio ao nível europeu com a compra de uma empresa no nordeste francês.

Desde então, a expansão tem continuado e entre 2015 e 2017 adquiriu empresas em países como Grécia, Espanha, Portugal, Turquia, Reino Unido e Estados Unidos da América, contando atualmente com unidades fabris em 37 países e mais de 28 500 trabalhadores.

A firma pode ser decomposta em quatro áreas: Papel, Reciclagem, *Packaging* e Plásticos. As unidades de Papel e Reciclagem são consideradas os motores de abastecimento, uma vez que ambas produzem papel para posterior venda, entre outros clientes, à divisão de *Packaging*. As fábricas de *Packaging* e de Plásticos são responsáveis pela produção de embalagens de cartão e plástico, respetivamente.¹

A DS Smith – Guilhabreu está inserida na divisão de *Packaging* e é por isso uma produtora de embalagens de cartão. Assim, nesta unidade utiliza-se o papel como matéria prima para a produção de cartão canelado e consecutiva transformação em embalagens.

No que diz respeito à sustentabilidade, a DS Smith segue a filosofia *the power of less*, que significa fazer mais por menos. Com isto, a empresa pretende criar maior impacto perante os clientes, reduzindo cada vez mais os resíduos provenientes desde a conceção do produto até à expedição. Para além disso, a DS Smith é defensora da reciclagem e, portanto, grande parte do desperdício da sua produção é reaproveitado.

Relativamente à relação com os funcionários, a DS Smith tem como prioridade o seu bem-estar e segurança, promovendo a melhoria continua nesse campo. O seu objetivo é atingir zero acidentes e garantir que todos os trabalhadores cumprem a Política de Saúde e Segurança do Grupo.²

¹ Informação retirada do livro de boas vindas da empresa DS Smith.

² Informação retirada do Código de Conduta da empresa DS Smith.

1.2 Enquadramento e objetivos do projeto

Devido às baixas margens de lucro deste mercado, torna-se necessário reduzir ao máximo todos os custos da empresa com o objetivo de aumentar a sua competitividade. Sendo um dos maiores custos da DS Smith - Guilhabreu relativo ao transporte de produto acabado, considerou-se fundamental fazer uma análise a este setor.

Atualmente, o planeamento de transportes é realizado por um funcionário da DS Smith, responsável por definir diariamente o número de camiões necessários à realização de entregas de encomendas do dia seguinte, assim como delinear as rotas e mercadorias associadas a cada camião. Finalizado o planeamento, a DS Smith recorre a uma empresa logística subcontratada para efetuar o carregamento dos camiões e o transporte das mercadorias.

Verificou-se que a taxa de ocupação dos diferentes camiões se encontra bastante abaixo daquilo que a empresa considera ideal. Os resultados deste indicador podem ser explicados pelo método atualmente utilizado pela empresa, em que para a requisição de veículos se considera apenas os volumes totais das encomendas e se atribui uma elevada margem de segurança. Aliado a estes fatores, está o facto de o carregamento das mercadorias ser feito de forma empírica por um funcionário da empresa subcontratada, o que reforça a não utilização de uma solução otimizada.

Assim, a empresa ambiciona encontrar soluções para as baixas taxas de ocupação dos camiões expedidos, em particular, desenvolver uma ferramenta de apoio à gestão de distribuição de cargas no camião, onde seja evidente o modo como a carga deve ser disposta no camião. O objetivo é otimizar a capacidade de utilização dos veículos e consequentemente reduzir o número de viaturas necessárias à entrega de mercadorias e o custo associado aos transportes.

1.3 Método seguido no projeto

O projeto em causa consistiu em quatro fases distintas como ilustra a Figura 1. As primeiras semanas consistiram na adaptação à empresa, onde foi possível acompanhar todos os departamentos da mesma e estudar o fluxo de trabalho da unidade de Guilhabreu.

Durante duas semanas foram analisados os dados relativos aos KPI's com o propósito de identificar as causas, definir os objetivos e a solução do problema. Nesta fase, identificaram-se os volumes, o suporte necessário ao encaixe de paletes, a sobreposição das mesmas e as limitações dimensionais do veículo como restrições geométricas do problema. Para além disso, destacaram-se outras considerações como a ordem de entregas dos diferentes clientes e o facto de a mercadoria de um cliente ser agrupada toda junta dentro do contentor.

Depois de identificado o problema iniciou-se o desenvolvimento da ferramenta de distribuição de cargas nos camiões. Ao longo desta fase foram realizados vários testes em conjunto com o planeador de transportes e feitas as correções necessárias. Por fim, durante as últimas semanas, implementou-se a ferramenta em questão e analisaram-se os resultados obtidos.

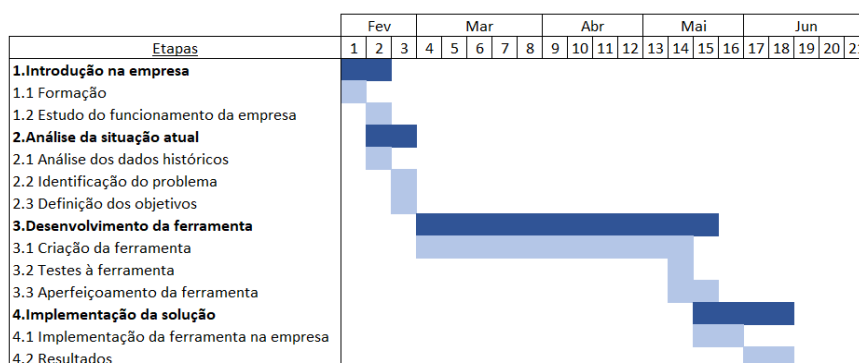


Figura 1 - Diagrama de Gantt do projeto

1.4 Estrutura da dissertação

O presente relatório encontra-se dividido em cinco capítulos. No capítulo introdutório apresenta-se a empresa, refere-se brevemente em que consiste o projeto e exhibe-se a calendarização seguida ao longo do mesmo.

No segundo capítulo é feito o enquadramento teórico do problema de empacotamento em contentores e são descritas as meta-heurísticas mais utilizadas para resolver este problema. Das meta-heurísticas existentes destacam-se a Procura Local, Algoritmo Genético, Pesquisa Tabu, GRASP e Recozimento Simulado.

No terceiro capítulo é analisada a situação encontrada da empresa. Ao longo do capítulo são abordados tópicos subjacentes à expedição de mercadorias como as regras de paletização existentes, a metodologia utilizada no planeamento de transportes e o desempenho logístico da unidade de Guilhabreu.

No quarto capítulo são apresentadas as medidas implementadas para a melhoria do problema. No decorrer do capítulo é formulado o modelo e descrita a meta-heurística utilizada para a otimização do mesmo – algoritmo genético. Posto isto, são divulgados os resultados obtidos com a implementação da ferramenta em questão.

Finalmente, são apresentadas as conclusões finais do projeto assim como as perspetivas de trabalho futuro.

2 Enquadramento teórico e revisão bibliográfica

Neste capítulo é apresentado o enquadramento teórico relativo ao tema em que se insere o trabalho proposto, em concreto, otimização da distribuição de cargas em camiões. Para além disso, ao longo do capítulo são apresentadas as diferentes abordagens relacionadas com o problema de empacotamento e as meta-heurísticas mais utilizadas para a otimização do mesmo.

2.1 Problema de carregamento de contentores

A forma como as paletes são encaixadas dentro de um camião é um fenómeno preponderante na minimização de custos de transporte, uma vez que a distribuição escolhida influencia o número de camiões necessários na entrega de mercadorias. Atendendo à importância e complexidade do processo, foram feitos vários estudos relacionados com a otimização de carregamento dos veículos.

Este problema é conhecido no mundo científico como um problema de carregamento de contentores, consistindo em alocar um conjunto de caixas retangulares dentro de um contentor retangular de dimensões fixas, de forma que o volume de caixas seja maximizado (Pisinger 2002). Os problemas de carregamento de cargas em contentores apresentam restrições relacionadas com a orientação, densidade e estabilidade da mercadoria.

Dependendo do tipo de produto a ser transportado, podem existir outras restrições para além das restrições geométricas. Dadas as variantes do problema principal, é possível encontrar diferentes estudos e métodos de resolução tendo em conta as restrições e função objetivo do problema em causa (Pisinger 2002).

Com o objetivo de identificar os diferentes problemas e após reformulações às tipologias criadas por Dyckhoff (1990), Wäscher *et al* (2007) definiram as tipologias como demonstrado na Figura 2. Segundo o seu estudo, os problemas básicos de corte e empacotamento são combinação de dois critérios: o tipo de tarefa e a variedade de produtos.

O tipo de tarefa é identificado como maximização de saídas se existir um número restrito de veículos disponíveis e, portanto, não existir espaço suficiente para alocar todos os objetos. Neste caso são atribuídos valores aos itens e é escolhido o conjunto que maximiza o valor total expedido e respeita as restrições do problema. Note-se que os valores atribuídos aos itens podem apresentar significados diferentes como o lucro de cada objeto ou a prioridade de entrega. Por outro lado, quando não existe limite de veículos para enviar as mercadorias, a preocupação deve ser minimizar o número de camiões expedidos ou o seu custo.

Em relação à variedade de produtos, esta é classificada em função do número de itens diferentes existentes no conjunto a encaixar.

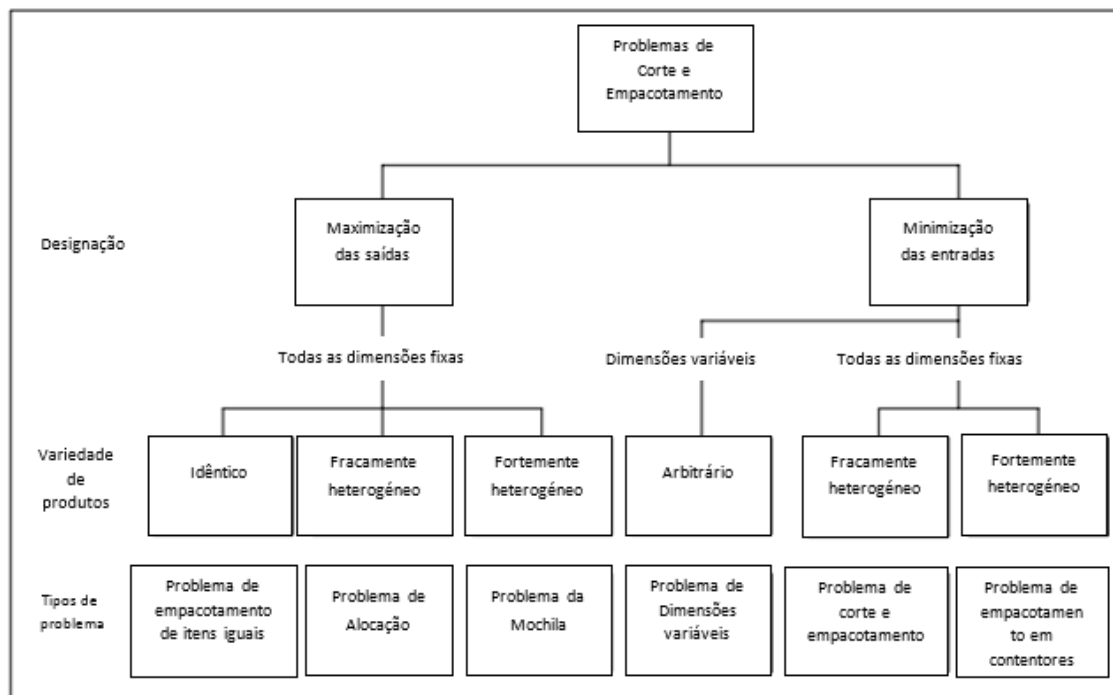


Figura 2 - Tipologia de problemas (Adaptado de Wäscher *et al* 2007))

Em seguida apresentam-se duas das abordagens ao problema de empacotamento descritas por Pisinger (2002).

2.1.1 Empacotamento em contentores

Neste tipo de problema, os contentores têm dimensões fixas e a finalidade é encontrar uma solução que utilize o menor número de contentores possível sabendo que todas as caixas de dimensões variadas devem ser carregadas nos veículos (Pisinger 2002). De acordo com a tipologia definida por Wäscher *et al*, este é um problema de minimização de entradas, uma vez que todos os produtos devem ser inseridos nos contentores. Relativamente à variedade dos produtos, Wäscher *et al* consideram que, neste género de problemas podem existir dimensões e formas bastante diferentes.

2.1.2 Empacotamento em vários contentores

O empacotamento em vários contentores é uma variante bastante semelhante ao empacotamento descrito na secção 2.1.1, no entanto, os contentores apresentam dimensões e custos variados, o que significa que o seu propósito deixa de ser a minimização do número de contentores e o objetivo é minimizar o custo de transporte (Pisinger 2002).

2.2 Problema integrado de disposição de cargas no veículo e definição de rotas

Num problema real de distribuição de mercadorias, o problema de rotas de veículos e de carregamento em contentores estão inerentemente relacionados um com o outro (Moura e Oliveira 2004). A integração dos dois problemas designa-se por problemas multiobjectivo dado que apresentam mais do que uma função objetivo e cada uma das funções possui pesos diferentes para a obtenção da solução final (Ceschia e Schaerf 2013).

Os problemas de definição de rotas apresentam restrições diferentes daquelas que foram apresentadas para o problema de carregamento em contentores. Entre as restrições, destacam-se as janelas temporais de cada cliente, a necessidade de as encomendas do mesmo cliente serem enviadas na sua totalidade e o facto de a mercadoria de um cliente ser agrupada dentro

do contentor, de forma a evitar perdas de tempo no momento da descarga (Moura e Oliveira 2004).

Ao longo dos anos foram utilizadas várias metodologias para resolver este problema. Das metodologias usadas salientam-se as meta-heurísticas Pesquisa Tabu, Recozimento Simulado e GRASP.

2.3 Métodos de Otimização

Muitos problemas de otimização são demasiado complexos para se recorrer a algoritmos exatos. Nesses casos são utilizadas heurísticas que visam encontrar boas soluções (Festa e Resende 2009). As heurísticas não encontram soluções ótimas, ou pelo menos não garantem que as soluções encontradas sejam as melhores. Ainda assim, são fáceis de implementar, flexíveis, simples e possuem menor tempo de execução (Almada Lobo 2019a).

Os problemas de disposição de cargas e definição de rotas recorrem frequentemente à utilização de meta-heurísticas como Procura Local, Algoritmo Genético, Pesquisa Tabu, GRASP e Recozimento Simulado. Nas secções que se seguem são descritos pormenorizadamente os métodos de otimização.

2.3.1 Procura Local

A procura local foca-se na busca de soluções ótimas em subespaços. Nesta heurística, o processo inicia com a construção de uma solução de partida válida, designada por heurística construtiva. Após a construção da solução inicial é aplicada uma heurística de melhoria que visa aperfeiçoar a solução inicial através da perturbação do subespaço e busca de novos ótimos. A perturbação do subespaço tem como objetivo evitar que a solução fique presa em ótimos locais e expandir a procura a outras vizinhanças.

O processo de procura de soluções repete-se para cada subespaço e após cada iteração é comparado o ótimo local com o ótimo global. Sempre que se compara os dois valores assume-se como ótimo global o melhor resultado entre as duas variáveis (Figura 3).

A eficiência desta meta-heurística depende essencialmente da escolha do subespaço onde é feita a procura, da perturbação e do critério de aceitação (Lourenço *et al* 2010).

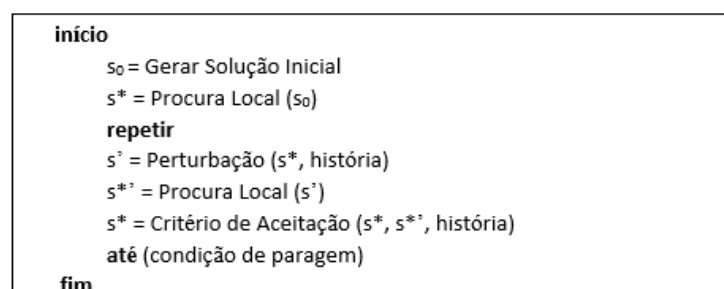


Figura 3 - Pseudo código Procura Local (Adaptado de Lourenço *et al* 2010)

2.3.2 Algoritmo Genético

O algoritmo genético fundamenta-se na teoria da evolução de espécies proposta por Darwin. A teoria de Darwin assume que os indivíduos que melhor se adaptam ao ambiente em que estão inseridos tem maior probabilidade de sobreviver, originando um maior número de descendentes. Assim, os genes dos indivíduos que melhor se adaptam serão transmitidos ao

longo das gerações e como consequência, as espécies estarão cada vez mais adaptadas ao ambiente em que se inserem (Beasley e Chu 1994).

Este algoritmo simula essa situação, aplicando operações genéticas a uma população inicial de indivíduos, tal como explicado na Figura 4. Depois de criada a população inicial, é calculado para cada indivíduo o seu valor da função aptidão, ou seja, é feita a avaliação da solução codificada por cada indivíduo.

De seguida são selecionados da população, um conjunto de indivíduos, de acordo com um determinado método de seleção, cujo objetivo é cruzarem entre si e criarem novos indivíduos com informações genéticas dos pais que lhe deram origem. Depois da sua criação, os indivíduos filhos podem sofrer mutações, isto significa que determinados genes podem sofrer modificações, sendo o objetivo desta operação diversificar a busca.

A descendência pode substituir a população na sua totalidade ou apenas os indivíduos menos aptos, ou seja, com um pior valor da função aptidão. O processo é repetido para as novas populações até ser atingido o número de gerações estipulado ou um limite de tempo de processamento (Beasley e Chu 1994).

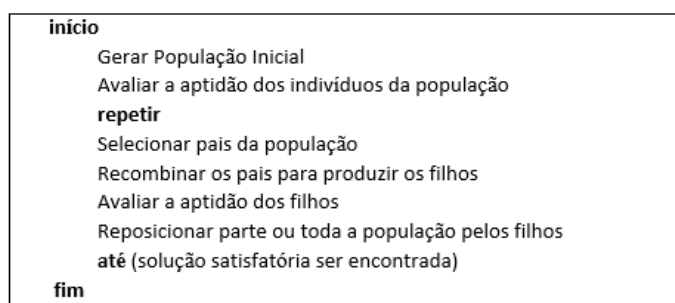


Figura 4 - Pseudo código Algoritmo Genético (Adaptado de Beasley e Chu 1994)

2.3.3 Pesquisa Tabu

De uma forma genérica, a procura tabu assemelha-se à procura local. No entanto, a pesquisa tabu, tal como o nome indica, é uma meta-heurística que armazena determinadas soluções e evita que estas sejam utilizadas na decisão de escolha da próxima solução. Este procedimento obriga a que sejam exploradas outras vizinhanças e impede que a solução fique presa em ótimos locais (Glover 1990).

Para além disso, a utilização de memória para bloquear determinados movimentos evita o aparecimento de soluções repetidas. No entanto, o bloqueio de determinados movimentos pode impedir o aparecimento de soluções melhores do que as atuais, pelo que, por vezes é necessário o relaxamento de algumas restrições – critérios de aspiração. Os critérios de aspiração admitem que soluções bloqueadas pelas restrições tabu sejam admitidas como soluções ótimas (Figura 5).

```

início
  tentativas <- 0
  repetir
    gerar uma solução inicial  $v_c$ 
    contar <- 0
    repetir
      gerar a vizinhança de  $v_c$ 
      para todas as soluções  $v_n$  na vizinhança de  $v_c$ 
        se  $v_n$  é o melhor local até então (para um determinado  $n^\circ$  de tentativas) então
          se modificação ( $v_c, v_n$ ) não é tabu ou (modificação ( $v_c, v_n$ ) é tabu e  $v_n$  satisfaz o critério de aspiração) então
            atualizar a informação da melhor solução local
       $v_c$  <- "melhor" solução local
      atualizar lista tabu e outras variáveis
      se  $v_c$  é o melhor global até então (para todas as tentativas) então
        atualizar a informação da melhor solução global
      contar <- contar +1
    até contar = ITER
  Tentativas <- tentativas+1
  até tentativas = Max tentativas
fim

```

Figura 5 - Pseudo código Pesquisa Tabu (Adaptado de Almada Lobo 2019b)

2.3.4 GRASP

GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*) é uma meta-heurística utilizada na resolução de problemas combinatórios. Em cada iteração é construída uma solução fiável e procurado um mínimo local. O melhor ótimo local de todas as iterações é apresentado como ótimo global, ou seja, a solução final do problema, como é explicado na Figura 6 (Resende e Ribeiro 2002).

Durante a fase de construção e para cada iteração, é criada uma função gulosa. Esta função tem como objetivo calcular o custo incremental da incorporação de cada elemento na solução parcialmente construída. A partir da função gulosa são selecionados os elementos que possuem menores custos para a função objetivo, dando origem à lista restrita de candidatos. Da lista é selecionado, de forma aleatória, o elemento a ser adicionado à solução parcialmente construída (Resende e Ribeiro 2002).

A lista de candidatos pode ser limitada através do número máximo de valores a introduzir na lista ou da sua qualidade. No que diz respeito à seleção através da qualidade da lista, é necessário definir um parâmetro, α , entre zero e um. Adiciona-se à lista os candidatos cuja qualidade é superior ao limite calculado, isto é, $c \in [c^{\min}, c^{\min} + \alpha(c^{\max} - c^{\min})]$, em que $c^{\min}$ e $c^{\max}$ são, respetivamente, o menor e o maior custo incremental da função gulosa.

Esta meta-heurística é considerada apelativa pelo facto de ser de fácil implementação. Alguns parâmetros tais como o critério de paragem e a qualidade dos elementos da lista restrita de candidatos têm de ser definidos e ajustados. O critério de paragem é definido pelo número máximo de iterações e, embora a probabilidade de encontrar uma solução melhor do que a atual diminua com o número de iterações, a qualidade da melhor solução só é superior com o aumento do número de iterações. Uma vez que o tempo de computação aumenta linearmente com o número de iterações, quanto maior o número de iterações, maior o tempo de computação e melhor a solução encontrada (Festa e Resesende 2009).

```

início
  para k=1 até N° de iterações
    enquanto solução não é uma solução completa
      construção da lista restrita de candidatos
      seleção aleatória de um elemento s da lista de candidatos
      solução <- solução U {s}
      reavaliar os custos incrementais
      solução <- Procura Local (solução)
      atualizar solução (solução, melhor solução)
  fim

```

Figura 6 - Pseudo código GRASP (Adaptado de Resende e Ribeiro 2002)

2.3.5 Recozimento Simulado

O recozimento simulado é uma meta-heurística que se baseia em princípios termodinâmicos. Este algoritmo simula as variações de energia num processo de arrefecimento até se atingir a situação de equilíbrio (Talbi 2009).

A partir de uma solução inicial e para uma determinada temperatura, são feitas várias iterações onde são gerados vizinhos aleatórios. Todos os movimentos que melhorem a função objetivo são aceites de forma imediata, os restantes são aceites com uma probabilidade associada que depende da temperatura e variação de degradação da função objetivo. Assim que a condição de paragem é alcançada, diminui-se a temperatura e repete-se o processo.

À semelhança do arrefecimento de uma estrutura cristalina, podem ser encontradas irregularidades se o arrefecimento for demasiado rápido. Dessa forma, a determinação da temperatura para cada passo tem um elevado impacto no sucesso do algoritmo de otimização (Talbi 2009). Um dos métodos utilizados para determinar a diminuição da temperatura é a relação geométrica, em que a temperatura da última iteração é multiplicado um alfa constante (Almada Lobo 2019b).

Quanto à condição de paragem, a mesma pode ser definida tendo em consideração um dos seguintes critérios: uma temperatura final que deve ser baixa; um número pré-definido de iterações; ou número de iterações sem que v_c seja alterado (Figura 7).

O recozimento simulado é conhecido como uma meta-heurística simples e de fácil implementação (Talbi 2009).

```

início
  t <- 0
  iniciar T
  selecionar um ponto atual  $v_c$  aleatoriamente
  avaliar  $v_c$ 
  repetir
    repetir
      selecionar um novo ponto  $v_n$  na vizinhança de  $v_c$ 
      se avaliação ( $v_c$ ) < avaliação ( $v_n$ ) então
         $v_c \leftarrow v_n$ 
      senão se aleatório [0,1] <  $e^{-\frac{aval(v_c)-aval(v_n)}{T}}$  então
         $v_c \leftarrow v_n$ 
    até (condição de paragem)
  T <- g (T, t)
  t <- t+1
  até (condição de paragem)
fim

```

Figura 7 - Pseudo código de Recozimento Simulado (Adaptado de Almada Lobo 2019b)

3 Análise da logística externa da empresa

Uma avaliação cuidada da situação da empresa facilita a identificação dos problemas. Neste capítulo assinala-se o funcionamento da empresa, tal como encontrado no início do projeto, com particular foco no Departamento Logístico, onde se insere o projeto em questão. Para além disso é feita uma avaliação do desempenho logístico da DS Smith - unidade de Guilhabreu.

3.1 Produtos

Na unidade de Guilhabreu, os produtos vendidos pela empresa podem ser divididos em dois grandes grupos: pranchas e embalagens de cartão.

As pranchas são placas de cartão que servem de base à produção de embalagens. Habitualmente são vendidas a empresas de cartonagem de menor volume, apresentando dimensões variadas de acordo com as necessidades de cada cliente.

Relativamente às embalagens, estas são obtidas posteriormente à transformação de cartão e vendidas sob a forma de produto final.

Ambos os produtos possuem peso bastante baixo, variando apenas com o tipo de cartão utilizado na produção de cada artigo.

3.2 Fluxo de trabalho da DS Smith

O fluxo de trabalho apresenta o movimento de informação e de material ao longo do processo de produção da empresa. Esta análise é geralmente utilizada uma vez que permite compreender melhor a sequência das atividades desempenhadas pela empresa.

A criação de um produto na unidade fabril de Guilhabreu inicia quando o cliente solicita uma encomenda com determinadas especificações ao departamento comercial. Este departamento envia o pedido ao gabinete técnico onde é verificada a exequibilidade do produto, são feitos ajustes entre a empresa e o cliente, é definido um preço e gerada a referência associada ao artigo. Se o cliente fizer uma encomenda de uma referência já existente, o processo passa diretamente para o sistema informático, não sendo necessária a colaboração do gabinete técnico.

Após a caracterização do produto, o pedido é introduzido no sistema informático da DS Smith e é calendarizada a sua produção. Uma vez que a empresa utiliza maioritariamente o modelo de produção *make-to-order*, o planeamento é feito com base na sequência de produção de cada encomenda, na capacidade das máquinas e na sua data de entrega, possibilitando uma melhor organização da produção. Terminada a calendarização, os planos são enviados para a produção de forma que os operadores saibam quando e em que máquinas devem ser fabricadas as encomendas.

O processo produtivo da DS Smith pode ser dividido em duas fases: produção e transformação de cartão. Na primeira fase do processo produtivo utilizam-se bobines de papel

como matéria prima para o fabrico de cartão. As bobines, que alimentam a máquina, sofrem processos de corte e colagem até se obter as pranchas de cartão. Estas podem ter destinos diferentes: ser transformadas em embalagens ou comercializadas.

Tratando-se de uma encomenda de embalagens, o cartão deve seguir para a fase de transformação – corte, colagem e impressão. Dependendo do tipo de embalagem e da qualidade de impressão exigida, as pranchas são transformadas em diferentes máquinas.

Finalizado este processo, algumas embalagens sofrem acabamentos tais comoagrafamento ou colagem. Estas operações são realizadas por empresas subcontratadas que podem ou não encontrar-se nas instalações da DS Smith.

Sempre que se identificam produtos defeituosos ou há desperdício de cartão, as peças são enviadas para o destrojador de papel que cria fardos para posterior venda.

Por fim, as embalagens conformes são paletizadas e enviadas para o armazém de produto acabado (APA), onde aguardam temporariamente até ao momento em que são expedidas pela empresa logística subcontratada.

A Figura 8 apresenta o fluxo de material descrito neste capítulo.

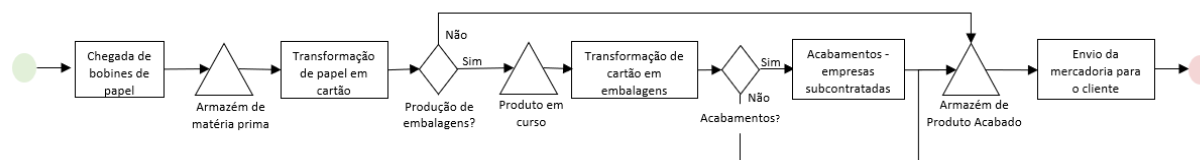


Figura 8 - Fluxo de material na DS Smith - Guilhabreu

3.3 Departamento técnico

O departamento técnico da DS Smith – Guilhabreu é responsável pela criação de novos produtos. Além disso, este gabinete está encarregue de gerir o modo como a movimentação de cargas é efetuada.

Atualmente, a fábrica utiliza paletes de madeira para movimentar as cargas internamente, para as armazenar e para as enviar para os clientes. Durante estes procedimentos, a unidade recorre maioritariamente a paletes de dimensão 1200x800 e 1200x1000.

O subcapítulo 3.3.1 enuncia o modo como o gabinete técnico faz a escolha da paletização e as restrições subadjacentes.

3.3.1 Paletização

A paletização na DS Smith é feita de acordo com as regras implementadas pela empresa. As regras definidas pretendem padronizar as alturas de paletização e a quantidade de produtos por palete para cada tipo de cartão. Com esse fim, foram criadas pelo gabinete técnico duas tabelas a ser seguidas no momento de paletização: uma que dá indicação do número de pilhas por palete e a sua disposição (Anexo A); e outra que faz referência às alturas de paletização e quantidades máximas por pilha para cada tipo de cartão (Anexo B).

Os tipos de paletes utilizados têm como objetivo a maximização da área ocupada pelas cargas. Uma vez que os camiões utilizados durante o transporte possuem 2,45 metros de largura, dispor dois paletes lado a lado permite a utilização ideal de 2,4 metros de largura do veículo.

As normas foram impostas de modo que cada palete tenha aproximadamente 1,30 metros de altura. Como os camiões têm 2,65 metros de altura, torna-se possível a sobreposição de cargas, maximizando dessa forma o aproveitamento da altura do veículo.

Ainda que esta metodologia permita otimizar o espaço utilizado no camião, existem situações em que este procedimento não se verifica. Alguns clientes fazem exigências relativamente à altura de paletização ou quantidade de produtos por palete. Estas situações podem originar a existência de paletes com mais de 1,50 metros, o que impossibilita a sobreposição de uma paleta padronizada e conduz ao desperdício de espaço.

Para além disso, devido às taxas de defeito das máquinas, são lançadas em fabrico quantidades superiores às encomendadas, o que significa que, em certos casos existe excesso de produção de artigos. Nestas situações, caso os clientes aceitem, são expedidas paletes que possuem uma quantidade de artigos inferior ao pré-definido e altura de paletização inferior a 1,30 metros, como se verifica na Figura 9 a). Estes tipos de paletes designam-se por paletes incompletas.

Aliado a estes problemas, determinados produtos, nomeadamente as pranchas, possuem dimensões elevadas dificultando o carregamento de outras mercadorias ao seu lado e restringindo assim a otimização de espaço do camião (Figura 9b). Dadas as elevadas dimensões das pranchas, há situações em que é necessário utilizar mais do que uma paleta para fazer o transporte do produto. Esta variável designa-se por número de paletes da base.



Figura 9 - a) Exemplo de paleta completa e incompleta b) Exemplo paletização de prancha

No sistema informático SAP são registadas as dimensões das paletes utilizadas, o número de paletes da base e as dimensões de paletização - comprimento, largura e altura. Por dimensões de paletização entende-se as maiores dimensões entre o produto e a paleta, isto é, numa situação em que o comprimento da placa ou embalagem excede o comprimento da paleta, considera-se como comprimento de paletização a dimensão do produto. O mesmo se verifica relativamente à largura.

Tanto as pranchas como as embalagens são enviadas na horizontal tendo em vista a preservação da qualidade dos produtos, ou seja, de forma a evitar o empeno do cartão.

3.4 Departamento Logístico

O departamento logístico deve ser capaz de gerir o fluxo de materiais e encomendas. Desse modo, o departamento logístico da empresa é responsável pela aquisição de matéria-prima, planeamento de produção, gestão de *stocks* e planificação de transportes.

Uma vez que o projeto se insere na área das expedições, o subcapítulo que se segue explicita a forma como decorre o processo de planeamento de transportes.

3.4.1 Planeamento de Transportes

Atendendo ao volume de encomendas que a DS Smith apresenta, atualmente são expedidos para os clientes em média dois camiões por hora. Por esse motivo, e sabendo que a empresa utiliza maioritariamente o modelo de produção *make-to-order*, o planeamento de transportes é feito diariamente.

Um funcionário da empresa elabora de modo empírico o mapa de cargas (Anexo C) com base nas informações fornecidas pelo sistema informático SAP. O sistema fornece informação acerca das encomendas cuja entrega deverá ser feita no dia seguinte, assim como o volume das mesmas, o local de entrega e caso existam, as janelas temporais dos clientes. Relativamente ao mapa de cargas, este contempla o tipo de viatura a usar para cada entrega, a sua rota e a hora de carregamento, definida tendo em atenção as janelas temporais de descarga do cliente. O mapa é construído considerando os volumes totais de encomenda de cada cliente. Em algumas situações é permitido que as cargas do mesmo cliente sejam enviadas separadamente.

Atualmente encontram-se à disposição da DS Smith dois veículos avançados de pequena dimensão (50 m^3), cujo custo mensal é fixo, com quilometragem mensal limitada. Para além destas duas viaturas, a DS Smith pode requisitar à empresa logística subcontratada veículos de pequena ou grande dimensão com aproximadamente 50 m^3 e 85 m^3 de volume, respetivamente. Assim sendo, o funcionário agrupa as cargas em volumes de 30 a 40 m^3 ou 50 a 60 m^3 consoante o tipo de veículo que pretende utilizar. Esta metodologia implica que as taxas de ocupação, calculadas de acordo com (3.1), se situem entre 60% e 80% para os veículos de pequena dimensão e 62,5% e 75% para os camiões de grande dimensão.

O custo de transporte dos veículos requisitados é calculado considerando a localização dos clientes e o número de descargas para um dado percurso. Se a rota apresentar mais do que um ponto de descarga, o custo é calculado para a maior distância, acrescido do valor associado ao número de descargas. O custo definido para uma dada distância é influenciado pela dimensão do camião a utilizar. É de salientar que os custos explicitados não se aplicam aos veículos avançados, apresentando estes um custo mensal fixo.

Sempre que um cliente não possui carga suficiente para completar um camião, o funcionário tem o cuidado de adicionar a carga de outros clientes localizados na zona ou enquadrados no percurso. Assim, as rotas são definidas com base na proximidade dos locais de entrega bem como nos volumes das respetivas encomendas. Para além disso, o planeador utiliza como critério para a ordem de entrega das encomendas, caso existam, as janelas temporais de cada cliente ou as distâncias dos locais de entrega em relação à unidade fabril da DS Smith – Guilhabreu.

Assim que todas as encomendas a entregar no dia seguinte estão referenciadas no mapa de cargas, este é enviado à empresa logística subcontratada que assegura o envio das mercadorias.

No momento do carregamento do camião, o condutor do empilhador conhece apenas a localização em armazém das mercadorias dos diferentes clientes, pelo que, no caso em que o camião transporta mercadoria de mais do que um cliente, é a empresa subcontratada que informa o seu funcionário qual a ordem de carregamento das mercadorias, tendo em consideração a ordem de entrega previamente programada pela DS Smith e a estratégia *Last In First Out*. Relativamente à disposição e orientação das paletes no veículo, uma vez que não existem restrições por parte dos clientes, é o condutor do empilhador que de forma empírica

decide o seu arranjo, atendendo apenas ao facto de mercadorias de clientes diferentes não se poderem misturar.

3.5 Avaliação do desempenho logístico

Os KPI's (*key performance indicators*) são medidas que quantificam os resultados alcançados pela empresa e estimulam a melhoria contínua.

A DS Smith estabelece metas e utiliza os KPI's para medir o sucesso ou insucesso de uma determinada tarefa. Nas expedições, os indicadores são calculados diariamente e dizem respeito à taxa de ocupação dos veículos (3.1) e taxa de entrega das encomendas (3.2).

$$\text{Taxa de ocupação camião}_i = \frac{\text{Volume ocupado camião}_i}{\text{Volume útil camião}_i} \quad (3.1)$$

$$\text{Taxa de entrega dia}_x = \frac{\text{Nº de encomendas entregues dia}_x}{\text{Nº de encomendas planeadas entregar dia}_x} \quad (3.2)$$

A taxa de ocupação dos veículos permite ter noção do volume ocupado pelas mercadorias comparativamente ao volume útil dos camiões. Quanto maior for este valor, mais rentável se torna o camião uma vez que é enviado maior volume de mercadoria para o mesmo custo de transporte. Note-se que para o cálculo deste indicador, a empresa utiliza como volume útil dos camiões 50 m³ e 80 m³ para os camiões de pequena e grande dimensão, respetivamente.

Para uma melhor compreensão do estado da empresa no início do projeto, procedeu-se à análise dos dados durante o ano 2018. Os gráficos apresentados na Figura 10 e Figura 11 foram construídos calculando as taxas médias diárias para cada dia de trabalho do ano em questão.

De acordo com a Figura 10, observa-se que as taxas de ocupação se encontram bastante abaixo de 80%, o objetivo da empresa. Os valores das taxas de ocupação situam-se na maioria entre os 45 e 65%, apresentando uma média de 61,4% e um desvio padrão de 13%. A empresa aponta como justificações para este fenómeno as dimensões variadas dos produtos e baixos volumes de encomendas feitos por clientes com diferentes locais de entrega.

Após a análise das taxas médias de ocupação, verificou-se que os transportes que apresentam taxas de ocupação mais baixas correspondem àqueles que carregam vários produtos diferentes com dimensões variadas, o que dificulta a conceção da alocação das cargas de forma empírica tal como a empresa faz. Esta afirmação é comprovada pelo Anexo D, onde é apresentado um teste da significância do coeficiente de correlação de Pearson, realizado em SPSS, tendo-se verificado a existência de uma ligeira, mas significativa correlação negativa entre a variável taxa de ocupação e o número de produtos diferentes transportados num dado camião.

Durante a análise dos dados confirmou-se a existência de taxas de ocupação inferiores a 20%, tendo-se identificado estes valores como *outliers*. Após alguma investigação percebeu-se que esses resultados eram consequência da má introdução das dimensões de paletização dos produtos no sistema informático SAP, originando volumes de encomendas errados. Os erros encontrados correspondiam a situações em que a tabela que expõe as regras de paletização, utilizada em SAP para atribuir as dimensões de paletização de cada produto, apresentava incoerências.

Uma vez que a taxa de ocupação é calculada pelo sistema, através do volume total das encomendas expedidas (incluindo o volume das paletes) e do volume útil do camião, como indicado em (3.1), o facto de as dimensões de paletização não serem atribuídas corretamente conduz a volumes de mercadorias errados e consequentemente taxas de ocupação erradas.

O volume de cada encomenda é calculado através da equação (3.3), onde a designação Pal. significa paletização. O modo como a empresa efetua o cálculo das encomendas permite incluir o volume de possíveis paletes incompletos.

$$Volume = \frac{Quantidade\ encomenda}{Quantidade\ por\ paleta} \times Comprimento\ Pal. \times Largura\ Pal. \times Altura\ Pal., \quad (3.3)$$

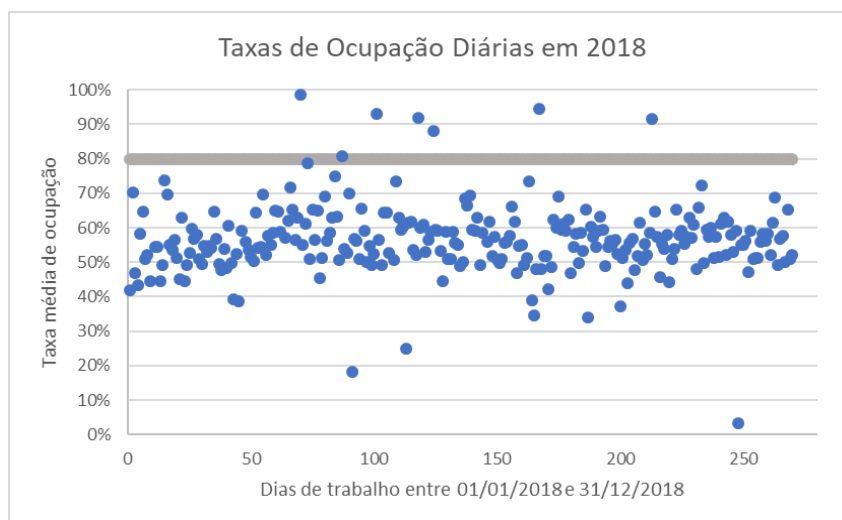


Figura 10 - Taxas de ocupação diárias em 2018

No que diz respeito à taxa de entrega diária, esta dá indicação da percentagem de encomendas que foram entregues num determinado dia quando comparado com as encomendas que deveriam ter sido entregues nesse mesmo dia. Para o cálculo do indicador, as encomendas podem ser consideradas não entregues devido a fatores externos ao planeamento de transporte.

Analisaram-se os dados apenas entre 01 de fevereiro e 31 de dezembro de 2018 uma vez que não existiam dados relativos ao mês de janeiro. Na Figura 11 observa-se que para este indicador, a maioria dos valores estão situados entre 70% e 90%. A média de taxa de entrega do ano de 2018 foi de 85,5% e o desvio padrão de 7%.

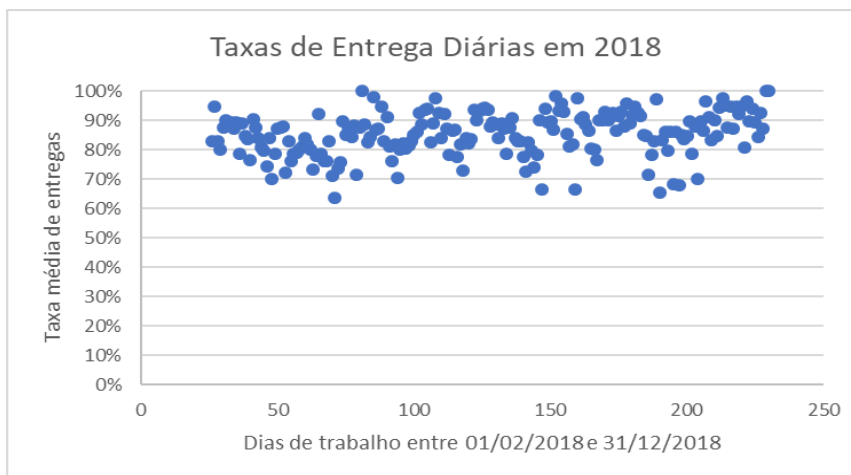


Figura 11 - Taxas de entregas diárias em 2018

Durante o intervalo de tempo entre 01 de fevereiro e 31 de dezembro de 2018 ocorreram aproximadamente 3000 falhas de entrega num total de mais de 21000 encomendas. O diagrama de Pareto (Figura 12) confirma que aproximadamente 80% das falhas de entrega estão relacionadas com atrasos da produção, planeamento de transporte, atrasos das empresas subcontratadas e bloqueios financeiros. Apesar de a maior responsável por estas falhas ser a produção, verificou-se em 2018 a ocorrência de 479 situações em que o planeamento de transporte é responsabilizado pelas falhas de entrega. No último semestre de 2018, a empresa registou as justificações das falhas de entrega e apresentou como principais causas, por ordem decrescente de frequência, rotas com baixo volume de mercadorias, o mau encaixe da carga no camião, erros de carga e a má definição das dimensões de paletização, isto é, introdução de dimensões erradas em SAP que conduzem a volumes errados.

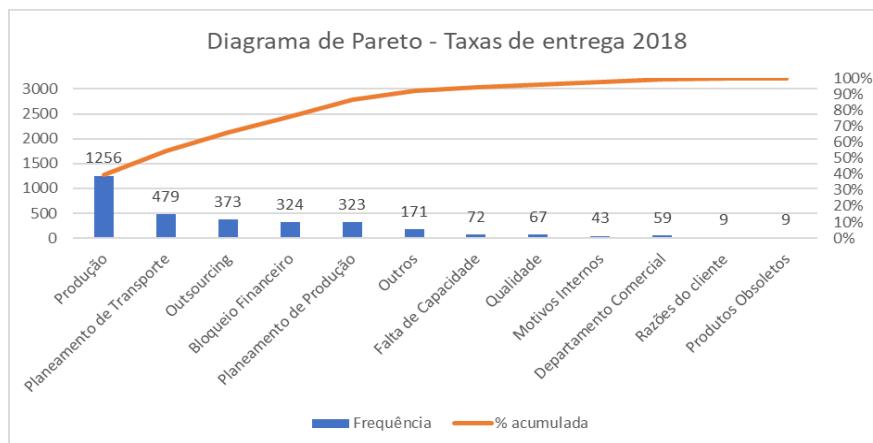


Figura 12 - Análise de Pareto às taxas de entrega em 2018

Os problemas apresentados implicam um elevado custo de transporte para a empresa. Deste modo, pretende-se implementar medidas que permitam melhorar os KPI's apresentados e consequentemente diminuir os custos incorridos pela DS Smith.

4 Modelo de encaixe de cargas em camiões

A ferramenta de encaixe de paletes nos camiões foi criada com o objetivo de melhorar as atuais taxas de ocupação dos veículos expedidos para os clientes. Pretendia-se que a ferramenta fosse de fácil utilização e que se recorresse a um *software* simples, onde fosse possível visualizar a disposição das cargas nos veículos.

Desse modo, utilizou-se o *software* Microsoft Excel e a linguagem de programação VBA para o desenvolvimento da ferramenta em questão.

4.1 Definição do modelo

Os problemas de encaixe de mercadorias em contentores podem apresentar diferentes variantes, pelo que se considerou primordial identificar a tipologia do problema.

De acordo com a tipologia apresentada no capítulo 2.1, o problema classifica-se como minimização de entradas visto que a empresa não apresenta limite de camiões disponíveis.

No que diz respeito à identificação de produtos, a classificação é um pouco ambígua dado que se verificam situações distintas. Ainda que a mercadoria expedida tenha sempre a forma aproximada de um paralelepípedo, os artigos inseridos num determinado camião tanto podem apresentar dimensões variadas como apresentar dimensões uniformes. Tendo-se constatado que em ocorrências em que as mercadorias têm dimensões variadas este fator dificulta o processo de carregamento do camião, identificou-se a variedade de produtos como heterogénea.

4.1.1 Restrições do problema

O problema em causa apresenta restrições tanto ao nível geométrico como em situações em que existe mercadoria para mais do que um cliente no mesmo veículo.

Restrições geométricas

Tratando-se de um problema de encaixe de paletes em camiões, as restrições geométricas dizem respeito aos volumes, ao suporte necessário ao encaixe de paletes, à sobreposição das mesmas e limitações dimensionais do veículo. Noutras situações poderia ser necessário ter em atenção o peso das mercadorias. No entanto, uma vez que o produto expedido possui baixo peso, desprezaram-se as restrições relativas à distribuição de peso no veículo.

Para além destas restrições é importante considerar que as paletes podem sofrer rotações. Existem dois tipos de rotações permitidas, sendo as mesmas feitas em torno do eixo do z, ou seja, da altura do camião, tal como exemplifica a Figura 13.

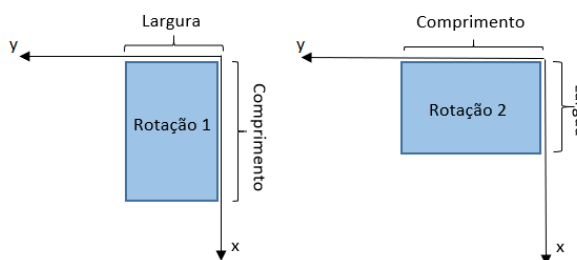


Figura 13 - Tipos de rotação das cargas

A Tabela 1 indica algumas das variáveis utilizadas para a construção do modelo. Nesta tabela, é possível visualizar as variáveis consideradas essenciais para a melhor compreensão das restrições e função objetivo de seguida apresentadas. Os parâmetros indicados retratam informação relativa aos camiões, às cargas e à localização das paletes num dado camião.

Tabela 1 - Parâmetros do problema

Camião	
N	Número de camiões utilizados
C_i	Comprimento do camião i , $i \in \{1, \dots, N\}$
L_i	Largura do camião i , $i \in \{1, \dots, N\}$
A_i	Altura do camião i , $i \in \{1, \dots, N\}$
Vm_i	Volume máximo do camião i , $i \in \{1, \dots, N\}$
n_i	Número de cargas contidas no camião i ,
Cargas	
P	Número de diferentes categorias de carga
Q	Número total de cargas
c_p	Comprimento da carga do tipo p , $p \in \{1, \dots, P\}$
l_p	Largura da carga do tipo p , $p \in \{1, \dots, P\}$
a_p	Altura da carga do tipo p , $p \in \{1, \dots, P\}$
q_p	Quantidade de cargas do tipo p , $p \in \{1, \dots, P\}$
v_p	Volume da carga do tipo p , $p \in \{1, \dots, P\}$
Localização da paleta num dado camião	
x_{ij}	Posição do vértice inicial da carga j no eixo x , $j \in \{1, \dots, n\}$
y_{ij}	Posição do vértice inicial da carga j no eixo y , $j \in \{1, \dots, n\}$
z_{ij}	Posição do vértice inicial da carga j no eixo z , $j \in \{1, \dots, n\}$
x_{fj}	Posição do vértice final da carga j no eixo x , $j \in \{1, \dots, n\}$
y_{fj}	Posição do vértice final da carga j no eixo y , $j \in \{1, \dots, n\}$
z_{fj}	Posição do vértice final da carga j no eixo z , $j \in \{1, \dots, n\}$
t	Tipo de rotação da carga, $t = \{1, 2\}$

A Figura 14 esquematiza aquilo que se considera o vértice inicial e final de uma dada carga, referenciado na Tabela 1.

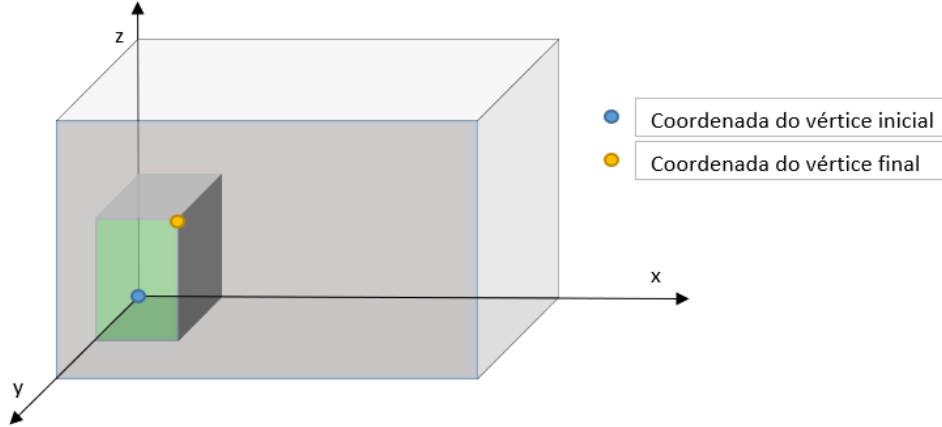


Figura 14 - Exemplificação de vértice inicial e final

De seguida apresenta-se a formulação das restrições geométricas referidas anteriormente, assumindo o índice k como referência à carga à qual se testa o encaixe, sujeita às restrições que se seguem.

A inequação 4.1 limita o volume contido no camião, não permitindo que este ultrapasse o volume total do camião.

$$Vm_i \geq (\sum_{j=1}^{n_i} c_j \times l_j \times a_j) + c_k \times l_k \times a_k \quad (4.1)$$

Relativamente aos limites dimensionais do veículo, a restrição explicada pela expressão (4.2) impõe que as paletes contidas num determinado camião não ultrapassem o comprimento, largura ou altura do veículo.

$$xf_k \leq C_i \wedge yf_k \leq L_i \wedge zf_k \leq A_i \quad (4.2)$$

No interior do camião é mandatório que não ocorra sobreposição de cargas. A condição (4.3) impede que a carga a ser inserida se sobreponha às mercadorias já colocadas no veículo.

$$(xf_k < xi_i) \vee (xf_i < xi_k) \vee (yf_k < yi_i) \vee (yf_i < yi_k) \vee (zf_k < zi_i) \vee (zf_i < zi_k), \quad (4.3) \\ \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} \wedge k \neq i$$

Atendendo a que na maioria dos casos é possível dispor as cargas em dois andares, a existência de uma base de suporte é indispensável para a formação da segunda camada, tal como exemplifica a condição (4.4).

$$\text{Área de suporte da base} \geq (xf_k - xi_k) \times (yf_k - yi_k) \quad (4.4)$$

A condição (4.5) obriga a que exista um suporte lateral de forma a impedir o deslizamento das mercadorias ao longo veículo (eixo x da Figura 14). Para o caso, considerou-se que se um terço da face lateral estiver apoiada por outra carga será suficiente para impedir o escorregamento. Esta condição reforça a preservação da qualidade dos produtos.

$$\text{Área lateral de suporte} \geq \frac{(zf_k - zi_k) \times (yf_k - yi_k)}{3} \quad (4.5)$$

Outras restrições

Por requisitos logísticos quer da DS Smith quer dos clientes, optou-se por fazer o carregamento das cargas da mesma encomenda todas juntas, uma vez que esta imposição permite diminuir as perdas de tempo aquando do carregamento e facilita a descarga por parte dos clientes.

Para além disso, existem camiões que transportam mercadorias para mais do que um cliente. Nestas situações é imprescindível que as encomendas do mesmo cliente sejam enviadas todas juntas e que a ordem pela qual se inserem as cargas no veículo seja inversa à ordem de entrega, ou seja, se utilize a estratégia LIFO.

4.1.2 Construção da solução

A construção da solução é desenhada com base nas mercadorias que o utilizador atribui a uma determinada rota, pelo que, o objetivo do programa é apenas fazer a melhor alocação de cargas de modo a maximizar as taxas de ocupação. Desse modo, a ferramenta foi desenvolvida com o intuito de ser utilizada essencialmente em duas situações distintas: rotas que necessitam apenas de um veículo para o transporte de mercadorias ou trajetórias em que para o mesmo cliente é necessário a utilização de vários veículos.

Para a primeira situação, o objetivo é testar a exequibilidade do transporte, ou seja, verificar se todas as mercadorias programadas para a rota em questão cabem no camião ou alocá-las de maneira a que fique de fora o menor número possível de cargas. Neste caso, o envio de mercadorias pode ser feito a um ou mais clientes e cabe ao utilizador escolher em que tipo de camião pretende testar o encaixe.

No caso em que é enviado mais do que um camião para o mesmo cliente, optou-se por utilizar apenas veículos de grande dimensão. Esta decisão é justificada pelo facto de os veículos de pequena dimensão apresentarem um custo por metro cúbico 1,56 vezes superior ao custo de um camião de grande dimensão, para o mesmo destino. Adicionalmente, torna-se mais fácil identificar quais os camiões de rotas diferentes que se podem complementar.

No entanto, uma vez que os veículos avançados possuem um custo mensal fixo, o programa concede ao utilizador a possibilidade de indicar o número de avançados disponíveis no momento. Caso existam camiões avançados disponíveis, a alocação das mercadorias é feita primeiramente neste tipo de veículos, de forma a não incorrer em custos extra desnecessários.

A necessidade de ser o utilizador a indicar o número de avançados disponíveis advém da possibilidade de estes veículos terem, no momento do planeamento, percorrido o número de quilómetros máximo permitido no contrato ou estarem a ser utilizados noutra percurso.

Estipulou-se que, para qualquer solução, caso algum dos camiões possua menos de 30% de taxa de ocupação, não será expedido e, portanto, as mercadorias alocadas a esse veículo são identificadas como cargas não entregues. O facto de as cargas serem identificadas como não entregues não implica que não sejam realmente enviadas ao cliente no dia estipulado, indica apenas que, se possível, devem ser inseridas noutra rota.

A construção da solução nos camiões foi idealizada de modo a respeitar as limitações do empilhador e do carregamento, e simultaneamente agilizar o processo de carga. Assim sendo,

a formação da solução é construída em parede, tal como se observa na Figura 15, permitindo aos condutores do empilhador, se possível, carregarem duas paletes sobrepostas de cada vez.

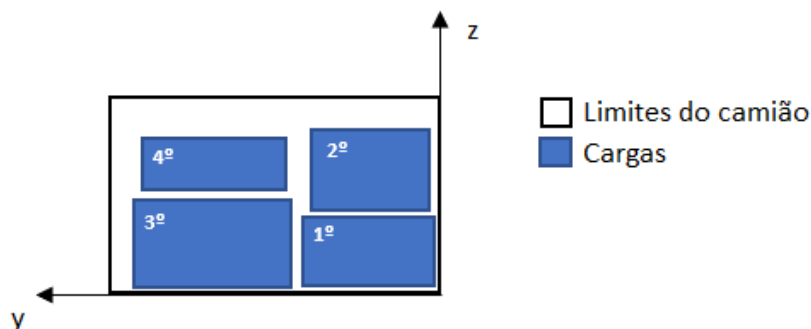


Figura 15 - Ordem de construção em parede

A construção da solução tem como base pontos de adição, o que significa que cada vez que uma carga é adicionada ao camião, são gerados novos pontos a partir dos quais será testada a alocação de outras cargas. Cada vez que se pretende adicionar uma nova carga é verificada a exequibilidade de cada um dos pontos de adição existentes de acordo com as restrições descritas em 4.1.1.

No que diz respeito às rotações, no momento de encaixe de cada carga, testam-se os dois tipos de rotação e escolhe-se aquele que possui o menor valor da coordenada em x. Com isso, pretende-se que as cargas ocupem sempre posições em que é minimizada a utilização do comprimento do veículo.

4.1.3 Desenvolvimento do Algoritmo Genético

Uma vez que o encaixe de cargas em camiões é um problema de elevada complexidade, foi necessário recorrer a meta-heurísticas que permitissem alcançar boas soluções de forma menos exaustiva e sem elevados tempos de execução.

A meta-heurística escolhida para a otimização das taxas de ocupação dos camiões foi o Algoritmo Genético dado que se trata de um algoritmo frequentemente usado neste género de problemas, de fácil implementação e baixo tempo de execução.

Como referido anteriormente, o algoritmo genético é uma meta-heurística que assenta em princípios genéticos. O modelo baseia-se no cruzamento de indivíduos e geração de novas entidades em que apenas as mais fortes sobrevivem, concretamente, as que possuem melhores valores da função objetivo. Assim, é necessário definir o código genético de cada indivíduo e criar uma população inicial (Anexo E).

Para o problema em questão, definiu-se como código genético a ordem de entrada de cada categoria de carga no camião. Note-se que, com categoria de carga se entende cargas de uma determinada encomenda e o respetivo item, sendo que se no mesmo conjunto encomenda-item existir uma paleta incompleta, esta vai possuir uma categoria de carga diferente. A identificação desta variável como princípio do código genético teve como fundamento a restrição imposta, ou seja, as mercadorias do mesmo conjunto encomenda-item serem enviadas todas juntas. Além disso, permite que os tempos de execução da ferramenta sejam menores, uma vez que desta forma existe um menor número de genes.

A Figura 16 exemplifica um código genético onde existem 8 tipos de categorias de carga diferentes. Neste caso, verifica-se que as primeiras paletes a serem carregadas no camião são as do tipo de carga 5, de seguida as do tipo 4, depois as do tipo 1 e assim sucessivamente.

5	4	1	3	6	2
---	---	---	---	---	---

Figura 16 - Exemplo de código genético

O algoritmo genético exige que sejam afinados cinco parâmetros: dimensão da população, taxa de reprodução, taxa de mutação, número de gerações e taxa de substituição. Os valores destes parâmetros foram definidos com base nos melhores resultados obtidos com a ferramenta e na literatura existente (Ponce-Pérez et al, 2005). Os valores definidos encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros do Algoritmo Genético

Variável	Valor
Dimensão da população	100
Taxa de reprodução	70%
Taxa de mutação	5%
Número de gerações	20
Taxa de substituição	50%

População Inicial

A população inicial é criada através da geração aleatória de 100 listas de ordem de entrada dos tipos de categoria de carga. No momento da conceção dos indivíduos é tido em conta o número de clientes diferentes. Se existir apenas um cliente, a geração aleatória da ordem de entrada das categorias de carga é feita sem qualquer restrição.

Numa situação em que existem entregas a mais do que um cliente, a formação do código genético tem em consideração a ordem de entrega dos mesmos, isto é, se o cliente A é o último a ser descarregado, então todas as categorias de carga deste cliente são os primeiros genes do código genético e assim sucessivamente. Esta exigência evita a possibilidade de misturar no camião encomendas de clientes diferentes, facilitando o processo de descarga.

Crossover

O *crossover* é o cruzamento de indivíduos que irá originar novos elementos da população. Uma vez que para o problema em causa existem situações de entrega de encomendas a um ou mais do que um cliente, o processo de cruzamento aplicado a cada uma das situações é necessariamente diferente.

Em cada geração são selecionados 50 indivíduos potenciais criadores de novas soluções. Os 50 indivíduos são escolhidos de acordo com a regra da roleta. Este método utiliza a aptidão relativa de cada indivíduo para selecionar com maior probabilidade os indivíduos com maior aptidão, ou seja, melhor função objetivo.

No método da roleta é escolhido aleatoriamente um valor, S , entre zero e a aptidão total dos indivíduos, ou seja, a soma de todas as aptidões de uma determinada população. Enquanto o valor de S for menor do que a soma das aptidões relativas de cada indivíduo, o ciclo continua. Assim que a soma das aptidões relativas ultrapassar o valor de S , é selecionado o indivíduo que se encontra nessa posição. O raciocínio utilizado encontra-se explicado na Figura 17.

```


$$p(i) = \frac{aptidão(i)}{aptidão\ total}; i \in [1, 2, \dots, 100]$$

 $S \in [0, Aptidão\ total];$ 
Escolher aleatoriamente S;

i = 1
soma = p(i);

Enquanto S > soma
i = (i + 1);
soma = soma + p(i);
Fim enquanto

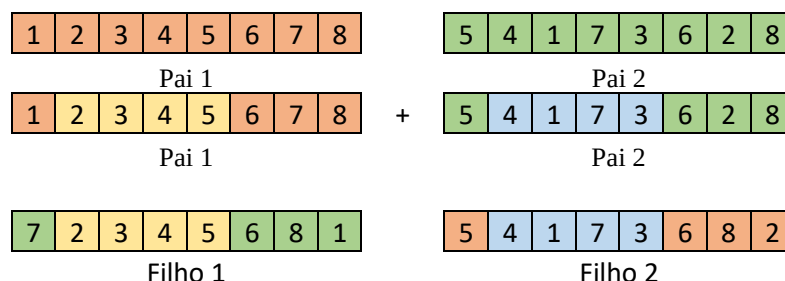
Retorna i

```

Figura 17 - Pseudo código do método da roleta

Posto isto, são escolhidos, do grupo de 50 potenciais pais, dois indivíduos de forma aleatória, ou seja, duas listas de entrada de paletes no camião, que possuem uma probabilidade de 70% de gerar novos indivíduos.

Recorrendo ao método *order crossover*, utilizado em situações em que existe apenas um cliente no problema, seleciona-se aleatoriamente um intervalo contínuo de genes. Os genes do pai 1 e 2, incorporados no intervalo, são transcritos nas mesmas posições para os filhos 1 e 2, respetivamente. De seguida, as posições vazias devem ser preenchidas pelo pai que ainda não forneceu nenhum gene, copiando ordenadamente, a partir do limite superior do intervalo, os genes que o filho ainda não possui. O processo termina quando todas as posições dos filhos estão preenchidas. A Figura 18 ilustra um exemplo do método *crossover* utilizado.

Figura 18 - Exemplo de *order crossover*

Para a situação em que existe mais do que um ponto de entrega, o método utilizado é muito semelhante, no entanto, a divisão de transcrição de genes é feita no ponto de separação das encomendas de cada cliente, ao invés de ser definida aleatoriamente.

Tomando como exemplo a Figura 19, verifica-se que o Cliente A é detentor das categoria de carga 1, 2 e 3 enquanto o cliente B possui as cargas tipo 4, 5, 6, 7 e 8. Uma vez que se estipulou que não há mistura de encomendas de clientes diferentes dentro do camião, a troca é feita no ponto de divisão dos dois clientes. Assim sendo, o filho 1 recebe do pai 1 os genes relativos ao cliente A e do pai 2 os genes do cliente B. Por outro lado, o filho 2 herda os genes do pai 2 inerentes ao cliente A e do pai 1 os genes associados ao cliente B.

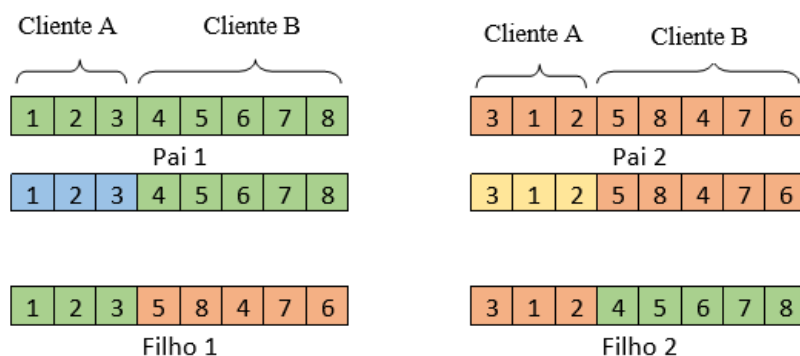


Figura 19 - Exemplo *crossover* com mais do que um ponto de entrega

Depois de aplicado o *crossover*, cada nova solução possui uma probabilidade de 5% de sofrer mutação. A mutação consiste na troca de dois genes, ou seja, na alteração da ordem de entrada de duas categorias de carga. A seleção das posições que sofrem a troca é feita de forma aleatória, no entanto, em situações em que existe mais do que um ponto de entrega, a seleção dos pontos que sofrem a troca de posições pertencem obrigatoriamente ao mesmo cliente, de forma a evitar a mistura de mercadorias de clientes.

Função Aptidão

A função aptidão avalia a prestação de cada ordem de entrada das categorias de carga (Anexo F). É a partir deste valor que são selecionados, recorrendo ao método da roleta, os indivíduos que passam para a geração seguinte.

Para o problema em questão, o objetivo é aumentar as taxas de ocupação e diminuir o número de cargas que ficam por entregar. Assim sendo, definiu-se como função aptidão a expressão (4.6), atribuindo maior ponderação ao termo relativo às taxas de ocupação, dado que a prioridade do problema é diminuir o número de camiões expedidos/aumentar as taxas de ocupação. Considera-se que a melhor ordem de entrada das categorias de carga nos camiões é aquela que maximiza a função objetivo.

Note-se que inicialmente todas as cargas são inseridas nos camiões, ainda assim, caso algum deles apresente uma taxa de ocupação inferior a 30%, considera-se que esse mesmo camião não é utilizado e todas as mercadorias que lhe tinham sido alocadas serão classificadas como não entregues.

$$Max Z = 10 \times \frac{\sum_{i=1}^N Taxa\ de\ ocupação_i}{N} + \frac{(\sum_{i=1}^N n_i)}{Q} \quad (4.6)$$

O algoritmo termina depois de serem formadas 20 gerações, sendo que a solução selecionada corresponde à ordem de entrada das categorias de carga com o valor da função aptidão máximo na vigésima geração.

4.2 Utilização da ferramenta

A ferramenta pretende ser de uso simples, pelo que foi automatizada ao máximo de forma a que o tempo despendido com a sua utilização seja o menor possível.

Aquando do planeamento, o planeador deve extrair os dados do SAP relativos às encomendas que se prevê entregar no dia seguinte e copiá-los para o Excel de otimização de disposição de cargas. De seguida, deve selecionar-se um conjunto de mercadorias de uma determinada rota para as quais se pretende verificar uma solução ótima de transporte.

Caso nesse conjunto exista mais do que um cliente, é mandatório que o utilizador selecione um dos critérios de ordem de entrega disponibilizados. A ferramenta concede a possibilidade de a ordem de entrega ser feita tendo em conta as janelas temporais dos clientes ou distâncias dos mesmos à fábrica da DS Smith.

O programa demora sensivelmente um minuto a ser executado, no entanto este valor pode sofrer desvios consoante o número de categorias de carga diferentes que o problema apresenta.

Após a execução do programa, a disposição da carga dentro de cada camião é apresentada em três dimensões como ilustra a Figura 20. Como suporte à solução apresentada visualmente, construída utilizando a linguagem de programação VBA, é providenciada a informação acerca da ordem de entrada de cada encomenda no respetivo camião e o tipo de rotação associado a cada objeto. Além disso, o utilizador tem acesso à informação das mercadorias que são ou não entregues e respetivas quantidades.

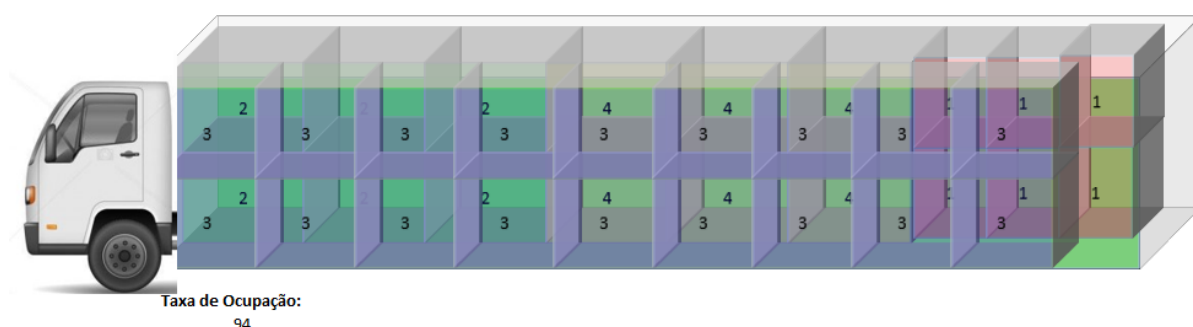


Figura 20 - Exemplo de visualização 3D de uma solução

Atente-se que, para o bom funcionamento da ferramenta, as bases de dados que servem de apoio ao Microsoft Excel devem ser atualizadas periodicamente. Entre as bases de dados utilizadas para o desenvolvimento do programa, destacam-se a lista de clientes com os respetivos pontos de entrega e distâncias à DS Smith, assim como os dados provenientes do SAP referentes às encomendas.

4.3 Implementação da ferramenta

A fase de implementação iniciou com a formação do planificador de transportes. Durante esta fase foi lecionado ao funcionário o procedimento de utilização da ferramenta de encaixe de paletes em camiões. Adicionalmente, foi elaborado um manual de utilização do Excel em causa, de modo a que qualquer funcionário da empresa fosse capaz de utilizar a ferramenta (Anexo G).

No capítulo 3 são evidenciadas algumas das causas de falha de entregas atribuídas ao planeamento de transporte. Tendo-se apontado o mau dimensionamento das cargas como uma das razões, e uma vez que o dimensionamento providenciado pelo SAP é utilizado no funcionamento da ferramenta, procedeu-se à análise das dimensões de paletização das mercadorias expedidas e posterior correção da base de dados do SAP.

Assim, durante algumas semanas analisou-se diariamente os dados relativos às encomendas que entravam no sistema. Para essas encomendas verificou-se as dimensões do produto e o tipo de palete utilizado e comparou-se com as dimensões de paletização atribuídas pelo sistema. Sempre que se encontravam falhas na correspondência dos dados, verificava-se a regra aplicada pela tabela de paletização, utilizada pelo SAP, e procedia-se à sua correção.

Por fim, refletiu-se acerca do melhor método para a construção física das soluções fornecidas pela ferramenta e estipulou-se que seria o planeador de transporte a entregar aos funcionários

da empresa subcontratada o modo como seria feito o carregamento de cada camião. Assim, na solução entregue ao condutor do empilhador, é apresentada a ordem de entrada de cada tipo de produto, isto é, a ordem de entrada de um determinado par encomenda – item, assim como a rotação desses objetos.

Ao longo da implementação verificou-se um elevado sentido de cooperação por parte dos condutores dos empilhadores.

4.4 Análise de resultados

A comparação de resultados entre a ferramenta desenvolvida e o método utilizado pela DS Smith visa confirmar a viabilidade da ferramenta.

Inicialmente considerou-se fazer testes para carregamentos passados. Com isto pretendia-se utilizar a ferramenta para simular os resultados teóricos que conseguiríamos obter perante a mesma situação, no entanto, verificou-se que não existiam dados suficientes para a realização dessa tarefa. Para que fosse possível fazer uma comparação entre o método utilizado pela DS Smith e os resultados obtidos com a ferramenta, era necessário que se encontrassem disponíveis os dados de todas as encomendas que se pretendiam enviar, bem como das cargas que não foram entregues por falta de espaço. Contudo, a empresa guarda apenas os dados referentes aos transportes e encomendas alocadas ao mesmo, não sendo possível verificar o volume de mercadorias que se pretendiam enviar para uma determinada rota nem as encomendas que não foram entregues por falta de espaço.

Como alternativa, optou-se por, durante as duas últimas semanas, aceder ao sistema e guardar os dados referentes às mercadorias previstas enviar em cada dia e fazer uma análise comparativa entre a utilização da ferramenta e o método tradicional utilizado pela DS Smith para a requisição de camiões.

Uma vez que a DS Smith possui um elevado número de clientes e volume de vendas, não foi possível fazer testes para todos os camiões expedidos. Desse modo, selecionou-se aquela que se considera ser a situação mais crítica e testou-se a ferramenta apenas para esse cliente.

Para identificar a situação mais crítica, agruparam-se todos os clientes a quem tinham sido enviadas mercadorias durante o ano de 2018, calculou-se o número de camiões expedidos para cada um deles e as suas taxas de ocupação médias. Ordenaram-se os clientes por ordem decrescente de número de camiões expedidos e eliminaram-se todos os que receberam em média menos de dois camiões por semana, assim como aqueles com taxa média de ocupação superior a 65%. Apesar de comparar a ferramenta com um dos piores resultados do sistema tradicional, estes casos são representativos de uma larga maioria, como se observa na Figura 10, perfazendo 59,2% dos casos ocorridos em 2018.

Ao resultado obtido filtraram-se os clientes que se mantinham ativos, ou seja, aqueles que apresentavam no sistema encomendas entre maio e junho.

Posto isto, identificou-se como situação mais crítica o cliente Y que se encontrava em primeiro lugar da lista, a quem foram enviados 770 camiões durante 2018 e cuja taxa média de ocupação é de aproximadamente 63%. Para o mesmo cliente, verificou-se a existência de um elevado número de produtos de dimensão variável.

De forma a obter melhores resultados na comparação dos dois métodos, as condições externas devem ser as mesmas. Assim, as taxas de ocupação do novo método foram calculadas de forma análoga à DS Smith, isto significa que, para o cálculo das taxas de ocupação dos diferentes testes se utilizaram como volume útil dos camiões 50m³ e 80m³ para os veículos de pequena e grande dimensão, respetivamente.

O primeiro teste para o cliente Y foi realizado no dia 3 de junho, o que significa que o carregamento seria realizado no dia seguinte. Para o teste a considerar estava em causa o encaixe de 4 tipos de categorias de cargas, o total de 85 paletes com um volume de 152,5 m³ e não se encontravam disponíveis os veículos avançados. Seguindo o método utilizado pela DS Smith, previamente explicado no capítulo 3.4.1, o cálculo do número de camiões necessários é obtido agrupando a mercadoria em grupos entre 50 m³ a 60 m³. Assim sendo, requisitaram-se 3 camiões de grandes dimensões, o que em média representa uma taxa de ocupação de 63.5%. Em contrapartida, verificou-se que utilizando a ferramenta de alocação de cargas no camião, se obteve, como ilustra a Figura 21, a necessidade de requisitar apenas 2 camiões de grande dimensão com taxa de ocupação média de 95%. A redução de um camião de grande dimensão para expedir a mesma carga, originou uma redução de custos de 33,3%.

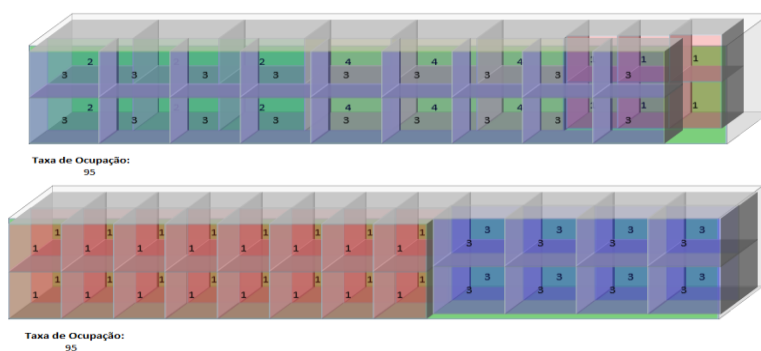


Figura 21 - Visualização 3D solução do transporte de 4 junho

A mesma metodologia foi aplicada aos restantes testes, com o objetivo de analisar os seus resultados e a respetiva variação de custos, tal como demonstra a Tabela 3. Para o cálculo do número de camiões utilizando o método da DS Smith, foi pedido ao planeador de transportes que para cada situação indicasse o número de camiões que requisitaria. Em nenhum dos testes se encontravam disponíveis os veículos avançados.

A variação de custos para cada teste foi calculada utilizando a fórmula (4.7). Para os testes em causa, utilizaram-se apenas camiões de grande dimensão, pelo que, o custo de requisição de cada um dos veículos utilizados é igual. Assim sendo, para esta situação em particular, a variação de custo percentual pode ser calculada utilizando a variação de camiões requisitados.

Em todo caso, poderiam ter sido utilizados camiões avançados para o transporte de mercadorias. Para o cálculo da variação de custos, considera-se que estes veículos apresentam um custo de utilização de 0€.

$$\Delta \text{Custo} = \frac{\text{Custo}_{\text{método DS Smith}} - \text{Custo}_{\text{ferramenta}}}{\text{Custo}_{\text{método DS Smith}}} \quad (4.7)$$

Os resultados obtidos demonstram que para os 8 testes realizados nas últimas duas semanas do projeto, se conseguiu diminuir o número de camiões expedidos comparativamente ao método utilizado pela DS Smith, perfazendo uma redução de 21,7% dos custos. Analisando apenas os testes, a ferramenta aparenta trazer melhorias para a empresa no que concerne ao aumento das taxas de ocupação e diminuição de custos.

No entanto, ainda que os resultados apresentados pareçam atrativos, é necessário ter em consideração que foram realizados poucos testes e, portanto, estes valores permitem ter uma noção de melhoria, porém não podem ser utilizados como valores referência. Além do mais, os testes foram aplicados apenas a casos de baixo êxito no que diz respeito às taxas de

ocupação e embora estes constituam uma grande maioria dos casos, se a aplicação dos testes fosse alargada para os restantes clientes, a melhoria global poderia não ser tão notória.

Adicionalmente, a variação de custos não contabiliza a insatisfação do cliente pela falta de entrega de determinadas cargas. Esta insatisfação é difícil de calcular, no entanto deve ser tida em consideração. A medida imposta pela ferramenta, ou seja, de as encomendas alocadas a camiões onde a taxa de ocupação é inferior a 30% não serem expedidas, implica que, por vezes seja necessário realocar essas encomendas a outras rotas ou que não sejam entregues. No método utilizado pela DS Smith, a determinação do número de camiões é feita de modo que, idealmente, as encomendas sejam enviadas na sua totalidade, pelo que não existia esta regra.

No total de testes realizados verificou-se apenas duas situações em que existiam paletes consideradas não entregues. Para os casos, verificou-se uma taxa de incumprimento de 4,6% e 1,6 % para os transportes do dia 7 de junho e 14 de junho, respetivamente.

Para além disso, uma vez que o planeamento é feito no dia anterior à expedição de mercadorias e que a empresa utiliza o método de produção *make-to-order*, as encomendas nem sempre estão prontas no momento do planeamento de transporte, o que pode implicar alterações ao planeamento previamente definido. Assim, conclui-se que os resultados se encontram fortemente dependentes da produção.

Tabela 3 - Quadro resumo dos resultados do cliente Y

Data do transporte:	Dados mercadoria			Método Utilizado pela DS Smith:		Utilização da ferramenta			Variação de custos:
	Categorias de carga	Total de cargas	Volume (m ³)	Nº de camiões	Taxa de ocupação média	Nº de camiões	Taxa de ocupação média	Nº de paletes não entregues	
04/06/2019	4	85	152,5	3 grandes	63,5%	2 grandes	95%	0	- 33,3%
05/06/2019	13	52	112,9	2 grandes	70%	2 grandes	70%	0	0%
06/06/2019	11	20	61,7	1 grande	77%	1 grande	77%	0	0%
07/06/2019	19	130	239,9	4 grandes	74,9%	3 grandes	92,3%	6	- 25%
11/06/2019	6	81	148,8	3 grandes	62%	2 grandes	93%	0	- 33,3%
12/06/2019	6	28	41,4	1 pequeno	82,8%	1 pequeno	82,8%	0	0%
13/06/2019	18	55	137,8	3 grandes	57,4%	2 grandes	72%	0	- 33,3%
14/06/2019	30	186	335,7	6 grandes	69,9%	5 grandes	82,4%	3	- 16,7%

5 Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

A ferramenta implementada foi desenvolvida com o objetivo de aumentar as taxas de ocupação dos veículos expedidos e tem como principais vantagens permitir ao planeador de transportes visualizar em 3D o encaixe das mercadorias nos diferentes camiões, identificar o número de veículos necessários à expedição dos produtos e reconhecer antecipadamente as cargas que poderão não ser entregues devido à falta de espaço.

Após a análise dos resultados verificou-se que com a utilização da ferramenta torna-se desnecessário planear o número de camiões com uma margem de segurança associada, permitindo a diminuição do número de camiões expedidos e o aumento das taxas médias de ocupação. A melhoria conduz a uma redução dos custos de transporte de aproximadamente 21,7%. Ainda assim, a amostra de testes não é representativa e o número de testes realizados não é suficiente para concluir que os resultados não são enviesados.

Os benefícios inerentes à utilização da ferramenta não devem ser avaliados tendo em consideração apenas os custos de transporte. Sabe-se que em alguns casos a satisfação dos clientes pode ser afetada caso as mercadorias não sejam entregues na sua totalidade e, ainda que seja uma medida difícil de quantificar, deve dar-se particular atenção a este fator. Tendo em conta a possibilidade de visualizar e identificar antecipadamente quais as cargas que não são enviadas, o planeador pode associar as mesmas a outros veículos cujo limite de capacidade não tenha sido atingido, não havendo necessidade de incorrer no custo de um camião extra. Esta alternativa apresenta custos, no entanto, o valor é bastante inferior ao custo de requisição de um camião extra. Por outro lado, sempre que a prioridade de entrega for superior ao benefício de poupar o transporte, nada impede o planeador de requisitar um camião extra mesmo que a sua taxa de ocupação seja 30%.

Os ensaios realizados consideram que não há falhas de produção, ou seja, que as mercadorias estão prontas no momento do carregamento dos veículos, o que nem sempre acontece. Desse modo, considera-se que o planeamento de transportes está fortemente condicionado pelos atrasos de produção, podendo existir alterações ao planeamento previamente definido que modifiquem os resultados obtidos.

Posto isto, conclui-se que os resultados obtidos com a ferramenta desenvolvida apresentam melhorias ao nível dos custos de transporte e taxas de ocupação pelo que se pode assumir que os objetivos foram cumpridos. No entanto, os resultados não devem ser vistos como valores de referência.

Como continuação ao projeto apresentado, recomenda-se que se continuem a extrair os dados necessários e se aplique a simulação durante um período de tempo mais significativo de forma a validar o benefício da ferramenta. Para além disso, seria interessante atribuir prioridades às encomendas a expedir, com o propósito de serem obrigatoriamente enviadas aquelas que apresentam maior urgência de entrega. Adicionalmente, recomenda-se a correção dos dados errados introduzidos em SAP, em particular das variáveis necessárias à utilização da ferramenta de alocação de mercadorias.

Tendo em conta as dificuldades sentidas ao longo do projeto, seria vantajoso que se reflectisse acerca do desenvolvimento de trabalhos futuros.

Durante a implementação da ferramenta, verificou-se que os funcionários da empresa subcontratada apresentavam alguma dificuldade em encontrar os produtos a ser carregados, dado que, por vezes se encontram em locais de difícil acesso. Assim, propõe-se como trabalho futuro a otimização do *layout* do armazém com vista à diminuição de tempo de carregamento dos camiões, consequente diminuição dos atrasos nas entregas e aumento da satisfação por parte dos clientes.

Por fim, tendo-se identificado as rotas de baixo volume como a maior causa de falhas de entregas associadas ao planeamento de transporte, sugere-se como trabalhos futuros a análise da definição de rotas dos veículos expedidos.

Referências

- Almada Lobo, Bernardo. 2019a. «Constructive Heuristics The model world and the problem world».
- Almada Lobo, Bernardo 2019b. «Escaping local optima Traditional problem-solving strategies».
- Beasley, John, e P.C. Chu. 1994. «A Genetic Algorithm for the Set Covering Problem». *The Journal of the Operational Research Society*, Junho, 392–404. <https://doi.org/10.2307/3010021>.
- Ceschia, Sara, e Andrea Schaerf. 2013. «Local search for a multi-drop multi-container loading problem», 275–94. <https://doi.org/10.1007/s10732-011-9162-6>.
- Dyckhoff, Harald. 1990. «A typology of cutting and packing problems». *European Journal of Operational Research* 44 (2): 145–59. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90350-K](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90350-K).
- Festa, Paola, e Mauricio Resesende. 2009. «Effective Application of GRASP».
- Glover, Fred. 1990. «Tabu Search: A Tutorial».
- Lourenço, Helena, Olivier Martin, e Thomas Stützle. 2010. «Iterated Local Search».
- Moura, Ana, e José Fernando Oliveira. 2004. «An integrated approach to the vehicle routing and container loading problems».
- Pisinger, David. 2002. «Heuristics for the container loading problem». *European Journal of Operational Research*. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00132-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00132-7).
- Ponce- Pérez, Armando, Arturo Pérez-Garcia, e Victor Ayala-Ramirez. 2005. «Bin-packing using genetic algorithms». *Proceedings - 15th International Conference on Electronics, Communications and Computers, CONIELECOMP 2005* 2005 (March 2005): 311–14. <https://doi.org/10.1109/CONIEL.2005.25>.
- Resende, Mauricio, e Celso Ribeiro. 2002. «Greedy Randomized Adaptive Search Procedures».
- Talbi, El-Ghazali. 2009. *Metaheuristics: From design to implementation*.
- Wäscher, Gerhard, Heike Haußner, e Holger Schumann. 2007. «An improved typology of cutting and packing problems». *European Journal of Operational Research* 183 (3): 1109–30. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.12.047>.

ANEXO A: Códigos de disposição na paleta

 **CÓDIGOS DE DISPOSIÇÃO NA PALETE** Versão: 05-02-2019
Unidade Guimarães

	A	B	C	D	E	F	G	H
01								
02								
03								
04								
05								
06								
07								
08								
09								
10								
12								
15								
16								
18								
20								

Figura 22 - Número de pilhas e disposição na paleta

ANEXO B: Tabela de alturas de paletização e quantidades máximas por pilha

QUANTIDADES POR PALETE		
TIPO DE CAIXA		
		<u>AMERICANA</u>
		<u>WRAP AROUND / PRANCHA</u>
ALTURA		130cm
CARTÃO / QUANTIDADES	Cartão 1	320un
	Cartão 2	250un
	Cartão 3	180un
	Cartão 4	140un
	Cartão 5	135un
	Cartão 6	80un
	Cartão 7	65un
	Cartão 8	45un 38un
		650un
		500un
		400un
		280un
		270un
		160un
		130un
		90un 76un

Figura 23 - Regras de alturas e quantidades por pilha consoante o tipo de cartão

ANEXO C: Ejemplo de mapa de carga

Planificação															dos carga		
Pedido da carga			Carga disponível			Carga plan			Descarga plan - limite			Destino rota			Código postal comple	Tipo viatu	Matricula
data	hora		data	hora		data	hora	nº descarg	data	hora (limite 17h)							
01.03.2019	16:00		04.03.2019	10:00								MAIA			80		
01.03.2019	16:00		04.03.2019	10:00								MAIA			80		
01.03.2019	16:00		04.03.2019	11:00								MAIA			80		
01.03.2019	16:00		04.03.2019	12:00								VILA DO CONDE			50		
01.03.2019	16:00		04.03.2019	12:00								POVOA DE VAREZIM			50		
01.03.2019	16:00		04.03.2019	12:00								GEMUNDE			50		
01.03.2019	16:00		04.03.2019	12:00								GONDOMAR			50		
01.03.2019	16:00		04.03.2019	15:00						17h		LEÇA			80		

Figura 24 - Exemplo de mapa de cargas enviado à empresa subcontratada

ANEXO D: Teste à correlação em SPSS

Correlations

		Correlations	
		Nº de Materiais	Taxa Ocupação
Nº de Materiais	Pearson Correlation	1	-,044**
	Sig. (2-tailed)		,003
	N	4511	4511
Taxa Ocupação	Pearson Correlation	-,044**	1
	Sig. (2-tailed)	,003	
	N	4511	4511

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Figura 25 - Teste à significância da correlação entre a taxa de ocupação e o número de produtos diferentes no camião

ANEXO E: Algoritmo 1- Pseudocódigo Algoritmo Genético

```
Gerar 100 listas de entrada das categorias de carga aleatoriamente
Para cada lista de entrada
    Calcular Função Aptidão da lista de entrada
Fim para

Definir Número de gerações

Para cada Geração
    Selecionar (da população) 50 listas de entrada de acordo com a regra da roleta
        Aplicar crossover às listas selecionadas
        Para cada lista de entrada
            Calcular Função Aptidão
        Fim para
    Fim para

Para cada lista de entrada
    Escolher a lista de entrada com valor máximo da função aptidão
Fim para
```

Figura 26 - Pseudocódigo do Algoritmo Genético aplicado na ferramenta

ANEXO F: Algoritmo 2- Pseudocódigo da Função Aptidão

Algoritmo 2 Pseudo Código da Função Aptidão

```

Para cada Camião disponível
Para cada número de cargas
    Se Verificar restrição volume máximo então
        Para cada rotação
            Para cada ponto de adição
                Se Verificar restrição dos limites do camião então
                    Se Verificar restrição suporte vertical então
                        Se Verificar restrição suporte lateral então
                            Guardar viabilidade da solução
                        Senão
                            Ir para próximo ponto de adição
                        Fim se
                    Senão
                        Ir para próximo ponto de adição
                    Fim se
                Senão
                    Ir para próximo ponto de adição
                Fim se
            Fim para
        Fim para
    Senão
        Ir para próximo camião disponível
    Fim se
Escolher solução viável com menor coordenada em x (rotação e ponto de adição a adicionar)
Adicionar carga ao camião com a solução escolhida
Fim para
Fim para

Para cada camião utilizado
    Calcular Taxa de ocupação
    Se taxa de ocupação <30% então
        Eliminar camião
        Adicionar cargas do camião eliminado ao conjunto de cargas não entregues
    Fim se
Fim para

```

$$\text{Função Aptidão} = 10 \times \frac{\sum_{i=1}^N \text{Taxa de ocupação}_i}{\text{Número de camiões utilizados}} + \frac{\text{Número de cargas entregues}}{\text{Número total de cargas}}$$

Figura 27 – Pseudocódigo da função aptidão

ANEXO G: Manual de utilização da ferramenta