

Algoritmo genético aplicado ao carregamento de contêineres em aeronaves

Radimila dos Santos, Fábio Luiz Usberti e Christiano Lyra Filho

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - Universidade Estadual de Campinas
Cidade Universitária Zeferino Vaz, Av. Albert Einstein, 400. 13083-852, Campinas - SP
e-mail: radimila@gmail.com ; fusberty@gmail.com e chrlyra@gmail.com

Resumo

O carregamento de contêineres em aeronaves consiste em um problema relevante tanto no aspecto de segurança do voo quanto em termos econômicos para as operadoras de linhas aéreas. O objetivo consiste em decidir quais contêineres e em que posições carregá-los em uma aeronave de tal forma a maximizar a massa total carregada. São considerados tipos distintos de contêineres, quanto à massa e volume, e restrições de peso máximo e de centro de gravidade da aeronave. Uma heurística foi desenvolvida utilizando os conceitos de algoritmos genéticos com busca local. Para possibilitar a comparação dos resultados obtidos um modelo linear inteiro foi proposto e resolvido por um solver. Foram utilizados dados reais, com pequenas “perturbações”, para gerar instâncias similares as encontradas em carregamento de aviões comerciais. Os resultados revelam que o modelo exato limita-se a encontrar soluções ótimas para instâncias de porte menor. O algoritmo genético mostra-se como uma alternativa eficiente ao modelo exato para instâncias de maior porte.

Palavras-chave: algoritmos genéticos, busca local, programação linear inteira, problema de empacotamento

Abstract

The container loading of aircrafts consists a problem that is relevant in terms of flight safety and also on economic aspects for carrier airlines companies. The objective consists in deciding which containers to load and their locations in an aircraft so that the maximum weight is maximized. This paper considers different types of containers, with respect to their mass and volume, and the aircraft maximum load and center of gravity constraints. A heuristic method was developed using concepts of genetic algorithms with local search. For comparison, a full linear model was proposed and solved by a solver. Real data with small perturbations were used to generate instances similar to those found on commercial airplane loading. Results reveal that the exact algorithm is limited on finding optimal solutions to small size instances. The genetic algorithm was shown as an efficient alternative to the exact model for large size instances.

Keywords: genetic algorithms, local search, integer linear programming, bin packing problem.

1 Introdução

Diante do crescimento do setor aéreo no Brasil, surge a necessidade de ferramentas para o auxílio dos carregamentos das aeronaves por parte das companhias aéreas. A finalidade de um bom carregamento é alocar as cargas da melhor maneira, respeitando os limites estruturais de cada aeronave e dentro das normas vigentes de segurança. Um mau carregamento pode causar um acidente, além de gerar um custo adicional no consumo de combustível, pois um deslocamento do Centro de Gravidade (C.G) de menos de 75 cm, para um voo de 10.000 Km gera um gasto a mais de 4000 Kg de combustível (Mongeau and Bès 2003). Sendo este responsável por 43% dos custos de uma companhia aérea brasileira (Tyler 2013).

O problema de carregar aeronaves pode ter diferentes abordagens, objetivos e métodos de resolução. Uma referência muito reconhecida sobre o tema é Larsen and Mikkelsen (1980) e nela o problema tratado é o de minimizar os custos de carregamento e os custos relacionados aos atrasos. Como restrição mantem-se o centro de gravidade em um intervalo seguro, para facilitar alterações de carregamento inesperadas. No caso de voos de única etapa esse se torna o objetivo primário. Esse problema foi modelado com uma função objetivo de variáveis binárias e com restrições não lineares que respeitam as condições de estabilidade em solo, combinando restrições de limites de carga, posição, capacidade e balanceamento. Como método de solução, foram desenvolvidas duas heurísticas e ambas apresentaram bom desempenho.

Um problema similar foi investigado por Mongeau and Bès (2003), nos quais os objetivos eram de maximizar o peso das mercadorias transportadas e minimizar o consumo de combustível. Por se tratar de objetivos conflitantes, considerou-se maximizar o peso total das mercadorias e tomando a localização do centro de gravidade como uma restrição linear. As restrições de capacidade volumétrica foram tratadas de maneira particular para poderem ser escritas linearmente, para isso foi levado em consideração o tipo de aeronave e de contêineres utilizados, juntamente com o auxílio de um número pequeno de variáveis inteiras. Tendo assim um problema linear para ser resolvido, o método utilizado para a resolução foi o *Branch and Bound*.

S Limbourg and Laporte (2011) desenvolveram uma programação linear inteira mista para o carregamento de contêineres em aeronaves cargueiras. Como objetivo levaram em consideração o posicionamento do CG e o momento de inércia, esse duplo objetivo implicava num aumento da eficiência, diminuição do consumo de combustível e impacto ambiental. Como restrições garantir um voo seguro, com controle do balanceamento lateral e longitudinal, sem exceder os pesos estruturais. Com o software desenvolvido obtiveram soluções ótimas em poucos segundos, sendo necessários somente a lista de contêineres e os parâmetros da aeronave.

Outra abordagem feita para aeronaves cargueiras foi proposta por Kelly Fok (2004). Primeiramente realizou uma análise do banco de dados, para construir uma previsão a longo prazo e auxiliar a companhia em contratos futuros. Em segundo lugar, a otimização do planejamento do carregamento utilizando o Matlab e Mosek. Denominou-se de CLPA (Cargo Load Plan and Analysis) o sistema de otimização que retornava a resposta com tempo inferior a 1 minuto.

Raghavendra Totamane and Rao (2009) propôs um algoritmo baseado em previsão de demanda dependendo da rota e do plano de voo, considerando uma solução múltipla produtor/consumidor, onde a companhia aérea é o produtor e o consumidor o usuário de cargas. Como o volume de carga transportada é grande, qualquer melhora na previsão da demanda gera um impacto na economia, desempenho e eficiência geral da operação.

Chunhua Tian and Liu (2009) tratou o problema de planejamento de carga como um problema de modelos lógicos de negócios complexos. A abordagem de otimização foi baseada no método de fluxo regras que captura domínios especializados, mas também apresentam certa flexibilidade para mudanças lógicas. Esse tipo de abordagem tem sido aplicado para diferentes áreas e problemas.

Tang and Chang (2010) desenvolveram um método de solução baseado em um técnica de decomposição de cenários e algoritmo genético. Realizaram testes numéricos com dados reais de

operações de uma companhia Asiática.

Diferentemente dos demais artigos citados, que realizaram o planejamento para empresas comerciais, Kaluzny and Shaw (2009) estudaram o planejamento de cargas para as forças aéreas. Que realiza o transporte de equipamentos, suprimentos e passageiros. Modelaram o problema como um problema de programação linear inteira mista e utilizaram um solver para resolução. Tinham como objetivos minimizar o desvio do CG a partir de um CG alvo ou maximizar os itens carregados, utilizando restrições de redução por simetria, corte especializado e transitividade para limitar o espaço de busca.

Outras abordagens para a solução do problema de carregamento de aeronaves são propostas por Cochard and Yost (1985), Frankel (1980-81) e Martin-Vega (1985).

Este trabalho tem por objetivo investigar um problema de carregamento de aeronaves buscando maximizar a quantidade de mercadorias transportadas e levando em consideração a eficiência econômica e restrições de segurança.

A organização deste artigo se encontra da seguinte forma. Na Seção 2, o problema da alocação de contêineres é descrito, juntamente com as definições e o modelo matemático utilizados. A Seção 3 apresenta o algoritmo genético e a busca local propostos. Finalmente, a Seção 4 apresenta estudos de casos computacionais que comparam as eficiências das metodologias exata e heurística.

2 Problema de Alocação de Contêineres em Aeronaves

2.1 Descrição e definições do problema

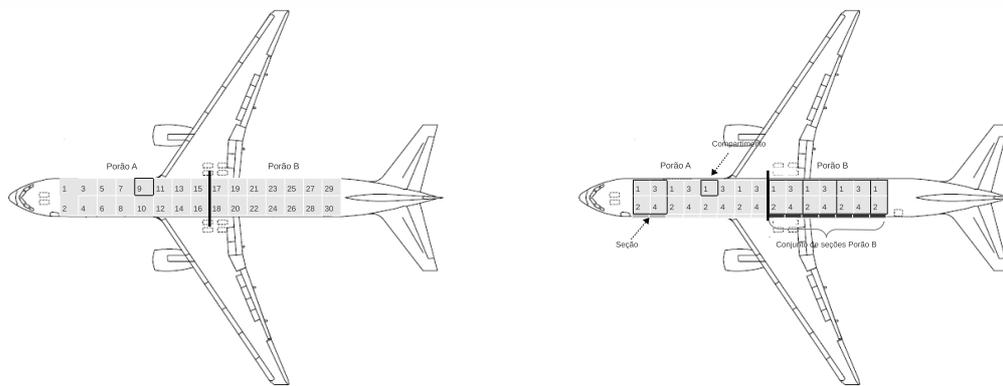
Para descrever o problema de carregamento de aeronaves, primeiramente define-se o modelo de aeronave que será utilizada. O modelo escolhido nesse projeto foi a aeronave da fabricante *Boeing*, modelo 767 – 300, para o qual conseguiu-se coletar dados reais e suficientes para realizar estudos de casos. As configurações da aeronave foram adaptadas para melhor atender os objetivos desse trabalho, que visa maximizar a quantidade de mercadorias transportadas em contêiner, respeitando as restrições de peso e Centro de Gravidade.

Para melhor entendimento das condições desse carregamento, seguem abaixo o mapeamento dos porões e as descrições dos contêineres utilizados. Considerando o carregamento no centro geométrico de cada compartimento e balanceamento ao longo do eixo longitudinal.

O mapeamento dos porões é feito de acordo com a Figura:1(a), uma característica dessa aeronave é a assimetria dos porões. Onde o porão dianteiro é maior do que o porão traseiro. Pode-se observar que os porões dianteiro e traseiro recebem os nomes de Porão A e Porão B, respectivamente.

Na Figura:1(b) seguem algumas das definições que são utilizadas. Compartimento corresponde a cada um dos segmentos numerados de 1 a 30. O conjunto composto por 4 compartimentos é chamado de seção. Como cada compartimento possui uma localização específica nas seções, estas são denominadas posições e são numeradas de 1 a 4, com exceção da última seção que é numerada de 1 a 2.

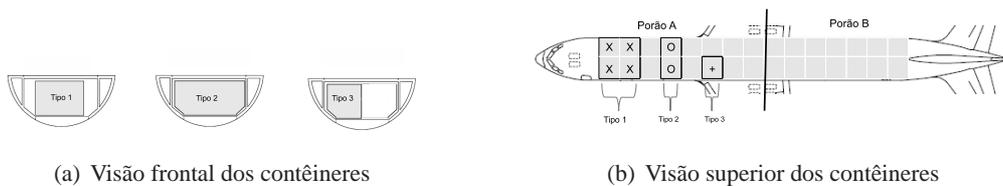
Os tipos e as dimensões dos contêineres utilizados são apresentados nas Figuras:2(a) e 2(b). Os contêineres são denominados de tipo 1, tipo 2 e tipo 3. O contêiner tipo 1 ocupa 4 compartimentos e só pode ser carregado nas seções do porão A, pois suas dimensões não permitem passagem pela porta do porão B. O contêiner do tipo 2 ocupa 2 compartimentos, podendo estar somente em posições subsequentes, ou seja, não podem ser carregados na horizontal. O contêiner tipo 3 ocupa apenas 1 compartimento e pode ser carregado em qualquer porão.



(a) Mapeamento dos porões

(b) Definições

Figura 1: Descrição da aeronave.



(a) Visão frontal dos contêineres

(b) Visão superior dos contêineres

Figura 2: Descrição dos contêineres

2.2 Modelo Matemático

Um modelo de programação linear inteira (PLI) é proposto neste trabalho para o problema de carregamento de aeronaves. O modelo utiliza variáveis binárias x_{ij} e y_{ik} . A variável $x_{ij} = 1$ quando o contêiner i está carregado no compartimento j ; $x_{ij} = 0$, caso contrário. A variável $y_{ik} = 1$ quando o contêiner i está carregado em algum compartimento da seção k . Todos os parâmetros e notações utilizadas no modelo encontram-se descritos na Tabela 1.

$$\text{Max} \quad M(x) = \sum_{i=1}^{N_{cont}} \sum_{j=1}^{N_{comp}} M_i x_{ij} \quad (1)$$

s.a.

(Restrições de sobreposição de contêineres)

$$\sum_{j=1}^{N_{comp}} x_{ij} \leq b_i \quad i = 1, \dots, N_{cont} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{cont}} x_{ij} \leq 1 \quad j = 1, \dots, N_{comp} \quad (3)$$

(Restrições de massa)

$$\sum_{i=1}^{N_{cont}} \sum_{j \in h} M_i x_{ij} \leq M_{max}^h \quad h = A, B \quad (4)$$

(Restrições de centro de gravidade)

$$M_0 D_0 + \sum_{i=1}^{N_{cont}} \sum_{j=1}^{N_{comp}} M_i D_{h_j} x_{ij} \geq (M_0 + M(x))(D - \epsilon) \quad (5)$$

$$M_0 D_0 + \sum_{i=1}^{N_{cont}} \sum_{j=1}^{N_{comp}} M_i D_{h_j} x_{ij} \leq (M_0 + M(x))(D + \epsilon) \quad (6)$$

(Restrições de seção)

$$\sum_{k=1}^8 y_{ik} \leq 1 \quad i = 1, \dots, N_{cont} \quad (7)$$

(Restrições volumétricas)

$$x_{ij_{k1}} + x_{ij_{k3}} \leq 1 \quad i \in \text{tipo2}; k \in K \quad (8)$$

$$x_{ij_{k1}} + x_{ij_{k4}} \leq 1 \quad i \in \text{tipo2}; k \in K \quad (9)$$

$$x_{ij_{k2}} + x_{ij_{k3}} \leq 1 \quad i \in \text{tipo2}; k \in K \quad (10)$$

$$x_{ij_{k2}} + x_{ij_{k4}} \leq 1 \quad i \in \text{tipo2}; k \in K \quad (11)$$

$$\sum_{j \in k} x_{ij} = b_i y_{ik} \quad i = 1, \dots, N_{cont}; k \in K \quad (12)$$

$$4 \sum_{i \in \text{tipo1}} y_{ik} + 2 \sum_{i \in \text{tipo2}} y_{ik} + \sum_{i \in \text{tipo3}} y_{ik} \leq 4 \quad k \in K_A \quad (13)$$

$$5 \sum_{i \in \text{tipo1}} y_{ik} + 2 \sum_{i \in \text{tipo2}} y_{ik} + \sum_{i \in \text{tipo3}} y_{ik} \leq 4 \quad k \in K_B \setminus \{8\} \quad (14)$$

$$3 \sum_{i \in \text{tipo1}} y_{ik} + 2 \sum_{i \in \text{tipo2}} y_{ik} + \sum_{i \in \text{tipo3}} y_{ik} \leq 2 \quad k = 8 \quad (15)$$

A equação (1) representa a maximização das mercadorias (massa) transportadas, objetivo desse projeto. As restrições (2) e (3) garantem que não hajam sobreposição de contêineres e compartimentos. A restrição (4) indica a existência de limitantes de massa para os porões A e B, já (5) e (6) limitantes dianteiro e traseiro do CG, a partir de um CG alvo. Cada contêiner poderá ser alocado em uma única seção (7). De (8):(11) garante-se o carregamento adequado dos contêineres tipo 2 em

Tabela 1: Notação utilizada no modelo PLI.

N_{cont}	número de contêineres a serem carregados;
N_{comp}	número de compartimentos;
K, K_A, K_B	conjunto de seções total, do porão A e do porão B, respectivamente;
h	índice do porão (A ou B);
h_j	índice do porão (A ou B) que contém o compartimento j ;
i	índice do contêiner ($1, \dots, N_{cont}$);
j	índice do compartimento ($1, \dots, N_{comp}$);
j_{kl}	índice do compartimento que se encontra na posição l da seção k ;
k	índice da seção ($k \in K$);
l_k	posição (1, 2, 3, 4) de um compartimento na seção k ;
M_0	peso da aeronave (antes do carregamento);
M_i	massa do contêiner $i = 1, 2, \dots, N_{cont}$;
M_{max}^h	peso máximo das cargas que podem ser carregadas no porão $h = A$ e B ;
ε	tolerância de desvio;
D_0	posição (longitudinal) do centro de gravidade antes do carregamento;
D_{h_j}	posição (longitudinal) do centro geométrico do compartimento $j = 1, 2, \dots, N_{comp}$;
D	posição (longitudinal) ideal do centro de gravidade depois do carregamento;
T_1, T_2 e T_3	conjunto dos contêineres de tipos 1, 2 e 3, respectivamente;
b_i	número de compartimentos ocupados pelo contêiner i , ($b_i = 4$ se $i \in T_1$, $b_i = 2$ se $i \in T_2$ e $b_i = 1$ se $i \in T_3$);

relação ao volume. A restrição (12) trata da relação entre o volume do contêiner e a seção utilizada. E as inequações (13) : (15) referem-se as combinações de tipos de contêineres e as seções.

3 Algoritmo Genético para Carregamento de Contêineres

3.1 Conceitos gerais

O algoritmo Genético (AG) é um método de otimização computacional inspirado na biologia evolutiva. Esse método foi fundamentado por Holland (1992), que se baseou em como os seres vivos se adaptam e evoluem diante dos cenários de adversidades e competição existentes na natureza (lei da evolução de Darwin). Para isso, o AG baseia-se em processos como seleção, cruzamento e mutação. Tais processos, são denominados de operadores genéticos.

Denomina-se indivíduo a representação de uma solução do problema. A esse indivíduo é atribuído um valor que indica o quanto ele é adaptado, chamado de fitness. Então juntamente com essas informações utilizam-se os operadores genéticos para formar as próximas gerações. Outros operadores como recombinação e mutação são utilizados para promover perturbações aleatórias nas características de cada indivíduo, com a finalidade de explorar melhor a região de soluções. Embora os algoritmos evolutivos sejam simples, eles são mecanismos suficientemente flexíveis e poderosos (Michalewicz 1996).

3.2 Codificação

A codificação refere-se à representação computacional de uma solução a partir de um cromossomo. O cromossomo corresponde a um vetor de números inteiros, onde cada elemento se denomina alelo. Cada alelo representa um contêiner candidato a ser carregado nos porões. O valor de cada alelo corresponde ao compartimento que o contêiner ocupa no porão. Logo, o cromossomo pode ser considerado como um mapeamento do porão, estabelecendo os compartimentos de cada contêiner.

Considere uma instância contendo 5 contêineres, sendo 1 contêiner do tipo 1, 2 contêineres do tipo 2 e 2 contêineres do tipo 3. A figura 3(a) representa esta instância, é possível notar que um dos contêineres do tipo 3 não foi carregado.

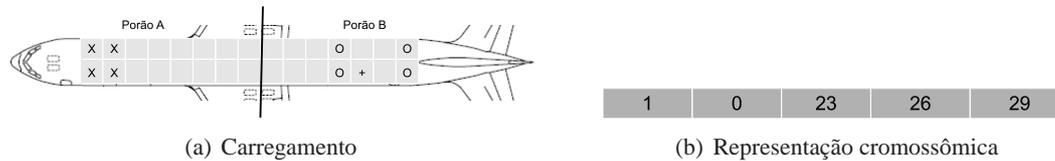


Figura 3: Representações do carregamento

A figura 3(b) é a representação cromossômica desse carregamento. Note que o primeiro alelo do indivíduo recebeu o valor 1, indicando que o primeiro contêiner está alocado no compartimento 1 do porão. No alelo 2 verifica-se o valor 0, que representa a ausência do contêiner no porão.

3.3 Geração

Uma heurística construtiva foi proposta para gerar uma população inicial factível, Algoritmo 1. Para determinar se um contêiner será ou não carregado, utiliza-se uma função de benefício (linha: 2). Essa função tem o valor máximo quando o peso específico p_i do contêiner i é igual ao peso específico máximo p^{max} . Já o valor mínimo da função que é aproximadamente metade do valor máximo e ocorre quando p_i é igual a p^{min} .

As linhas: 5 a 10 testam para cada contêiner e compartimento (i, pos) , primeiramente se a alocação do contêiner i no compartimento pos é factível, ou seja, se respeita todas as restrições de segurança da operação. Em segundo, compara-se o benefício b_i de alocar o contêiner i com um número aleatório entre (0,1) (linha: 7). Essa segunda etapa fornece a heurística construtiva um elemento estocástico de seleção de contêineres, onde cada contêiner terá probabilidade b_i de ser alocado na aeronave. A heurística é interrompida assim que todos os pares (i, pos) forem avaliados.

Algorithm 1 Inicialização indivíduo

```

1: for  $i \in I$  do
2:    $b_i \leftarrow \frac{4}{n} \left( 2 - \frac{p^{max} - p_i + 1}{p^{max} - p^{min} + 1} \right)$ 
3: end for
4:  $pos \leftarrow 30$ ;
5: while  $pos \geq 1$  do
6:   for  $i \in I$  do
7:     if  $b_i \geq \text{rand}(0, 1)$  and  $\text{factivel}(pos, i) = \text{true}$  then
8:        $\text{indiv\u00edduo}(i) = pos$ 
9:     end if
10:  end for
11: end while

```

3.4 Seleção

A seleção dos indivíduos parentais que darão origem aos indivíduos das próximas populações é realizada de maneira a escolher preferencialmente indivíduos com maiores aptidões. Um método de seleção muito utilizado é o torneio, onde cada indivíduo recebe uma probabilidade p_i de ser selecionado, diretamente proporcional à função de fitness. Em seguida 3 indivíduos da população são selecionados de maneira aleatória, e aquele que possuir a maior aptidão será o indivíduo escolhido para ser o pai. Esse procedimento é repetido para a escolha da mãe. Uma vantagem do método de

torneio consiste em não exigir uma comparação entre todos os indivíduos da população em busca do mais apto, poupando esforço computacional.

3.5 Cruzamento

Cruzamento é a troca de material genético entre o pai e a mãe selecionados. De maneira aleatória, um ou mais alelos são escolhidos como pontos de corte dos cromossomos. As partes resultantes da divisão são concatenadas formando-se os descendentes. Os dois descendentes gerados são compostos portanto pela combinação dos cromossomos paternos, conforme a Figura 4.

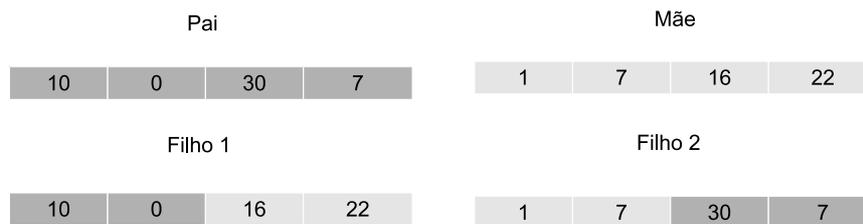


Figura 4: Cruzamento entre dois indivíduos da população.

3.6 Mutação

Mutação é um procedimento utilizado para a manutenção da diversidade genética da população, dado que após muitas gerações, sem mutação, a variabilidade entre indivíduos diminui. No que se refere ao processo de otimização, pode-se dizer que a mutação impede a estagnação do AG em ótimos locais.

De maneira aleatória, um ou mais alelos são mutados. Se o alelo escolhido for 0, a mutação substituirá esse valor por um outro número correspondente a uma posição factível para alocação do contêiner. Caso contrário, o alelo receberá 0.

3.7 Factibilização

Para o problema de alocação de contêineres em aeronaves, a sobreposição de contêineres, Centro de Gravidade desbalanceado e excesso de peso podem gerar indivíduos infactíveis. As infactibilidades podem acontecer após os processos de cruzamento e mutação. Quando isso acontecer a função de factibilização será utilizada.

A função de factibilização primeiramente checa se diferentes contêineres ocupam o mesmo compartimento. Se isso ocorrer, o contêiner que possuir o menor peso específico será desalocado e a posição referente a esse contêiner receberá o valor 0 (linhas:1:9). Em seguida os pesos dos porões A e B são verificados (linhas:10 e 14). Se houver violação de capacidade, o indivíduo de menor peso específico correspondente ao compartimento do porão violado será removido da aeronave (linhas:10 : 17). Por último as restrições de CG são analisadas, e se o CG do indivíduo for menor do que o CG_{min} , o contêiner de menor peso específico que ocupa um compartimento do porão A será removido, pois há sobrepeso na parte dianteira da aeronave (linhas:18:21). Caso o CG do indivíduo seja maior do que o CG_{max} remove-se o contêiner de menor peso específico do porão B, sobrepeso na parte traseira (linhas:23 e 24).

O procedimento de factibilização descrito garante que os indivíduos resultantes são soluções viáveis.

Algorithm 2 Factibilização

```

1: for  $\forall i_1, \forall i_2 \in I$  do
2:   if Posicao( $i_1$ ) = Posicao( $i_2$ ) then
3:     if PesoEsp( $i_1$ )  $\leq$  PesoEsp( $i_2$ ) then
4:       individuo( $i_1$ ) = 0
5:     else
6:       individuo( $i_2$ ) = 0
7:     end if
8:   end if
9: end for
10: while Peso(PoraoA)  $\geq$  PesoAmax do
11:    $i \leftarrow$  PesoEspMin(PoraoA)
12:   individuo( $i$ ) = 0
13: end while
14: while Peso(PoraoB)  $\geq$  PesoBmax do
15:    $i \leftarrow$  PesoEspMin(PoraoB)
16:   individuo( $i$ ) = 0
17: end while
18: while ( $CG_{min} \geq CG(indivduo)$ ) or ( $CG_{max} \leq CG(indivduo)$ ) do
19:   if  $CG_{min} \geq CG(indivduo)$  then
20:      $i \leftarrow$  PesoEspMin(PoraoA)
21:     individuo( $i$ ) = 0
22:   else
23:      $i \leftarrow$  PesoEspMin(PoraoB)
24:     individuo( $i$ ) = 0
25:   end if
26: end while

```

3.8 Busca local

Após a factibilização é possível que muitos contêineres sejam removidos e compartimentos que poderiam receber esses contêineres fiquem vagos. Como tentativa de sanar esse problema foi proposto um método de busca local, que visa explorar o espaço solução no intuito de melhorar o carregamento do avião.

A busca local inicialmente determina os compartimentos desocupados da aeronave (linha 1). Havendo tais posições, verificam-se as restrições de factibilidade na tentativa de alocar o contêiner de maior peso específico (linha 3). O processo é repetido até que não se tenham mais possibilidades de alocação, seja por indisponibilidade de compartimentos nos porões, ou por questões de factibilidade.

Algorithm 3 Busca Local

```

1: for  $pos \in PosicoesDisponiveis(indivduo)$  do
2:   for  $i \in I$  do
3:     if individuo( $i$ ) = 0 and factivel( $i, pos$ ) = true then
4:       individuo( $i$ ) =  $pos$ 
5:     end if
6:   end for
7: end for

```

3.9 Pseudo-código

O Algoritmo 4 apresenta o Pseudo-código da metodologia proposta para o problema de carregamento de aeronave. O critério de parada utilizado foi o número máximo de iterações (linha:3).

Algorithm 4 Pseudo-código do algoritmo genético

```

1:  $t \leftarrow 0$ 
2:  $P(t) \leftarrow \text{InicializacaoPopulacao}$ 
3: while  $t \leq \text{MaxIteracoes}$  do
4:   pai  $\leftarrow$  selecao(P(t))
5:   mae  $\leftarrow$  selecao(P(t))
6:   (filho1, filho2)  $\leftarrow$  crossover(pai, mae)
7:   filho1  $\leftarrow$  mutacao (filho1), filho2  $\leftarrow$  mutacao (filho2)
8:   filho1  $\leftarrow$  factibilizacao (filho1), filho2  $\leftarrow$  factibilizacao (filho2)
9:   filho1  $\leftarrow$  buscalocal (filho1), filho2  $\leftarrow$  buscalocal (filho2)
10:  filho  $\leftarrow$  Max(filho1, filho2)
11:  pai  $\leftarrow$  Max(pai, mae)
12:  if aptidao(filho)  $\geq$  aptidao(pai) then
13:     $P(t) \leftarrow P(t) - \text{pai}$ 
14:     $P(t+1) \leftarrow P(t) \cup \text{filho}$ 
15:  else
16:     $P(t+1) \leftarrow P(t)$ 
17:  end if
18:   $t \leftarrow t + 1$ 
19: end while

```

4 Estudos de Casos

As instâncias utilizadas estão apresentadas na Tabela 2. Para cada instância a quantidade e tipos de contêineres foram variados. O número de contêineres de um certo tipo, assim como suas massas, foram gerados de modo aleatório. Isso possibilitou a investigação de contêineres com diferentes pesos específicos, sempre respeitando as massas mínimas e máximas de cada tipo de contêiner (Tabela 3). Esses limites de massa foram estipulados para evitar contêineres com baixo aproveitamento e de pesos usualmente encontrados na prática.

Para os testes computacionais com o AG, foi utilizado uma população inicial composta por 100 indivíduos e um total de 300 iterações. O AG foi implementado no MATLAB 2010. Para possibilitar uma comparação dos resultados, o modelo PLI para o problema de carregamento de aeronaves foi carregado no solver comercial Gurobi 5.0. O tempo de execução do solver foi limitado em 600 segundos. Esse valor foi adotado considerando-se um tempo adequado para a aplicação da metodologia em campo. Os testes foram realizados em um computador Pentium(R) Dual-Core 2.0 GHz, com 3 GB de RAM.

Tabela 2: Distribuição de contêineres nas instâncias

instância	Quantidades de contêineres				Massa (kg)
	tipo 1	tipo 2	tipo 3	Total	
A	05	00	05	10	18124
B	09	02	04	15	42197
C	13	01	06	20	56096
D	15	10	05	30	74100
E	21	06	13	40	105424
F	27	15	08	50	140970

A Tabela 4 compara as soluções obtidas pela metodologia exata e heurística. Para as instâncias com até 20 contêineres (A, B e C), as duas metodologias encontraram a solução ótima, com uma ligeira vantagem de tempo de execução para o método exato. Para instâncias cujo número de contêineres disponíveis ultrapassa o valor de 20 (D, E e F), a solução do modelo PLI esgota o limite de tempo de execução. Ainda assim, a tabela registra a melhor solução encontrada pelo solução do

modelo PLI. Testes adicionais demonstraram que, mesmo executando as instâncias D, E e F durante 7200 segundos, ainda assim as soluções ótimas não foram encontradas. Isso indica que a solução exata do problema para instâncias de maior porte é complexa e demandaria um tempo de execução impraticável. Em contrapartida, a metodologia heurística obteve soluções próximas ao modelo PLI e em tempo de execução muito baixo (< 5 segundos). Instâncias com 100 contêineres ou mais também foram investigados, todavia a solução do modelo PLI não conseguiu encontrar nenhuma solução factível após o tempo limite de execução. Para esses casos, somente o AG conseguiu obter soluções factíveis em tempo aceitável.

Tabela 3: Intervalos de massa por tipo de contêiner

Tipo	Massa (kg)	
	Mínimo	Máximo
1	2500	5100
2	1225	2449
3	100	1224

Tabela 4: Comparações entre os métodos exato e heurístico

Modelo PLI		Algoritmo Genético	
Massa total (kg)	Tempo (s)	Massa total (kg)	Tempo (s)
7124	0.5	7124	0.7
11624	0.4	11624	0.7
10398	0.4	10398	1.0
24200	limite	24200	2.0
24224	limite	24024	2.0
24273	limite	24224	4.0

5 Considerações Finais

Nesse trabalho foram propostos um algoritmo genético (AG) e um modelo de programação linear inteira (PLI) para a solução do problema de carregamento de aeronaves paletizadas. O AG mostrou-se uma metodologia eficiente em termos de qualidade de solução e de viabilidade para utilização em campo.

O modelo PLI obteve soluções ótimas para instâncias de até 20 contêineres. Todavia para instâncias de maior porte o tempo de execução ultrapassou os limites aceitáveis para as operações em aeroportos. Portanto, o compromisso existente entre a qualidade do carregamento e o tempo necessário para obtenção da solução deve ser considerado na decisão de qual metodologia utilizar em uma aplicação real de carregamento de aeronaves.

Referências

- Chunhua Tian, Hao Zhang, F. L. and Liu, T.: 2009, Air cargo load planning system: a rule-based optimization approach, *IEEE/Informs International Conference* pp. 454–449.
- Cochard, D. and Yost, K.: 1985, Improving utilization of air force cargo aircraft, *Interfaces* **15**, 53–68.
- Frankel, M.: 1980-81, Army data distributions system/packet radio testbed contract mda903-80-c-0217, *Quarterly Technical Reports* .
- Holland, J. H.: 1992, *Adaptation in natural and artificial systems*, MIT Press, Cambridge, MA, USA.
- Kaluzny, B. L. and Shaw, R. H. A. D.: 2009, Optimal aircraft load balancing, *International Transactions in Operational Research* .
- Kelly Fok, Ming Ka Andy Chun, H. W.: 2004, Optimizing air cargo load planning and analysis, *Proceeding of the International Conference on Computing, Communications and Control Technologies* .
- Larsen, O. and Mikkelsen, G.: 1980, An interactive system for the loading of cargo aircraft, *European Journal of Operational Research* **4**, 367–373.
- Martin-Vega, L.: 1985, Aircraft load planning and the computer: Description and review, computer & industrial engineering, pp. 357–369.
- Michalewicz, Z.: 1996, *Genetic algorithms + data structures = evolution programs (3rd ed.)*, Springer-Verlag, London, UK, UK.
- Mongeau, M. and Bès, C.: 2003, Optimization of aircraft container loading, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* **39**.
- Raghavendra Totamane, Amit Dasgupta, R. N. M. and Rao, S.: 2009, Air cargo demand prediction, *IEEE SysCon 2009 - 3rd Annual IEEE International Systems Conference*, .
- S Limbourg, M. S. and Laporte, G.: 2011, Automatic aircraft cargo load planning, *Journal of the Operational Research Society* **63**, 1271–1283.
- Tang, C.-H. and Chang, H.-W.: 2010, Optimization of stochastic cargo container loading plans for air express delivery, *Second International Conference on Computer and Network Technology* .
- Tyler, T.: 2013, *Remarks of Tony Tyler at the Aviation Fuel Forum in Berlin (speech)*, IATA – International Air Transport Association. <http://www.iata.org/pressroom/speeches/Pages/2013-05-08-01.aspx> (accessed in May 2013).