

# PROGRAMAÇÃO DE TRIPULANTES DE AERONAVES NO CONTEXTO BRASILEIRO

**Wagner de Paula Gomes**

**Nicolau D. Fares Gualda**

Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes  
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

## RESUMO

Este trabalho trata o Problema de Programação de Tripulantes (PPT), de importância fundamental no planejamento operacional das empresas aéreas. O PPT é normalmente dividido em dois subproblemas (Problema de Determinação das Viagens e Problema de Atribuição de Escalas), resolvidos sequencialmente, dada a sua natureza combinatória. Esta pesquisa resume a proposição e a aplicação de uma metodologia para a solução integrada desses dois subproblemas, através de um Algoritmo Genético Híbrido (AGH) associado a um procedimento de busca em profundidade, considerando particularidades da legislação brasileira. A metodologia foi testada, com sucesso, para a solução de instâncias baseadas na malha real de uma empresa aérea brasileira.

## ABSTRACT

This paper treats the Crew Scheduling Problem (CSP), important part of the airlines operational planning. The CSP is often divided into two sub-problems (Crew Pairing Problem and Crew Rostering Problem), solved sequentially, given their combinatorial nature. This paper summarizes the proposition and the application of a methodology to solve the two sub-problems in an integrated way, with a Hybrid Genetic Algorithm (HGA) associated with a depth-first search procedure, taking into account the Brazilian legislation. The methodology was tested, with success, to solve instances related to a real network of a Brazilian airline.

## 1. INTRODUÇÃO

No transporte aéreo, os custos com tripulantes representam a segunda maior parcela dos custos operacionais das empresas, cerca de 20%, após os custos com combustíveis (Cabral *et al.*, 2000; Kohn e Karisch, 2004), o que leva à necessidade de uma atenção especial no planejamento dessas empresas.

O Problema de Programação de Tripulantes - PPT (*Crew Scheduling Problem*) refere-se à atribuição de escalas aos tripulantes, considerando as regulamentações trabalhistas, as regras de segurança, as políticas das empresas e a cobertura dos voos planejados, de tal maneira que combine a minimização dos custos da tripulação com a satisfação dos tripulantes (Barnhart *et al.*, 2003; Kohl e Karisch, 2004; Gopalakrishnan e Johnson, 2005).

O PPT é do tipo NP-Difícil (Andersson *et al.*, 1998), devido à grande quantidade de regras e regulamentações, o que dificulta ou impossibilita, em instâncias reais, a sua solução por métodos exatos, levando à necessidade de utilização de heurísticas ou meta-heurísticas para tal.

O PPT é normalmente dividido em dois subproblemas, resolvidos sequencialmente: Problema de Determinação das Viagens – PDV (*Crew Pairing Problem*) e Problema de Atribuição das Escalas – PAE (*Crew Rostering / Assignment Problem*). No PDV, determina-se um conjunto de viagens com custo mínimo que cubra todos os voos planejados. Em seguida, no PAE, as escalas, compostas pelas viagens escolhidas e outras atividades como folgas, sobreavisos, reservas, treinamentos e férias, são atribuídas aos tripulantes.

Viagem (Rotação, Chave de Voo, *Pairing* ou *Trip Rotation*.) é o trabalho realizado pelo tripulante, contado desde a saída de sua base domiciliar até o regresso à mesma,

caracterizando um ciclo. A base domiciliar (*Crew Base*) é a localidade onde o tripulante mantém domicílio e recebe suas folgas. Uma viagem pode ser formada por uma ou mais jornadas. Jornada (*Duty Period*) é a duração do trabalho do tripulante contada entre a hora de apresentação no local de trabalho e a hora em que o mesmo é encerrado (ANAC, 2008).

Na solução do PDV não são consideradas as disponibilidades e as preferências dos tripulantes. Neste caso, durante a atribuição das escalas aos tripulantes no PAE, podem ocorrer conflitos que ocasionam custos extras na programação. Além disso, as estimativas de custos adotadas no PDV não possuem caráter global, já que o custo real da programação só pode ser apurado após a atribuição das escalas aos tripulantes no PAE. Detalhes sobre a decomposição do PPT podem ser obtidos em Andersson *et al.* (1998), Barnhart *et al.* (2003), Kohl e Karisch (2004), Gopalakrishnan e Johnson (2005) e Gomes e Gualda (2008).

O estado da arte do PPT envolve a solução integrada do mesmo, conforme observado em Chang (2002), Guo *et al.* (2006), Mercier e Soumis (2007) e Souai e Teghem (2008), o que permite a estimativa dos custos e a incorporação das disponibilidades e preferências dos tripulantes de forma global. Destaca-se a metodologia proposta por Souai e Teghem (2008), em que a solução integrada do PPT é obtida através de um Algoritmo Genético Híbrido combinado com uma heurística corretiva e uma heurística de busca local.

O objetivo da presente pesquisa é resolver o PPT de forma integrada, eliminando a necessidade de resolver inicialmente o PDV, através de um Algoritmo Genético Híbrido associado a um procedimento de busca em profundidade, inspirado na abordagem de Souai e Teghem (2008), levando em conta as restrições ditadas pela legislação e acordos trabalhistas brasileiros.

O item 2 deste trabalho apresenta as principais particularidades do PPT no contexto brasileiro; o item 3 descreve a metodologia proposta; o item 4 apresenta os resultados obtidos nos testes e aplicações práticas do modelo; o item 5 apresenta as principais conclusões da pesquisa.

## **2. PARTICULARIDADES DO PPT NO CONTEXTO BRASILEIRO**

A cobertura de cada voo planejado pela empresa requer um conjunto de tripulantes de categorias distintas. Os tripulantes, no Brasil, são divididos em duas categorias, considerando suas funções (ANAC, 2008): técnicos (comandante e co-piloto) e não técnicos (comissários de bordo). A complexidade de solução do PPT pode ser reduzida tratando-se separadamente as programações de pilotos e de comissários (Andersson *et al.*, 1998).

No Brasil, o PPT está sujeito a regras de segurança e regulamentações da ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil, INFRAERO - Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária e DECEA - Departamento de Controle do Espaço Aéreo. As regulamentações trabalhistas seguem a Lei 7.183/84 (ANAC, 2008) e a Convenção Coletiva de Trabalho (SNA, 2009), firmada entre o Sindicato Nacional dos Aeronautas (SNA) e o Sindicato Nacional das Empresas Aeroviárias (SNEA).

Apresentam-se, abaixo, as regras e regulamentações aplicáveis ao PPT no contexto brasileiro:

- O início de uma jornada deve ocorrer no mínimo 30 minutos antes da hora prevista para início do primeiro voo (*brief*);
- Uma jornada é encerrada 30 minutos após a parada final dos motores (*debrief*);

- A duração de uma jornada é de no máximo 11 horas, para voos domésticos;
- Os limites para voo e pousos dos tripulantes por jornada são de 9½ horas e 5, respectivamente. As empresas que operam com aeronaves convencionais ou turboélice podem acrescentar 4 pousos ao limite estabelecido;
- Entre um pouso e uma nova decolagem existe um intervalo mínimo de segurança estabelecido para cada aeroporto, de acordo com as características de operação, a infraestrutura e o tipo de aeronave;
- O período máximo que cada tripulante deve ficar fora da base domiciliar é de 6 dias;
- Cada tripulante deve receber no mínimo 8 folgas por mês em sua base domiciliar, sendo 2 folgas consecutivas em um final de semana (uma no sábado e outra no domingo);
- Entre duas jornadas deve haver um intervalo mínimo (repouso) de 12 horas;
- Cada tripulante possui uma duração máxima de trabalho (semanal e mensal) e uma duração máxima das horas de voo (mensal, trimestral e anual), conforme o tipo de aeronave utilizado.

O custo da solução obtida no PPT é definido conforme a estrutura de remuneração dos tripulantes, determinada nas regulamentações trabalhistas e nos acordos sindicais. A estrutura de remuneração brasileira possui uma parcela fixa, contemplando uma garantia mínima de 54 horas de voo mensais, e uma parcela variável, correspondente às horas de voo que excedem a garantia mínima (SNA, 2009).

### 3. METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta para resolver o PPT, descrita neste item, é dividida em duas etapas: geração e otimização. Inicialmente, as jornadas viáveis são geradas (geração) e, em seguida, um Algoritmo Genético Híbrido (AGH) é utilizado para determinar a melhor combinação de jornadas aos tripulantes (otimização), considerando as regras e regulamentações, a cobertura dos voos, a minimização dos custos e o balanceamento da distribuição de trabalho.

#### 3.1. Geração das Jornadas

As jornadas viáveis são geradas através de um algoritmo de busca em profundidade, aplicado a uma rede de voos. Na rede de voos,  $G = (N, A)$ , os nós  $i \in N$  representam os voos e os arcos  $(i, j) \in A$  representam as conexões viáveis entre os mesmos. Além disso, existe um nó de origem  $s \in N$  e um nó de destino  $t \in N$ . O nó de origem  $s$  possui um arco incidente  $(s, i) \in A$  em cada nó  $i \in N$ . No nó de destino  $t$  chega um arco incidente  $(i, t) \in A$  de cada nó  $i \in N$ .

Um par de voos possui uma conexão viável quando o local de chegada do primeiro voo coincidir com o local de partida do segundo voo e o intervalo entre os dois corresponder a um tempo mínimo permitido e, em alguns casos, corresponder a um tempo máximo desejado, visando à redução no tamanho da rede.

O algoritmo de busca em profundidade inicia-se no nó de origem  $s \in N$  (raiz) e explora todas as conexões viáveis  $(i, j) \in A$ , até retroceder. Os caminhos  $s - t$  representam as jornadas. O processo de busca em profundidade controla a viabilidade das jornadas, levando em conta a duração máxima das jornadas e os limites de horas de voo e de pousos.

O custo de uma jornada é computado através da expressão 1 e equivale ao aproveitamento do tripulante mais o custo de pernoite.

$$c_d = \alpha \times \left[ t_d - \left( tp_c + \sum_{i \in I_d} t_i \right) \right] + cp_c \quad (1)$$

em que  $c_d$ : custo da jornada  $d$ ;  
 $\alpha$ : custo do minuto de trabalho de um tripulante;  
 $t_d$ : duração máxima da jornada  $d$  (em minutos);  
 $tp_c$ : tempo de preparação na cidade  $c$  (em minutos);  
 $t_i$ : duração do voo  $i$  (em minutos), incluindo intervalo mínimo para o próximo voo;  
 $I_d$ : conjunto de voos contidos na jornada  $d$ ; e  
 $cp_c$ : custo do pernoite na cidade  $c$ , computado somente nas jornadas com repouso fora da base domiciliar.

O tempo de preparação pode variar conforme as necessidades das empresas, respeitando a duração mínima de 30 minutos. Um tempo de preparação superior ao mínimo é adotado, por exemplo, em cidades com hotéis distantes dos aeroportos, evitando atrasos nos voos.

### 3.2. Algoritmo Genético Híbrido (AGH)

O Algoritmo Genético (AG) é uma meta-heurística, proposta por John Holland (1975) apud Cunha (2006), baseada no mecanismo de evolução natural, onde os indivíduos menos aptos são eliminados. Em linhas gerais, o AG parte de uma população inicial de soluções e evolui de forma iterativa, através da recombinação e da sobrevivência dos indivíduos mais aptos, até que algum critério de parada seja atingido. O AG tradicional pode ser combinado com heurísticas ou com outras meta-heurísticas, a fim de atenuar seus pontos fracos, como tempos de processamento longos e convergência prematura para um ótimo local. Esta combinação denota um Algoritmo Genético Híbrido (AGH). Cunha (2006) apresenta detalhes sobre o AG tradicional e o AGH.

Nesta pesquisa, adotou-se um AGH caracterizado pela combinação do AG tradicional com duas heurísticas. A primeira heurística é utilizada na geração da população inicial e a segunda heurística é aplicada na correção das soluções inviáveis, geradas após o cruzamento e a mutação dos indivíduos. O pseudocódigo do AGH é ilustrado na Figura 1.

|  |
|--|
| <p><b>Função AGH ( )</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Gerar a população inicial (Geração = 0);</li> <li>2. <u>Enquanto</u> (Geração &lt; Ger_Max) <u>faça</u></li> <li>3.     <u>Repita</u></li> <li>4.         Avaliar aptidão da população corrente;</li> <li>5.         Selecionar dois indivíduos para reprodução;</li> <li>6.         Realizar o cruzamento dos dois indivíduos selecionados;</li> <li>7.         Realizar a mutação em um dos dois descendentes gerados, conforme <math>Pm</math>;</li> <li>8.         Aplicar a heurística corretiva nos descendentes inviáveis;</li> <li>9.         <u>Até que</u> (<math>N</math> descendentes sejam gerados);</li> <li>10.        Avaliar a aptidão dos descendentes;</li> <li>11.        Atualizar a população (Geração = Geração + 1);</li> <li>12. <u>Fim enquanto</u>;</li> </ol> <p><b>Fim-função.</b></p> |
|--|

**Figura 1:** Pseudocódigo do AGH

O critério de parada do AGH considera um número máximo de gerações, dado por  $Ger\_Max$ , e em cada geração são produzidos  $N$  descendentes, onde  $N$  é o tamanho da população. A mutação é aplicada a um dos descendentes gerados no cruzamento, com a probabilidade  $Pm$ .

### 3.2.1. Representação do Cromossomo

O cromossomo é representado por uma matriz  $m \times n$ , onde  $m$  representa a quantidade de tripulantes contratada pela empresa e  $n$  o número de dias do horizonte de planejamento. Cada gene (célula)  $a_{kj}$  recebe o número da jornada  $d$  atribuída ao tripulante  $k$  no dia  $j$ . Um gene nulo representa que não foi atribuída nenhuma jornada ao tripulante  $k$  no dia  $j$  (dia livre). Um gene  $a_{kj} = -1$  indica que o tripulante  $k$  está indisponível para trabalhar no dia  $j$ , isto é, ao tripulante  $k$  no dia  $j$  foi pré-atribuída outra atividade como folga, sobreaviso, reserva, treinamento, reunião e exame periódico.

Vale ressaltar que o AGH contempla apenas a atribuição das jornadas aos tripulantes. As folgas e outras atividades pré-agendadas são obtidas na entrada do PPT e atribuídas em uma fase anterior, garantindo que as restrições de folgas mensais e período máximo, em dias, que os tripulantes devem retornar à base domiciliar, sejam automaticamente satisfeitas. Esta fase de pré-atribuição reduz a quantidade de restrições do PPT e incorpora as disponibilidades e preferências dos tripulantes na programação.

A Figura 2 ilustra a representação de um cromossomo. Neste exemplo, ao tripulante 1 foram atribuídas as jornadas 19, 22, 40 e 47 nos dias 2, 3, 4 e 5, respectivamente. Além disso, o tripulante 1 está indisponível para trabalhar nos dias 1 e 7 e está livre para receber uma jornada no dia 6. Já o tripulante 4 não recebeu nenhuma atribuição.

|             |   | Dias |    |    |    |    |    |    |
|-------------|---|------|----|----|----|----|----|----|
|             |   | 1    | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  |
| Tripulantes | 1 | -1   | 19 | 22 | 40 | 47 |    | -1 |
|             | 2 | 5    | 13 | -1 | 33 |    | -1 | 62 |
|             | 3 | 1    | -1 | 21 |    | -1 | 50 | 61 |
|             | 4 |      |    |    | -1 | -1 |    |    |

**Figura 2:** Representação de um cromossomo

O custo de um cromossomo  $n$  é computado através da expressão 2, adaptada de Souai e Teghem (2008), e equivale à remuneração dos tripulantes mais os custos das jornadas atribuídas.

$$C_n = \sum_{k \in K} c_k y_k \quad (2)$$

em que  $K$ : conjunto de tripulantes;

$C_n$ : custo do cromossomo  $n$ ; e

$y_k$ : igual a 1 se o tripulante  $k$  for utilizado na solução  $n$ , e zero caso contrário.

A expressão 3 é utilizada para calcular o custo da escala atribuída a cada tripulante  $k \in K$ .

$$c_k = \alpha_1 + \max \left\{ 0, \left( \sum_{d \in D_k} t_d \right) - MG \right\} \times \alpha_2 + \sum_{d \in D_k} c_d \quad (3)$$

em que  $c_k$ : custo da escala atribuída ao tripulante  $k$ ;  
 $\alpha_1$ : remuneração fixa de um tripulante;  
 $D_k$ : conjunto de jornadas atribuídas ao tripulante  $k$ ;  
 $t_d$ : horas de voo da jornada  $d$ ;  
 $MG$ : horas de voo computadas na remuneração fixa de um tripulante (garantia mínima);  
 $\alpha_2$ : remuneração por cada hora de voo excedente à garantia mínima no mês; e  
 $c_d$ : custo da jornada  $d$ .

### 3.2.2. Geração da População Inicial

A geração da população inicial é realizada através de uma heurística construtiva, dividida em duas etapas, dada a complexidade de checagem de todas as restrições. Na primeira etapa, determina-se um conjunto de jornadas  $\bar{D}_j \subseteq D_j$ , para cada dia  $j \in J$ , com custo mínimo, que cubra todos os voos uma vez, onde  $D$  é o conjunto de todas as jornadas viáveis geradas na busca em profundidade e  $D_j \subseteq D$  é o conjunto de todas as jornadas viáveis do dia  $j \in J$ .

Para este propósito, adotou-se um modelo de programação linear inteira, baseado no problema de particionamento de conjuntos:

$$\bar{D}_j = \left\{ \begin{array}{l} \text{Min } \sum_{d \in D_j} c_d y_d \\ \text{s.a.} \\ \sum_{d \in D_j} a_{id} y_d = 1 \quad \forall i \in I_j \\ y_d \in \{0,1\} \quad \forall d \in D_j \end{array} \right\} \quad \forall j \in J \quad (4)$$

em que  $J$ : conjunto de dias do horizonte de planejamento;  
 $I_j$ : conjunto de voos a serem cobertos no dia  $j$  ( $I_j \subseteq I$ );  
 $a_{id}$ : igual a 1 se o voo  $i$  for coberto pela jornada  $d$ , e zero caso contrário; e  
 $y_d$ : igual a 1 se a jornada  $d$  for incluída no conjunto  $\bar{D}_j$ , e zero caso contrário.

Na segunda etapa, as jornadas de cada conjunto  $\bar{D}_j$  são atribuídas aos tripulantes disponíveis no dia  $j$ , considerando as seguintes regulamentações trabalhistas: intervalo mínimo entre jornadas (repouso), duração máxima das horas de voo e duração máxima do trabalho de cada tripulante. A Figura 3 apresenta o pseudocódigo da segunda etapa da heurística construtiva.

A heurística construtiva não garante a cobertura de todos os voos e, em casos específicos, como, por exemplo, para possibilitar o retorno de um tripulante à sua base domiciliar, é necessária a sobre-cobertura de voos. Com isso, a aptidão de um indivíduo  $n$ , com  $QVNC_n > 0$  ou  $QVSC_n > 0$ , onde  $QVNC_n$  é a quantidade de voos não cobertos no indivíduo  $n$

e  $QVSC_n$  a quantidade de voos sobre-cobertos no indivíduo  $n$ , é penalizada conforme descrito no item 3.2.3.

A ordem de seleção dos tripulantes, em cada iteração (passo 7 da Figura 3), influencia no balanceamento da distribuição de trabalho, conforme observado em Cabral *et al.* (2000). Dessa forma, adotou-se um método de seleção onde os tripulantes  $k \in K_j$  são, inicialmente, classificados em ordem crescente de horas de voo acumuladas e, em seguida, são selecionados sequencialmente para atribuição das jornadas.

**Função Segunda Etapa Heurística Construtiva ( )**

1. Seja  $K_j \subseteq K$  o conjunto de tripulantes disponíveis no dia  $j$ ;
  2. Seja  $I_j \subseteq I$  o conjunto de voos a serem cobertos no dia  $j$ ;
  3. Seja  $I_{dj}$  o conjunto de voos cobertos pela jornada  $d$  no dia  $j$ ;
  4. Seja  $D_j^k \subseteq \bar{D}_j$  o conjunto de jornadas que podem ser atribuídas ao tripulante  $k$  no dia  $j$ ;
  5. Para cada dia  $j \in J$  faça
  6.     Enquanto ( $K_j \neq \{\}$  e  $I_j \neq \{\}$ ) faça
  7.         Selecionar um tripulante  $k \in K_j$ ;
  8.         Determinar o conjunto  $D_j^k$ ;
  9.         Se ( $D_j^k \neq \{\}$ ) então
  10.             Selecionar uma jornada  $d \in D_j^k$  aleatoriamente;
  11.             Atribuir a jornada  $d$  ao tripulante  $k$ :  $a_{kj} \leftarrow d$ ;
  12.             Remover os voos cobertos pela jornada  $d$  do conjunto  $I_j$ :  $I_j \leftarrow I_j \setminus \{I_{dj}\}$ ;
  13.             Remover a jornada  $d$  do conjunto  $\bar{D}_j$ :  $\bar{D}_j \leftarrow \bar{D}_j \setminus \{d\}$ ;
  14.         Fim Se
  15.         Remover o tripulante  $k$  do conjunto  $K_j$ :  $K_j \leftarrow K_j \setminus \{k\}$ ;
  16.     Fim Enquanto
  17.     Atualizar a quantidade de voos não cobertos e voos sobre-cobertos no dia  $j \in J$ ;
  18. Fim Para
- Fim Função.**

**Figura 3:** Pseudocódigo da segunda etapa da heurística construtiva

**3.2.3. Função de Avaliação da Aptidão (Fitness)**

A função de avaliação da aptidão (*Fitness*) mede a qualidade de cada indivíduo da população. Os indivíduos com maior aptidão ou qualidade são selecionados para a recombinação e sobrevivência. A aptidão de um indivíduo  $n$  é definida através da expressão 5, proposta por Souai e Teghem (2008).

$$FA_n = \frac{CT_{\max} - CT_n}{CT_{\max}} \quad (5)$$

em que  $FA_n$ : função de aptidão do indivíduo  $n$ , onde  $FA_n \in [0,1]$ ;  
 $CT_n$ : custo total do indivíduo  $n$ ; e

$CT_{\max}$  : maior custo total da população corrente.

O custo total de um indivíduo  $n$  leva em consideração a penalidade relacionada aos voos não cobertos e aos voos sobre-cobertos, o custo do indivíduo e o balanceamento da distribuição de trabalho entre os tripulantes.

A expressão 6, adaptada de Souai e Teghem (2008), é utilizada para calcular o custo total de cada indivíduo.

$$CT_n = \beta_1 \times Pena_n + \beta_2 \times C_n + \sigma_n \quad (6)$$

em que  $CT_n$  : custo total do indivíduo  $n$ ;

$Pena_n$  : penalidade do indivíduo  $n$  relacionada aos voos não cobertos ou sobre-cobertos, dada por  $Pena_n = QVNC_n + QVSC_n$ ;

$C_n$  : custo do indivíduo  $n$ ; e

$\sigma_n$  : função de desvio padrão das horas de voo do indivíduo  $n$ .

Os parâmetros  $\beta_1$  e  $\beta_2$  devem ser definidos de forma adequada para minimizar hierarquicamente os três termos da expressão 6, ou seja, primeiro, a penalidade relacionada a não cobertura ou sobre-cobertura dos voos; a seguir, o custo dos tripulantes; e, por fim, o desvio padrão das horas de voo.

O valor do parâmetro  $\beta_1$  deve assegurar que  $\beta_1 \times Pena_n \gg C_n, \forall n$ . Com isso,  $\beta_1$  é calculado da seguinte forma: primeiro, determina-se o custo de uma jornada inativa, isto é, jornada em que o tripulante não realiza voos; em seguida, gera-se uma solução inviável, atribuindo a jornada inativa, em cada dia  $j \in J$ , a todos os tripulantes  $k \in K$ , supondo que não há dias livres; e, finalmente, o valor de  $\beta_1$  é definido pela expressão 7:

$$\beta_1 = c_{\max} \times |K| \quad (7)$$

em que  $c_{\max} = \alpha_1 + c_d \times |J|$ : custo máximo da escala inviável (limite superior) atribuída a um tripulante  $k$ .

O valor de  $\beta_2$  é determinado através da expressão 8:

$$\beta_2 = \begin{cases} \frac{A+B}{2} & \text{se } A \neq 0, \\ B & \text{se } A = 0. \end{cases} \quad (8)$$

em que  $A = \min_{n=1, \dots, N \text{ s.a. } C_n \neq 0} \left\{ \frac{\beta_1 \times Pena_n}{C_n} \right\}$  e  $B = \max_{n=1, \dots, N \text{ s.a. } C_n \neq 0} \left\{ \frac{\sigma_n}{C_n} \right\}$ .

#### 3.2.4. Operadores Genéticos

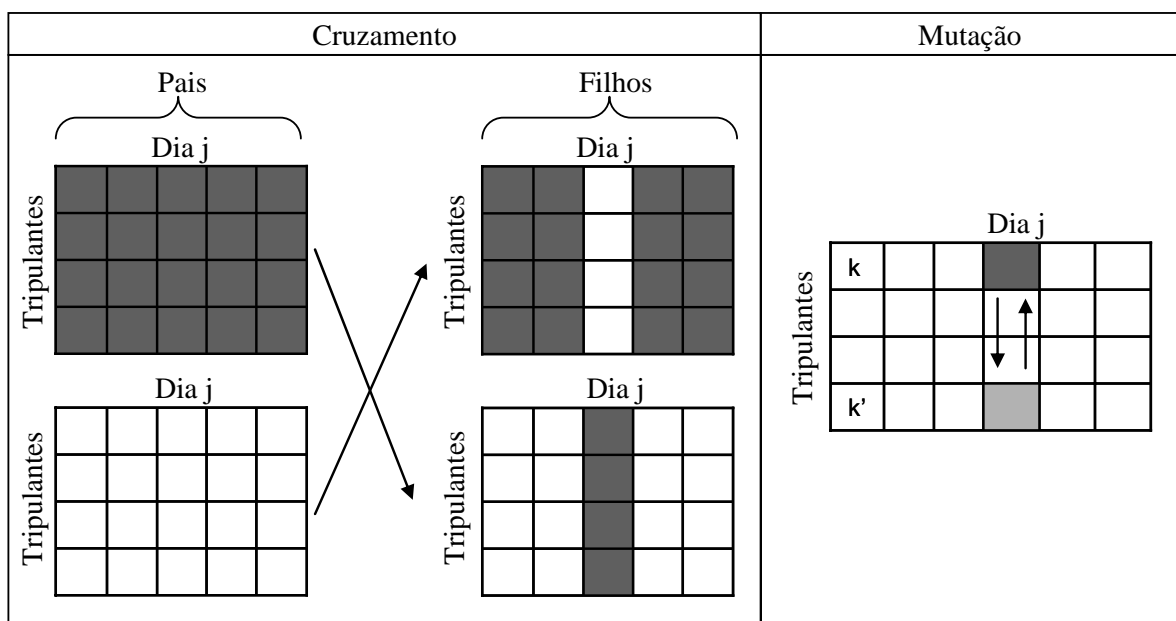
Os operadores genéticos do AGH são: seleção, cruzamento e mutação. A seleção dos dois indivíduos para aplicação do cruzamento é realizada através do método da roleta. Para tanto, cada indivíduo da população é associado a um número de casas da roleta, conforme sua aptidão. Em seguida, é realizado um sorteio entre zero e o somatório das aptidões da população corrente. O indivíduo associado à casa sorteada é selecionado.



O cruzamento recombina as informações genéticas dos indivíduos selecionados na roleta (pais), a fim de se obter dois novos indivíduos (filhos). Inicialmente, um dia  $j \in J$  é escolhido aleatoriamente. Em seguida, as informações deste dia são trocadas entre os dois pais, gerando dois filhos, que podem ser viáveis ou não. A viabilidade dos filhos é assegurada na heurística corretiva, descrita no item 3.2.5.

A mutação é aplicada em um dos dois descendentes gerados no cruzamento, com a probabilidade  $Pm$ . No início, seleciona-se aleatoriamente um descendente, um dia  $j \in J$  e dois tripulantes  $k$  e  $k'$  do conjunto  $K$ , onde  $a_{kj} \neq -1$  e  $a_{k'j} \neq -1$ . Em seguida, os genes  $a_{kj}$  e  $a_{k'j}$  são trocados.

A Figura 4 esboça a aplicação do cruzamento e da mutação nos indivíduos.



**Figura 4:** Esboço da aplicação do cruzamento e da mutação nos indivíduos

### 3.2.5. Heurística Corretiva

A heurística corretiva é aplicada aos descendentes inviáveis, gerados após o cruzamento ou mutação, visando à correção das atribuições de cada gene  $a_{kj}$  que possui uma jornada ou um dia livre incompatível com as jornadas ou atividades pré-atribuídas ao tripulante  $k$ . A Figura 5 apresenta o pseudocódigo da heurística corretiva.

### 3.2.6. Atualização da População

O processo de atualização da população ocorre no final de cada geração, onde os piores pais são substituídos pelos melhores descendentes. Um aspecto importante é evitar a ocorrência de indivíduos repetidos na população sobrevivente, a fim de garantir a diversidade da população e evitar a convergência prematura do AGH para um ótimo local. Dessa forma, durante o processo de substituição, comparam-se os atributos (penalidade, custo e desvio padrão) de cada descendente com os atributos dos outros indivíduos sobreviventes. Se for identificado um clone, isto é, um indivíduo igual ao descendente, a substituição não ocorre, independentemente da aptidão.

**Função Heurística Corretiva ( )**

1. Seja  $a_{kj}$  um gene inviável, com  $a_{kj} = d$  ou  $a_{kj} = 0$ ;
  2. Seja  $I_{kj}$  o conjunto de voos cobertos pela jornada  $d$  atribuída ao tripulante  $k$  no dia  $j$ ;
  3. Seja  $vnc_j$  o conjunto de voos não cobertos no dia  $j$ ;
  4. Seja  $vsc_j$  o conjunto de voos sobre-cobertos no dia  $j$ ;
  5. Seja  $V_{hc}$  o conjunto de voos a serem cobertos na heurística corretiva;
  6. Seja  $d_{kj} \in D_j$  a jornada viável que deve ser atribuída ao tripulante  $k$  no dia  $j$ ;
  7. Para cada gene  $a_{kj}$  inviável faça
  8. Gerar o conjunto  $V_{hc} : V_{hc} = vnc_j \cup I_{kj}$ ;
  9. Se ( $V_{hc} = \{ \}$ ) então
  10. Buscar a jornada  $d_{kj}$  que cobre a menor quantidade de voos no dia  $j$ ;
  11. Senão
  12. Buscar a jornada  $d_{kj}$  que cobre a maior quantidade de voos  $i \in V_{hc}$  e a menor quantidade de voos  $i \notin V_{hc}$ ;
  13. Fim Se
  14. Se ( $d_{kj} \neq 0$ ) então
  15. Inserir a jornada  $d_{kj} \in D_j$  no gene  $a_{kj}$ ;
  16. Senão
  17. Reinsere no gene  $a_{kj}$  a jornada  $d \in D_j$  removida no cruzamento ou mutação;
  18. Fim Se
  19. Atualizar os atributos do tripulante  $k$ , o conjunto de voos não cobertos no dia  $j$ :  
 $vnc_j \leftarrow V_{hc} \setminus \{V_{hc} \cap I_{kj}\}$  e o conjunto de voos sobre-cobertos no dia  $j$ :  $vsc_j \leftarrow I_{kj} \setminus \{V_{hc} \cap I_{kj}\}$ ;
  20. Fim Para
- Fim Função**

**Figura 5:** Pseudocódigo da heurística corretiva

#### 4. TESTES E APLICAÇÕES PRÁTICAS

O procedimento de geração das jornadas e o AGH foram implementados na linguagem C++, utilizando o compilador Microsoft Visual Studio C++ 6.0, e testados em um microcomputador PC Intel Core 2 Quad, 2,40 Ghz, com 2GB de RAM, sob o sistema operacional Microsoft Windows XP - Professional. O modelo matemático utilizado na primeira etapa da heurística construtiva foi resolvido através do pacote de programação linear ILOG CPLEX 11.0.

As instâncias de teste foram criadas com base em informações obtidas de uma empresa da aviação civil regional brasileira, contendo a malha aérea, sem informações dos tripulantes utilizados. As informações dos tripulantes foram geradas empiricamente, satisfazendo as restrições de folgas e período máximo fora da base domiciliar, de forma a simular uma situação real, contemplando apenas a programação dos pilotos. O mercado de operação da empresa e o tipo de aeronave utilizado definiram as regulamentações trabalhistas consideradas nos testes.

A Tabela 1 apresenta as informações das instâncias de teste e a Tabela 2 mostra as regulamentações consideradas na geração das jornadas e no AGH.

**Tabela 1:** Instâncias de teste

| Instância | Tipo de Aeronave | #Voos | Horizonte de Planejamento (em dias) | Período de Abrangência  |
|-----------|------------------|-------|-------------------------------------|-------------------------|
| MA1       | Turboélice       | 208   | 14                                  | 06/04/2008 a 19/04/2008 |
| MA2       | Turboélice       | 416   | 28                                  | 01/06/2008 a 28/06/2008 |

**Tabela 2:** Regras e regulamentações consideradas na geração das jornadas e no AGH

| Tipo de Aeronave                           | Turboélice | Duração da Jornada                             | 11h   |
|--|------------|--|-------|
| Tempo de Preparação ( <i>brief</i> )       | 30min      | Tempo de Parada dos Motores ( <i>debrief</i> ) | 30min |
| Horas de Voo por Jornada                   | 9h30min    | Pousos por Jornada                             | 9     |
| Intervalo Mínimo entre Voos ( $I_{\min}$ ) | 15min      | Intervalo Máximo entre Voos ( $I_{\max}$ )     | 4h    |
| Intervalo entre Jornadas (Repouso)         | 12h        | Limite de Voo Mensal                           | 100h  |
| Jornada de Trabalho Semanal                | 44h        | Limite de Voo Trimestral                       | 255h  |
| Jornada de Trabalho Mensal                 | 176h       | Limite de Voo Anual                            | 935h  |

Os parâmetros utilizados para calcular o custo das jornadas (expressão 1) e das escalas dos tripulantes (expressão 3) foram:  $\alpha = 2$ ,  $cp_c = 200$ ,  $\alpha_1 = 2000$ ,  $MG = 54h$  e  $\alpha_2 = 10$ . A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos na geração das jornadas, em que os tempos de processamento foram inferiores a 1 segundo.

**Tabela 3:** Resultados obtidos na geração das jornadas

| Instância | #Voos | Rede de Voos |       | Geração das Jornadas |           |
|-----------|-------|--------------|-------|----------------------|-----------|
|           |       | Nós          | Arcos | #Jornadas            | Tempo (s) |
| MA1       | 208   | 210          | 620   | 868                  | <1        |
| MA2       | 416   | 418          | 1.240 | 1.736                | <1        |

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos na aplicação da heurística construtiva (população inicial) e do AGH, com os seguintes parâmetros:  $N = 200$ ,  $Ger\_Max = 50.000$  e  $Pm = 0,10\%$ .

**Tabela 4:** Resultados obtidos na heurística construtiva e no AGH

| Heurística Construtiva |              |                         |                 |                              |           |
|------------------------|--------------|-------------------------|-----------------|------------------------------|-----------|
| Instância              | #Tripulantes | Penalidade ( $Pena_n$ ) | Custo ( $C_n$ ) | Desvio Padrão ( $\sigma_n$ ) | Tempo (s) |
| MA1                    | 8            | 0                       | 72.230          | 124,88                       | <1        |
| MA2                    | 10           | 3                       | 180.930         | 340,62                       | <1        |
| AGH                    |              |                         |                 |                              |           |
| Instância              | #Tripulantes | Penalidade ( $Pena_n$ ) | Custo ( $C_n$ ) | Desvio Padrão ( $\sigma_n$ ) | Tempo (s) |
| MA1                    | 8            | 0                       | 69.400          | 38,97                        | 149       |
| MA2                    | 11           | 0                       | 199.050         | 28,05                        | 258       |

A solução obtida na heurística construtiva para a instância MA2 não cobriu 3 voos previstos. As soluções obtidas no AGH melhoraram o balanceamento da distribuição de trabalho entre os tripulantes, sem ocasionar um aumento elevado no custo total da solução. Na instância MA1, em particular, houve melhoria no desvio padrão da solução e redução do custo.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto e aplicado, com sucesso, a duas instâncias associadas à operação de uma empresa aérea regional brasileira, um Algoritmo Genético Híbrido (AGH) para solução do Problema de Programação de Tripulantes (PPT) de forma integrada, ou seja, eliminando a necessidade de resolver inicialmente o Problema de Determinação das Viagens (PDV) e permitindo maior flexibilidade na atribuição das jornadas aos tripulantes, além da incorporação das preferências de folgas na solução, atendendo também às regulamentações brasileiras.

O AGH levou a soluções factíveis e eficientes para as instâncias consideradas, com tempos de processamento reduzidos (da ordem de 1 a 5 minutos).

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Laboratório de Planejamento e Operação de Transportes (LPT/EPUSP) pelo apoio à pesquisa realizada.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANAC (2008) *Lei do Aeronauta (7.183/84)*. Disponível em: <http://www.anac.gov.br/biblioteca/leis/lei7183%20.pdf>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2008. Agência Nacional de Aviação Civil, Brasília, DF.
- Andersson, E., E. Houses, N. Kohl e D. Wedelin (1998) Crew Pairing Optimization. In: Yu, G. (eds.) *Operations Research in Airline Industry*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Barnhart, C.; A. Cohn; E. Johnson; D. Klabjan; G. Nemhauser e P. Vance (2003) Airline Crew Scheduling. In: Hall, R. W. (eds.) *Handbook of Transportation Science*. Kluwer Scientific Publishers, Boston.
- Cabral, L. A. F.; M. J., Freitas; N. Maculan e R. C. V. Pontes (2000) An Heuristic Approach for Large scale Crew Scheduling Problems at Rio-Sul Airlines. *40<sup>th</sup> International Symposium of the AGIFORS*, Istanbul.
- Chang, S. C. (2002) A New Aircrew Scheduling Model for Short-Haul Routes. *Journal of Air Transport Management*, n. 8, p. 249–260.
- Cunha, C. B. (2006) *Contribuição à Modelagem de Problemas de Logística e Transportes*. Tese (Livre Docência), Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI/USP), São Paulo, SP.
- Gomes, W. P. e N. D. F. Gualda (2008) Otimização da Formação de Viagens no Processo de Alocação de Tripulantes a Aeronaves (*Crew Pairing Problem*). *Anais do XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Fortaleza, v. 1, p. 1010-1020.
- Gopalakrishnan, B. e E. Johnson (2005) Airline Crew Scheduling: State-of-the-art. *Annals of Operations Research*, v. 140, n. 2, p. 305–337.
- Guo, Y.; T. Mellouli; L. Suhl e M. P. Thiel (2006) A Partially Integrated Airline Crew Scheduling Approach with Time-Dependent Crew Capacities and Multiple Home Bases. *European Journal of Operational Research*, n. 171, v. 3, p. 1169–1181.
- Kohl, N. e S. E. Karisch (2004) Airline Crew Rostering: Problem Types, Modeling and Optimization. *Annals of Operations Research*, v. 127, p. 223–257.
- Mercier, A. e F. Soumis (2007) An Integrate Aircraft Routing, Crew Scheduling and Flight Retiming Model. *Computers and Operations Research*, v. 34, n. 8, p. 2251–2265.
- SNA (2009) *Convenção Coletiva de Trabalho – 2008/2010*. Disponível em: [http://www.aeronautas.org.br/convenc/ConvCol\\_2008-2010\\_AVReg.pdf](http://www.aeronautas.org.br/convenc/ConvCol_2008-2010_AVReg.pdf). Acesso em: 09 de março de 2009. Sindicato Nacional dos Aeronautas, Rio de Janeiro, RJ.
- Souai, N. e J. Teghem (2008) Genetic Algorithm Based Approach for the Integrated Airline Crew-Pairing and Rostering Problem. Artigo em Impressão, *doi: 10.1016/j.ejor.2007.10.065*.

---

Wagner de Paula Gomes (wagner.gomes@poli.usp.br)

Nicolau D. Fares Gualda (ngualda@usp.br)

Laboratório de Planejamento e Operação de Transportes (LPT/EPUSP)

Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Av. Prof. Almeida Prado, Trav 2, nº 83 – LPT: Sala 05 – São Paulo, SP, Brasil – CEP 05508-970.