



## UM MÉTODO PARA O PLANEJAMENTO DO ROTEAMENTO CONTINGENCIAL DE TRÁFEGO AÉREO

### CONTINGENCIAL AIR TRAFFIC ROUTING

**Leonardo Guerra de Rezende Guedes**

Professor Titular

Universidade Católica de Goiás

Departamento de Computação

Av. Universitária 1.440 - Setor Universitário - Goiânia - GO - CEP 74605-010

+55 62 8415-3747 leonardo.guedes@uol.com.br

**Eugênio Júlio Messala Cândido Carvalho**

Professor Assistente

Universidade Católica de Goiás

Departamento de Computação

Av. Universitária 1.440 - Setor Universitário - Goiânia - GO - CEP 74605-010

+55 62 8415-3747 eugenio@ucg.br

### RESUMO

Neste trabalho, considera-se o problema logístico de rotear as aeronaves de uma companhia para que esta possa ao longo do tempo voltar seus vôos aos horários definidos pela Agência Nacional de Aviação Civil - ANAC. Para tal é utilizada a representação em Redes de Petri a qual permite o controle do funcionamento dos vôos da companhia, sendo possível controlar o movimento dos aviões pela rede assim como o tempo do vôo. A construção dos planos necessários ao retorno dos horários da companhia sugere uma busca por seqüências de vôos sobre a Rede de Petri. A técnica a ser utilizada para ser feita esta busca são os Algoritmos Genéticos. Este artigo apresenta a aplicação conjunto de Redes de Petri e Algoritmos Genéticos na resolução do problema de roteamento contingencial de tráfego aéreo objetivando ao restauração das rotas e horários de vôos padrões.

**Palavras-chave:** Logística; Tráfego Aéreo; Roteamento de Tráfego; Redes de Petri; Algoritmos Genéticos.



## ABSTRACT

In this work it is considered the logistic problem of routing a company's aircrafts so that it can within an interval return its flights to the schedule defined by the National Agency of Civil Aviation - ANAC. The representation as Petri Networks allows the operational control of company's flights, because it is possible to get to control the airplanes moves from the for network as well as the flight time. The construction of the necessary plans to the return to company flight schedule suggests a search for a sequence of flights within the Petri Network. The technique to be used for this search is Genetic Algorithms. This article presents the joint use of Petri Networks technique and Genetic Algorithms in solving the cotangential routing problem of aero traffic aiming the restore of standard routes and flights schedule. Este artigo apresenta a aplicação conjunto de Redes de Petri e Algoritmos Genéticos na resolução do problema de roteamento contingencial de tráfego aéreo objetivando o retorno das rotas e horários de vôos aos padrões acordados com a ANAC.

**Key-words:** Logistic; Air Traffic; Traffic Routing; Petri Networks; Genetic algorithms.

## 1. INTRODUÇÃO

Os Vôos das companhias podem fugir dos seus horários rotineiros por diversos motivos: atrasando ou cancelando vôos ao longo do dia. A definição de novos planos de vôo e seus procedimentos relacionados ao tema são resolvidos por um operador humano com vasto conhecimento da área e das rotas da companhia. Este define o novo plano baseado único e exclusivamente nos conhecimentos adquiridos ao longo do tempo.

Porém com o avanço tecnológico e modernização dos controles aéreos e a competitividade entre as empresas aéreas faz-se necessário otimizar o tempo de retorno ao estado normal por parte da companhia, levando a um exercício de planejamento de vôo mais complexo.

Devido às características do problema de roteamento das aeronaves propõe-se utilizar a representação denominada Rede de Petri a qual permite representar os aeroportos, os vôos entre estes aeroportos e os aviões de dada companhia. A representação por matrizes, uma das representações utilizadas em Redes de Petri, permite o controle do funcionamento dos vôos da companhia, pois se consegue controlar o deslocamento dos aviões pela rede assim como o tempo do vôo. A técnica da árvore da alcançabilidade pode representar todas as seqüências de vôos que a companhia pode utilizar, entretanto, a construção desta árvore é de complexidade exponencial não sendo possível construí-la.



A construção dos planos necessários ao retorno dos horários da companhia significa uma busca por seqüências de vôos sobre a Rede de Petri. A técnica de inteligência computacional a ser utilizada para ser feita esta busca são os Algoritmos Genéticos.

## 2. TRÁFEGO AÉREO

As companhias aéreas por diversos motivos são, em alguns momentos do seu funcionamento cotidiano, obrigadas a cancelar ou atrasar vôos por mau tempo, aeroporto fechado, pane na aeronave, necessidade de manutenção, atraso no embarque e desembarque de passageiros, etc.. Estes pequenos problemas acarretam a necessidade de uma reorganização nos planos de vôos diários e de um roteamento dos aviões, para que estes possam voltar a suas rotas originais e aos planos de vôos descritos a Central de Planos de Vôo Repetidos.

A reorganização nos planos de vôo da companhia é atribuição de um operador humano, normalmente um comandante de aeronave, com muita experiência e conhecedor do HOTRAM (Horário de Transporte - é um documento que formaliza o direito de uma empresa aérea de realizar uma ou mais rotas, ou seja, o direito de decolar de um aeroporto em um determinado horário e pousar em outro em determinado horário). A companhia é quem deve reordenar os vôos regulares de tal forma que posteriormente suas aeronaves possam voltar ao estado normal de funcionamento (ICA 55-36, 2006). Assim, a HOTRAM de uma companhia aérea descreve as rotas e horários que esta possui e que é obrigada a cumprir regularmente, sendo avaliado constantemente seu desempenho quanto a atraso e regularidade. Estas companhias possuem seus planos de vôos regulares já descritos e entregues a Central de Planos de Vôo Repetidos em formulário próprio conforme descrito na norma ICA-100-11 (2006) emitida pelo Comando da Aeronáutica.

A companhia poderá realizar vôos extras, envolvendo ligação de localidades não servidas por linha aérea regular na sua HOTRAM, somente após autorização específica, emitida pela seção responsável pelo planejamento e mediante solicitação da empresa em conformidade com a norma IAC-1224 (2006). Contudo, vôo extra, em reforço de vôo previsto em HOTRAM, não depende de autorização prévia da Agência Nacional de Aviação Civil - ANAC, salvo nos casos em que a infra-estrutura aeronáutica assim o recomendar.



Utiliza-se o cenário descrito pela Figura 1 para exemplificação da solução ao problema de demanda contingencial pelo escoamento alternativo do tráfego aéreo, neste caso, modelado por Redes de Petri e com resolução dada pela técnica de algoritmo genético.

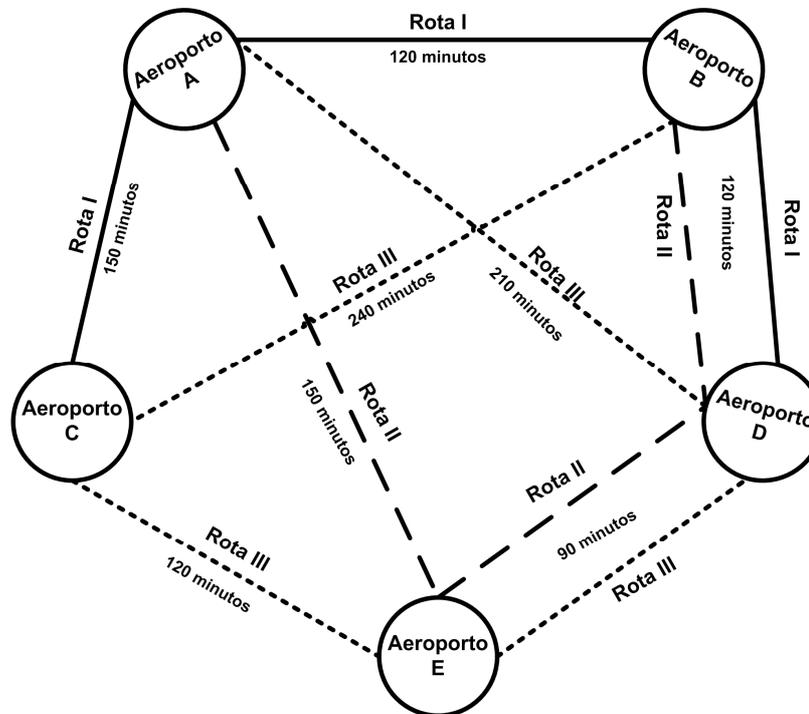


Figura 1: Representação de Rotas – Cenário para Aplicação.

**Fonte:** do Autor.

### 3. REDES DE PETRI

Diversas técnicas utilizadas para especificação e modelagem matemática de sistemas têm sido propostas. Muitas técnicas são baseadas em modelos, em álgebra de processos ou em lógica e em redes. Destaca-se neste trabalho a Rede de Petri que consiste em uma técnica de especificação de sistemas que possibilita uma representação matemática além de possuir mecanismos de análise poderosos que permitem a verificação de propriedades e a verificação da coerência do sistema especificado (Murata, 1989).

Rede de Petri é uma ferramenta de modelagem matemática e gráfica, aplicada na representação de sistemas. É uma ferramenta tipicamente utilizada para descrever e estudar sistemas de processamento de informação que se caracterizam por serem concorrentes, assíncronos, distribuídos, paralelos, não-determinísticos, e/ou estocásticos. Como uma ferramenta matemática, é possível obter equações de estado, equações algébricas e outros





Neste trabalho utilizaremos a representação de Redes de Petri através de matrizes, possibilitando a análise de propriedades comportamentais e estruturais as quais serão vistas posteriormente (Maciel, 1996). A estrutura das Redes de Petri representada por matrizes são estruturadas em uma quádrupla formada pelo conjunto dos lugares, o conjunto das transições, a matriz de pré-condição e a matriz de pós-condição. Assim, define-se a Estrutura das Redes de Petri definida em Matrizes (David, 1992) como uma quádrupla,  $RP(P,T,Pre,Pos)$ , onde:

- $P = \{p_0, p_1, p_2, \dots, p_n\}$  é um conjunto finito e não vazio de lugares;
- $T = \{t_0, t_1, t_2, \dots, t_m\}$  é um conjunto finito e não vazio de transições;
- Com  $P \cap T = \Phi$ , isto é, os conjuntos  $P$  e  $T$  são disjuntos;
- $Pre_{nxm}$  é a matriz de pré-condição ou matriz dos arcos de entrada  $\forall t_j \in T$ ;
- $Pos_{nxm}$  é a matriz de pós-condição ou matriz dos arcos de saída  $\forall t_j \in T$ .

Redes de Petri é um tipo particular de grafo orientado, junto com um estado inicial - chamado de marcação inicial - RPM. Assim, seja  $P$  o conjunto de lugares de uma rede  $RP$ . Define-se marcação como uma função que mapeia o conjunto de lugares  $P$  a inteiros não-negativos (Maciel, 1996).

Um *token* (ficha ou marca) é um conceito primitivo em Redes de Petri, assim como os lugares, as transições e os arcos. Os *tokens* são informações atribuídas aos lugares. Os *tokens* são utilizados nestas redes para simular as atividades dinâmicas e concorrentes dos sistemas que estas representam. Sendo que, o número e a distribuição de marcas nos lugares correspondem à marcação da rede para um determinado momento.

O comportamento de muitos sistemas pode ser descrito em termos de sistemas de estado e suas mudanças. A fim de simular a dinâmica do comportamento do sistema, um estado ou marcação na Rede de Petri é mudado de acordo com as seguintes regras de transição (disparo):

- Uma transição  $t$  é dita habilitada se cada lugar de entrada  $p$  de  $t$  é marcado com no mínimo  $Pre(p,t)$  *tokens*, onde  $Pre(p,t)$  é o valor do arco de  $p$  para  $t$ ;
- Uma transição habilitada pode ou não ser disparada;
- O disparo de uma transição  $t$  remove  $Pre(p,t)$  *tokens* de cada lugar de entrada  $p$  de  $t$  e adiciona  $Pos(p,t)$  *tokens* em cada lugar de saída  $p$  de  $t$ , onde  $Pos(p,t)$  é o valor do arco de  $t$  para  $p$ .

Segundo Murata (1989), um dos métodos de análise de uma Rede de Petri é o método da árvore de cobertura ou método da alcançabilidade, que envolve a enumeração de



todas as marcações alcançáveis ou cobertas. O método da árvore de cobertura deveria ser aplicável em todas as classes de redes, porém está limitado as Redes de Petri pequenas devido à complexidade da explosão do espaço de estado das marcações alcançáveis.

Dada uma Rede de Petri marcada RPM (RP,M0), iniciando na marcação inicial M0, pode-se alcançar diversas marcações para um grande número de transições potencialmente habilitadas. Além disso, a partir de cada nova marcação é possível obter outras marcações na rede. Este processo resulta na construção de uma árvore que representa as marcações da rede. Os nós representam as marcações geradas a partir de M0 (raiz da árvore) e cada arco representa a transição disparada, que transforma uma marcação na outra.

Segundo David (1992), uma Rede de Petri é dita ser T-Tempo, quando um tempo  $d_j$ , possivelmente de valor zero, é associado a cada transição  $t_j$  da rede. O disparo de uma transição não é mais instantâneo, pois possui uma duração de tempo  $d_j$ . Essa associação do tempo a uma transição é importante nas representações em que a transição é uma atividade, com início e fim, e não um evento instantâneo. Logo, uma Rede de Petri T-Tempo é um par (RPM,Tempo) tal que: RPM é uma Rede de Petri marcada e Tempo é uma função tal que, Tempo:  $P \rightarrow Q^+$ , Tempo( $t_j$ ) =  $d_j$  = tempo associado com a transição  $t_j$ .

Assim, como principio de funcionamento, um *token* pode ter dois estados: ele pode estar reservado para o disparo de uma transição  $t_j$  ou pode estar livre (não-reservado), isto é apresentado na Figura 2.12. Quando a transição  $t_1$  é disparada, um *token* é depositado no lugar  $p_1$ , tornando a transição  $t_2$  habilitada. A qualquer instante pode-se decidir por disparar  $t_2$ . Quando se decide pelo disparo, o *token* é requerido e é então reservado. Após a reserva do *token* o relógio é disparado, ao término do tempo  $d_2$  a transição  $t_2$  é efetivamente disparada. O *token* reservado para o disparo é então removido do lugar  $p_1$  e um *token* livre (não-reservado) é depositado em  $p_2$ . Para qualquer instante de tempo  $t$ , a marcação  $M$  da rede é a soma de duas marcações,  $M_r$  e  $M_l$ , tal que  $M_r$  é a marcação dada pelos *tokens* reservados e  $M_l$  é a marcação dada pelos *tokens* livres (não-reservados). E uma transição  $t$  está habilitada para a marcação  $M = M_r + M_l$  se ela está habilitada para a marcação  $M_l$ .

#### 4. ALGORITMOS GENÉTICOS

Os Algoritmos Genéticos são métodos de busca por soluções em um grande espaço de soluções candidatas. Quando se busca a solução ótima em um espaço de soluções



candidatas, nem todas as soluções candidatas possíveis podem ser inicialmente identificadas. O algoritmo genético é um método usado para achar uma solução subótima examinando somente uma pequena fração de todas as possíveis soluções. Um algoritmo genético, para um problema particular deve ter os seguintes componentes (Michalewicz, 1992):

- Uma representação genética para as potenciais soluções do problema;
- Um meio de criar uma população inicial de potenciais soluções;
- Uma função de avaliação, que represente o ambiente natural e avalie as soluções nos termos de sua adaptação;
- Operadores genéticos que modifiquem a composição dos descendentes;
- Valores para os vários parâmetros utilizados pelos algoritmos genéticos (tamanho da população, comprimento do cromossomo, número de gerações, probabilidade de aplicação dos operadores genéticos, etc.).

A população em um algoritmo genético é um conjunto de cromossomos. Os cromossomos na representação binária têm a forma de uma seqüência de bits, na representação real é uma seqüência de números reais. Cada posição do cromossomo é um gene o qual pode assumir dois valores possíveis de alelos 0 ou 1, sendo que na representação real o gene pode assumir valores de alelos no intervalo de  $[-\infty, \infty]$ . Pode-se pensar o cromossomo como uma solução no espaço de busca de soluções candidatas.

A população inicial é a primeira população utilizada em um algoritmo genético, ela pode ser gerada aleatoriamente ou de forma induzida (a indução da população depende do problema). O algoritmo genético processa a população de cromossomos, sucessivamente, ele substitui a população por uma nova. O algoritmo genético requer uma função de adaptação que determina um valor de adaptação para cada um dos cromossomos na população corrente. Esta função de adaptação é utilizada para avaliar o cromossomo, e assim calcular a quão perto esta solução está da ótima. A descrição do "Algoritmo Genético Padrão" apresenta os seguintes passos (Mitchell, 1996):

- Inicia-se este processo gerando-se aleatoriamente uma população  $P(t)$ , com  $n$  cromossomos de comprimento  $l$ , que representam as soluções candidatas para o problema a ser solucionado;
- Calcula-se o valor de adaptação de cada cromossomo  $c$  da população, através da função de adaptação. Este cálculo do valor de adaptação deve ser repetido a cada nova geração de descendentes;



- Seleccionam-se, da população  $P(t-1)$ , os cromossomos a serem mantidos na população  $P(t)$ , utilizando-se os valores da função de adaptação;
- Aplicam-se os operadores genéticos – cruzamento, mutação e reprodução.

### Aplicação: Escoamento de Tráfego Aéreo

Para esse trabalho, o gene representa uma única transição da rede e seu valor é um inteiro no intervalo de  $[0, \dots, m-1]$  onde  $m$  é o número de transições na rede - Vôo.

O cromossomo é uma lista contendo em cada posição um gene. Um cromossomo  $C$  é uma seqüência  $C = [c_0, c_1, \dots, c_s]$  tal que  $c_i \in \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ . Neste trabalho, o cromossomo é então uma seqüência de transições disparáveis ou não e representa um possível plano de vôo a ser usado no retorno ao HOTRAM. Portanto, aplicamos o método ao cenário da Tabela 1.

Tabela 1 – Horários das Rotas da Companhia. Fonte: do Autor.

ROTA I		ROTA II		ROTA III	
Aeroporto	Horário	Aeroporto	Horário	Aeroporto	Horário
C	06h00min	B	06h00min	A	06h00min
A	08h30min	D	08h00min	D	09h30min
B	10h30min	E	09h30min	E	11h00min
D	12h30min	A	12h00min	C	13h00min
B	14h30min	E	14h30min	B	17h00min
A	16h30min	D	16h00min	C	21h00min
C	19h00min	B	18h00min	E	23h00min
-	-	-	-	D	00h30min
-	-	-	-	A	04h00min

A população de cromossomos constitui um conjunto finito de cromossomos e representa o conjunto de soluções candidatas. O tamanho da população é um dado empírico. Ela representa todas as seqüências (soluções validas ou não), que o algoritmo gerará. A população inicial é gerada de forma induzida por meio do algoritmo descrito a seguir:

*Passo 1) Leia a marcação inicial da rede;*

*Passo 2) Enquanto não é identificado o fim do cromossomo, faça:*

*Passo 2.1) Calcula-se todas as transições disparáveis para esta marcação;*

*Passo 2.2) Seleciona-se aleatoriamente uma das transições disparáveis;*

*Passo 2.3) Dispara-se a transição selecionada resultando em nova marcação na rede;*



A Função de Adaptação da população de cromossomos é dada por:

$$F_{população} = \frac{\text{tamnho da população}}{\sum_{i=0} \text{Vetor\_Media}_i}$$

Sendo que o processo de seleção da próxima população é calculado por:

$$PS\_Cromossomo_i = \frac{1 - \text{Vetor\_Menor\_Diferença}_i / F_{população}}{\text{Tamanho\_população} - 1}$$

A função de Adaptação é utilizada para avaliar cada cromossomo da população gerado pelo algoritmo genético descrito a seguir:

***Passo 1) Enquanto não é identificado o fim do cromossomo, faça:***

***Passo 1.1) Verifica-se se no gene do cromossomo se a transição esta habilitada ao disparo conforme marcação da rede;***

***Passo 1.2) Se transição habilitada;***

***Passo 1.2.1) Acumula-se o tempo de vôo vinculado à transição;***

***Passo 1.2.2) Dispara-se a transição e calcula-se a nova marcação encontrada;***

***Passo 1.2.3) Com base na marcação encontra-se o aeroporto;***

***Passo 1.2.4) Calculam-se as diferenças entre o tempo de vôo acumulado e o tempo definido na Tabela 1 dos horários de vôo para cada uma das três rotas;***

***Passo 1.2.5) Para cada diferença encontrada checar se esta é menor que a menor diferença existente por rota, caso seja verdadeiro substituir o valor;***

***Passo 1.3) Se transição não habilitada***

***Passo 1.3.1) Indicar fim do cromossomo;***

***Passo 2) Calcular a média das diferenças e armazenar no VETOR\_MÉDIA;***

## **5. PROPOSTA PARA ROTEAMENTO CONTINGENCIAL DE TRÁFEGO AÉREO**

Em conformidade com as técnicas de Redes de Petri, apresenta-se agora o grafo gerado para as rotas descritas na Figura 3. Os lugares representam os aeroportos e as transições representam as interligações entre os aeroportos, os vôos.



Essa estrutura de Rede de Petri (Figura 3) representada por matriz consiste numa quádrupla,  $RP(P,T,Pré,Pos)$ , onde:

- $P=\{A(p_0),B(p_1), C(p_2), D(p_3), E(p_4)\}$  representa os aeroportos atendidos; e
- $T=\{TAB(t_0),TBA(t_1),TAC(t_2),TCA(t_3),TAD(t_4),TDA(t_5),TAE(t_6),TEA(t_7),TBC(t_8),TCB(t_9),TBD(t_{10}),TDB(t_{11}),TCE(t_{12}),TEC(t_{13}),TDE(t_{14}),TED(t_{15})\}$  representa os vôos entre os aeroportos;

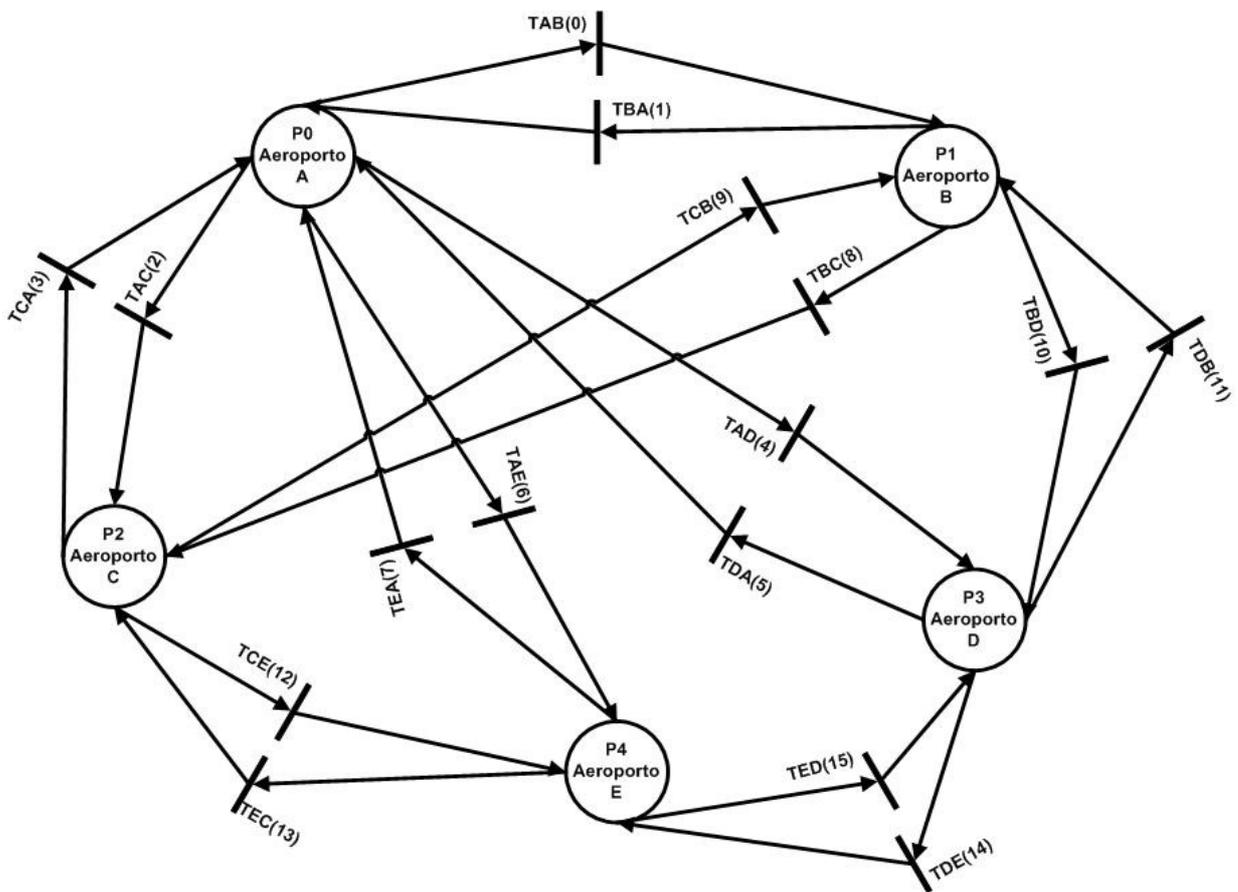


Figura 3: Rede de Petri das rotas aéreas – representação gráfica.

Fonte: do Autor.



A matriz Pré representa a matriz de Pré-condição da rede dada por:

$$\text{Pré} = \begin{matrix} & t_0 & t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 & t_6 & t_7 & t_8 & t_9 & t_{10} & t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} & t_{15} \\ \begin{matrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{matrix} & \left| \begin{array}{cccccccccccccccc} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{array} \right. \end{matrix}$$

A matriz Pós representa a matriz de Pós-condição da rede dada por:

$$\text{Pós} = \begin{matrix} & t_0 & t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 & t_6 & t_7 & t_8 & t_9 & t_{10} & t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} & t_{15} \\ \begin{matrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{matrix} & \left| \begin{array}{cccccccccccccccc} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{array} \right. \end{matrix}$$

A marcação da Rede de Petri apresentada acima dependerá das posições onde se encontram os aviões da companhia. Assim, a marcação representa a distribuição dos aviões da companhia pelos aeroportos onde esta opera. A marcação  $M_0 = \{1,1,1,0,0\}$  apresenta a distribuição dos três aviões da companhia pelos aeroportos A,B e C respectivamente. Portanto a Rede de Petri Marcada é definida por um uma dupla  $RPM = (RP, M_0)$ , onde RP é a estrutura da rede acima representada e  $M_0$  é dado por  $M_0 = \{1,1,1,0,0\}$ , sendo que o tempo neste problema estará vinculado às transições, pois estas representam o vôo entre os aeroportos.

O tempo de vôo a ser representado pela transição possui a seguinte composição:

Embarque	Taxiamento	Decolagem	Vôo	Aterrissagem	Taxiamento	Desembarque
----------	------------	-----------	-----	--------------	------------	-------------

A Rede de Petri T-Tempo para a rede da Figura 3 é um dupla  $RPT_{tempo}(RPM, VT)$ , onde RPM é a estrutura da Rede de Petri Marcada e VT é o vetor tempo dado por:

$$VT = \{120, 120, 150, 150, 210, 210, 150, 150, 240, 240, 120, 120, 120, 120, 90, 90\}.$$



Com a Rede de Petri representando o problema, o objetivo fundamental será definir quais as seqüências de transições, vôos, deverão ser disparadas para que a companhia retorne seus aviões às suas rotas originais e horários originais, definidas no HOTRAM, com o menor tempo possível. Cada seqüência de transições representa um plano de vôo possível de ser executado pela empresa para retornar ao estado normal.

A Árvore de Cobertura ou Alcançabilidade é então a enumeração de todas as marcações alcançáveis na rede, através do disparo sucessivo das transições desta, obtendo assim todas as seqüências de disparos possíveis da rede. Isto representaria todos os planos de vôos possíveis de serem utilizados no planejamento do retorno ao HOTRAM. Porém a construção desta árvore de alcançabilidade ou cobertura da rede tem complexidade exponencial em tempo e espaço (Murata, 1989).

Portanto para solucionar o problema de encontrar seqüências disparáveis na rede, rotas de vôos, faz-se necessário o uso de métodos de busca próprios para grandes espaços de busca, pois como apresentado acima o espaço formado pelas seqüências disparáveis na rede é muito grande.

### **Análise dos Resultados**

O algoritmo genético acima foi aplicado com os seguintes critérios:

- Tamanho do cromossomo: 10 genes;
- Tamanho da população: 120 cromossomos;
- Probabilidade de cruzamento: 0.7 a 0.9;
- Probabilidade de mutação: 0.01 a 0.03;
- Número de Gerações: 100
- Marcação inicial da rede: {1,1,1,0,0};
- Tempo inicial do vôo: {08h00min, 12h00min, 16h00min}



As seqüências de transições, os planos de vôo, resultantes do Algoritmo Genético padrão apresentado no item anterior será apresentada agora:

Tabela 2 – Resultados do Algoritmo para Rota I.

Nº	Seqüência										Função Adaptação	Rota	Transição
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	9	1	4	5	2	9	8	3	0	10	90	0	9
2	9	8	9	10	5	4	5	4	5	0	0	0	6
3	8	9	10	14	7	4	14	15	11	1	0	0	6
4	0	8	9	1	2	9	10	14	15	14	0	0	6
5	4	11	1	4	14	13	12	13	9	10	0	0	8
6	0	1	0	10	14	7	4	5	4	11	30	0	9

Fonte: do Autor.

Na tabela 2 são apresentados os resultados do algoritmo para os planos de vôo que podem atender a rota I. Os melhores resultados obtidos foram as seqüências 2, 3, 4 e 5 pois oferecem uma diferença entre o plano de vôo planejado e o planos das rotas originais com o menor valor de diferença no tempo. O menor tempo encontrado para retornar ao estado estacionário.

Tabela 3 – Resultados do Algoritmo para Rota II

Nº	Seqüência										Função Adaptação	Rota	Transição
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	9	10	14	15	5	2	3	2	9	1	60	1	3
2	3	0	8	9	10	5	2	9	8	12	0	1	9
3	9	10	14	15	14	7	6	13	9	1	30	1	8
4	12	13	12	13	9	8	3	2	12	13	30	1	2
5	10	14	15	14	7	2	9	1	0	8	0	1	9
6	10	14	15	11	1	0	1	2	12	15	30	1	8
7	8	3	0	8	3	4	5	0	1	6	30	1	2
8	8	9	1	2	3	6	13	9	1	0	60	1	9
9	4	5	6	13	9	1	2	3	6	15	30	1	2
10	6	7	2	3	0	8	9	1	2	9	60	1	9
11	2	12	13	9	10	11	10	11	10	11	30	1	9

Fonte: do Autor.

Na tabela 3 são apresentados os resultados do algoritmo para os planos de vôo que podem atender a rota II. Os melhores resultados obtidos foram as seqüências 2 e 5 pois



oferecem a menor diferença entre o plano de vôo planejado e o planos das rotas originais. Ou seja, o menor tempo encontrado para retornar ao estado estacionário.

Tabela 4 – Resultados do Algoritmo para Rota III

Nº	Seqüência										Função Adaptação	Rota	Transição
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	9	8	3	4	11	1	0	1	2	12	0	2	7
2	12	13	3	2	12	15	11	10	14	15	0	2	7
3	12	7	2	9	10	14	15	11	10	5	30	2	5
4	3	4	14	13	3	4	5	4	5	0	60	2	6
5	1	4	14	13	9	8	9	1	0	10	0	2	7
6	1	0	10	11	1	4	11	1	4	5	30	2	5
7	1	6	7	2	12	13	9	8	12	15	60	2	6
8	1	2	9	8	12	15	5	2	3	0	30	2	7
9	10	11	10	5	0	1	2	12	15	11	0	2	3
10	2	9	10	11	10	14	7	0	8	9	30	2	5
11	2	3	0	1	0	1	0	1	2	9	60	2	6
12	0	8	12	7	0	1	4	14	13	12	30	2	7
13	0	8	3	6	7	6	7	2	3	4	0	2	3

Fonte: do Autor.

Na tabela 4 são apresentados os resultados do algoritmo para os planos de vôo que podem atender a rota III. Neste os melhores resultados obtidos foram as seqüências 1, 2, 5, 9 e 13, pois oferecem a menor diferença entre o plano de vôo planejado e o planos das rotas originais. Porém, para estes resultados, as seqüências 9 e 13 necessitam de um número menor de vôos para obter um bom resultado. Ou seja, o menor tempo encontrado para retornar ao estado estacionário.

## 6. CONCLUSÃO

O problema aqui considerado é a proposição de novos planos de vôo que possam atender a companhia aérea no seu retorno ao HOTRAN. Por problemas como: cancelamento ou atraso de vôos por mau tempo, aeroporto fechado, pane nas aeronaves, necessidade de manutenção, atraso no embarque e desembarque de passageiros, etc.; levam a companhia a ter seus horários rotineiros de vôos alterados.



A Rede de Petri apresentou-se como uma robusta técnica para a representação do grafo de Rotas aéreas. A técnica de Redes de Petri com representação por matriz possui um rígido controle no funcionamento da Rede. Assim sendo, é possível representar todos os vôos e seus tempos necessários pela Rede.

A identificação de todas as seqüências de transições disparáveis da rede, que representam os planos de vôo, poderia ser encontrada através da construção da árvore de cobertura ou alcançabilidade da rede. Entretanto, a complexidade de tal tarefa é exponencial em tempo e espaço. Neste caso, para solucionar o problema da identificação das seqüências, utilizou-se a técnica de algoritmos genéticos a qual procura soluções em grandes espaços de busca. Portanto, tanto a representação do problema por Redes de Petri como a utilização de algoritmos genéticos para buscar as soluções necessárias ao problema apresentaram resultados possíveis e subótimos.

Este trabalho levou em conta somente o tempo necessário para retornar ao estado originais das rotas e dos horários dos vôos. Não leva em conta o custo e os passageiros da companhia, podendo estes elementos ser agregados a outro modelo de Rede de Petri (Redes de Petri com custo) que os representa. Na busca de soluções para estes problemas podem-se utilizar outras técnicas de busca além da técnica de algoritmo genético.

## REFERENCIAS

ICA 55-36. **Autorização de Vôo No Espaço Aéreo Brasileiro**. Comando da Aeronáutica: Estado-Maior. 2006.

ICA 100-11. **Instrução Do Comando da Aeronáutica**. Autorização de Vôo No Espaço Aéreo Brasileiro. 2006.

ICA 1224; **Normas Para Alterações Em Vôos Regulares e Realização de Vôos Não – Regulares**. Comando da Aeronáutica Estado-Maior, 2006.

DAVID, René & Alla, Hassane, **Petri Nets And Grafct – Tools For Modelling Discrete Event Systems**. Prentice Hall, 1992.

MACIEL, Paulo R.M.; Lins, Rafael D. & Cunha, Paulo R.F., **Introdução Às Redes de Petri e Aplicações**. Campinas: Instituto de Computação, Unicamp, 1996.

MICHALEWICZ, Zbigniew. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolutions Programs**. Springer, 1996.



MITCHELL, Melanie, **An Introduction to Genetic Algorithms**. A Bradford Book, The Mit Press, Cambridge, Massachusetts, 1996.

MURATA, T., **Petri Nets: Properties, Analysis and Applications**, Proceedings Of The Ieee. Vol 77, N°. 4, April, 1989.

PETRI, C.A., **Fundamentals of A Theory of Asynchronous Information Flow**, In Proc. Ifip. Congress 62, Pp. 386-390, 1963.

PETRI, C.A., **Kommunikation Mit Automaten**. Bonn: Institut Für Instrumentelle Mathematik. Schriften Des Iim Nr. 3, 1962. Also, English Translation, "Communication With Automata." New York: Griffiss Air Force Base. Tech. Rep. Radctr-65-377, Vol. 1, Suppl. 1, 1966.

**Artigo recebido em 2007 e aprovado para publicação em 2008**