

## REESTABELECIMENTO DE TRÁFEGO AÉREO: APLICAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO NA SOLUÇÃO DE REDES DE PETRI

Leonardo Guerra de Rezende Guedes<sup>1,2</sup>, Eugênio Júlio Messala Cândido Carvalho<sup>1</sup> e Leandro Galdino de Oliveira<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Computação, Universidade Católica de Goiás, CEP 74605-010, Goiânia, GO

<sup>2</sup>Escola de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Campus I, CEP 74605-010, Goiânia, GO

<sup>3</sup>Instituto de Informática, Universidade Federal de Goiás, Campus II, 74605-010, Goiânia, GO

[lguedes@eeec.ufg.br](mailto:lguedes@eeec.ufg.br); [eugenio@ucg.br](mailto:eugenio@ucg.br); [leandroluis.inf@gmail.com](mailto:leandroluis.inf@gmail.com)

**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 utilizado 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 a restauração das rotas e horários de vôos padrões.

**Palavras-chave** – Previsão de Carga, SVM, Leucemias, Apgar, Seleção de Atributos

### 1. Introdução

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, 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 de planos de vôo de uma 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 [1-3]. 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 emitida pelo Comando da Aeronáutica [2].

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 [3]. 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.

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.

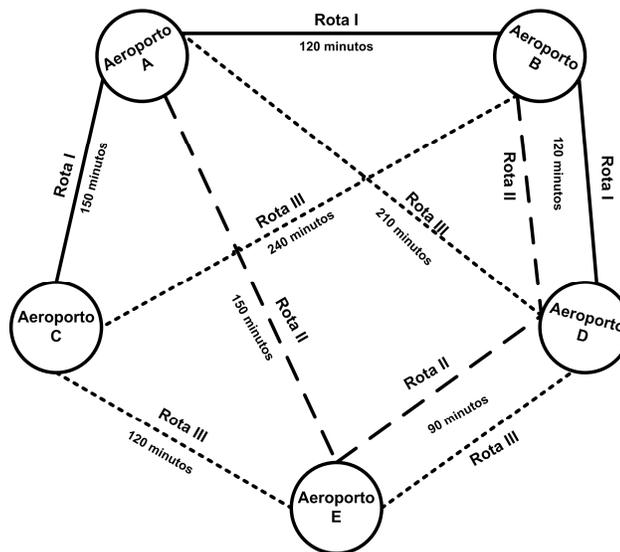
A construção dos planos necessários ao retorno dos horários da companhia significa uma busca por seqüências de vôos sobre a Rede de Petri. A técnica de inteligência computacional a ser utilizada para ser feita esta busca são os Algoritmos Genéticos.

## 2. Metodologia

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 [4-6].

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 modelos matemáticos. Como ferramenta gráfica, a Rede de Petri pode ser utilizada para auxiliar a comunicação visual de maneira análoga a fluxogramas, diagramas de blocos e/ou redes.

Utilizaremos 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.

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 [7]. Assim, define-se a Estrutura das Redes de Petri definida em Matrizes como uma quádrupla,  $RP(P,T,Pre,Pos)$ , onde:

- $P = \{p_0, p_1, p_2, \dots, p_n\}$  = conjunto finito e não vazio de lugares;
- $T = \{t_0, t_1, t_2, \dots, t_m\}$  = conjunto finito e não vazio de transições;

- Com  $P \cap T = \Phi$ , os conjuntos P e T são disjuntos;
- $Pre_{nxm}$  = matriz de pré-condição (arcos de entrada  $\forall t_j \in T$ );
- $Pos_{nxm}$  = matriz de pós-condição (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 [8].

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): - a 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; a 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 [4], 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,  $M_0$ ), iniciando na marcação inicial  $M_0$ , 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  $M_0$  (raiz da árvore) e cada arco representa a transição disparada, que transforma uma marcação na outra.

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 [5]. 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 princípio 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). 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  $M_l$ .

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 e deve ter os seguintes componentes [8]:

- 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, 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  $[-\infty$  e,  $\infty]$ . 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 [9]:

- 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;
- Selecionam-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.

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.**

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:

$$F_{população} = \frac{\text{tamanho da população}}{\sum_{i=0} \text{Vetor\_Media}_i} \quad (1)$$

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

$$PS\_Cromoss_i = \frac{1 - \text{Vetor\_Menor\_Dif}_i / F_{população}}{\text{Tamanho\_população} - 1} \quad (2)$$

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;*

### 3. Resultados

Em conformidade com as técnicas de Redes de Petri, apresenta-se agora o grafo gerado para as rotas descritas na Figura 2. Os lugares representam os aeroportos e as transições representam as interligações entre os aeroportos, os vôos.

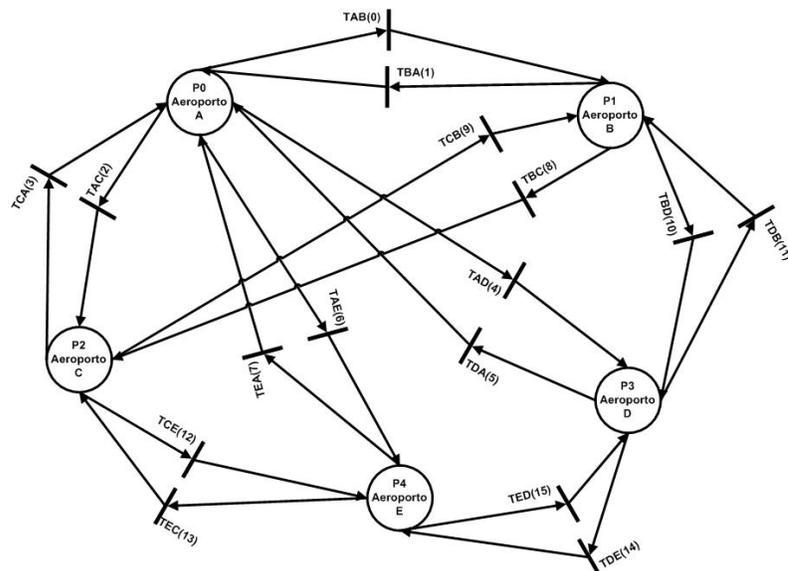


Figura 2 - Rede de Petri das rotas aéreas.

Essa estrutura de Rede de Petri (Figura 2) representada por matriz consiste numa quádrupla,  $RP(P,T,Pré,Pos)$ , onde:

- $P=\{A(p0),B(p1), C(p2), D(p3), E(p4)\}$  representa os aeroportos atendidos; e
- $T=\{TAB(t0),TBA(t1),TAC(t2),TCA(t3),TAD(t4),TDA(t5),TA(t6),TEA(t7),TBC(t8),TCB(t9), TBD(t10),TDB(t11),TCE(t12),TEC(t13),TDE(t14),TED(t15)\}$  são vôos entre aeroportos;

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

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

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

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

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  $M0=\{1,1,1,0,0\}$  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  $RPM = (RP,M0)$ , onde  $RP$  é a estrutura da rede acima representada e  $M0$  é dado por  $M0=\{1,1,1,0,0\}$ , sendo que o tempo neste problema estará vinculado às transições, pois estas representam o vôo entre aeroportos.

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

<b>Embarque</b>	<b>Taxiamento</b>	<b>Decolagem</b>	<b>Vôo</b>
<b>Aterrissagem</b>	<b>Taxiamento</b>	<b>Desembarque</b>	

A Rede de Petri T-Tempo para a rede é um dupla  $RPTtempo(RPM,VT)$ , 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 para se 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. Porém a construção desta árvore de alcançabilidade tem complexidade exponencial em tempo e espaço [4].

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

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 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

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.

**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

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 9 e 13 necessitam de um número menor de vôos para um bom resultado.

#### 4. Discussão

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.

#### 5. Conclusão

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.

Algoritmos genéticos em geral apresentam lenta convergência. Entretanto, não foi objeto deste trabalho a determinação do tempo necessário para a otimização do tempo de vôo através da metodologia proposta. O tempo de convergência do algoritmo proposto se torna compatível com a aplicação à medida que se estima que o possível órgão ou empresa usuário desta ferramenta possui capacidade suficiente para disponibilizar recurso computacional requerido à sua necessidade.

Este trabalho levou em conta somente o tempo necessário para retornar ao estado original 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.

**Agradecimentos:** Os autores agradecem a valiosa colaboração do Eng<sup>o</sup>. Piero Martelli, Diretor do Departamento de Computação da UCG, que viabilizou o acesso a dados de tráfego aéreo. Parte deste trabalho foi realizada com o fomento a projeto de pesquisa pela FAPEG.

**Referências:**

- [1] ICA 55-36. Autorização de Vôo no Espaço Aéreo Brasileiro. **Comando da Aeronáutica**, 2006.
- [2] ICA 100-11. Autorização de Vôo no Espaço Aéreo Brasileiro. **Comando da Aeronáutica**, 2006.
- [3] ICA 1224; Normas Para Alterações Em Vôos Regulares e Realização de Vôos Não – Regulares. **Comando da Aeronáutica** Estado-Maior, 2006.
- [4] R. David , H. Alla, **Petri Nets And Grafcet – Tools For Modelling Discrete Event Systems**. Prentice Hall, 1992.
- [5] P. R. M. Maciel, et al., **Introdução Às Redes de Petri e Aplicações**. Campinas: Instituto de Computação, Unicamp, 1996.
- [6] Z. Michalewicz, **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolutions Programs**. Springer, 1996.
- [7] M. Mitchell, **An Introduction to Genetic Algorithms**. A Bradford Book, The Mit Press, Cambridge, Massachusetts, 1996.
- [8] T. Murata, Petri Nets: **Properties, Analysis and Applications**, **Proceedings Of The Ieee**. Vol 77, N<sup>o</sup>. 4, April, 1989.
- [9] C. A. Petri, **Fundamentals of A Theory of Asynchronous Information Flow**, In Proc. Ifip. Congress 62, Pp. 386-390, 1963.
- [10] C. A. Petri, **Communication With Automata**. New York: Griffiss Air Force Base. Tech. Rep. Radctr-65-377, Vol. 1, Suppl. 1, 1966.