

ARTIGO

UM MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O PLANEJAMENTO DE TRÁFEGO AÉREO

Eduardo Quaglia
Manoel André Neto

Amazon Technologies Company

Douglas Targa

Fundação Aplicações de Tecnologias Críticas - ATECH

RESUMO

Este trabalho descreve um modelo de programação inteira aplicado ao Controle de Tráfego Aéreo com o objetivo de otimizar a ocupação do espaço aéreo em uma área e horários predeterminados. O modelo busca balancear o uso de aeródromos e alocação de setores do espaço aéreo controlado. Este balanceamento atende a demanda de tráfego, não excedendo a capacidade de controle dos slots e dos setores, dando prioridade aos vôos regulares, militares e VIP. Para tanto, o modelo divide o intervalo de tempo determinado pelos horários inicial e final em subintervalos regulares pequenos e analisa o carregamento da rede em cada um desses subintervalos.

ABSTRACT

This paper describes an integer program model applied to Air Traffic Control, which optimizes the air space occupation in a predetermined area and time. The model aims to balance the slot and sector allocation of the air space being controlled. It shall support the traffic demand without exceeding its control capacity and prioritizing regular, military and VIP flights. Therefore, the model divides the amount of time between the start and final moments into small regular subintervals and analyses the network load in each of the subintervals.

1. INTRODUÇÃO

Os últimos anos apresentaram consideráveis taxas de crescimento do movimento aéreo a nível mundial. Este fato tem demandado a adoção de medidas que equilibrem o crescimento com a infraestrutura presente. O crescimento da demanda de tráfego está exigindo maior esforço dos órgãos de controle para a manutenção de níveis de segurança necessários. As restrições impostas pelos órgãos de controle, mesmo que localizadas, quando aplicada durante a realização do vôo aumentam o tempo de percurso e por decorrência o custo operacional.

O procedimento natural para combater o congestionamento seria aumentar a capacidade da malha aeroviária através de soluções alternativas tais como a construção de novos aeroportos e ampliação dos já existentes. No entanto, seja qual for a solução adotada, esse é um processo lento e que demanda grandes investimentos e esforços políticos.

Em situações extremas, o desbalanceamento da demanda/capacidade não pode ser resolvido por ações de controle em vôo ou por uma adequação da capacidade do sistema. A solução nesse momento somente pode ser atingida pela redistribuição antecipada da demanda através da aplicação de uma política específica. Surge assim a necessidade de um órgão responsável pelo Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo que passa a interferir diretamente no processo, imputando medidas de regulação. Estas medidas podem ser do tipo (Odoni, 1987): atraso em solo; atraso em vôo (sobrevôo); reroteamento; regulação da razão de fluxo em nós específicos; restrição à velocidade da aeronave ou uma combinação delas.

A Figura 1 ilustra uma malha de tráfego aéreo representando um modelo idealizado do sistema ATC (*Air Traffic Control*). Definimos para o escopo deste trabalho que a malha é composta de subconjuntos de elementos do espaço aéreo, que são (Odoni, 1987): aeródromos, rotas, setores, nós, além de trechos de rota e nós de transferência, definidos a seguir:

- Nó: ponto de controle da rede que representa uma referência na malha. Indica a interceptação entre duas aerovias e/ou o ponto de comunicação entre dois setores (nó de transferência);
- Trecho: conexão entre dois nós contíguos na malha;
- Rota: caminho a ser percorrido por uma aeronave na malha de tráfego aéreo. Uma rota é constituída por uma série de trechos dispostos linearmente;
- Aeródromo: nó especial onde ocorre pousos e decolagens. Na maioria das vezes, representa a origem e destino das rotas;
- Setor: parcela da malha de tráfego de responsabilidade de um controlador de vôo específico. Um setor pode conter nós, trechos e aeródromos. Um setor contém nós de transferência que são o elo de comunicação com outros setores. Os setores também podem ser definidos por camadas em níveis de altura diferenciados (Figura 2).

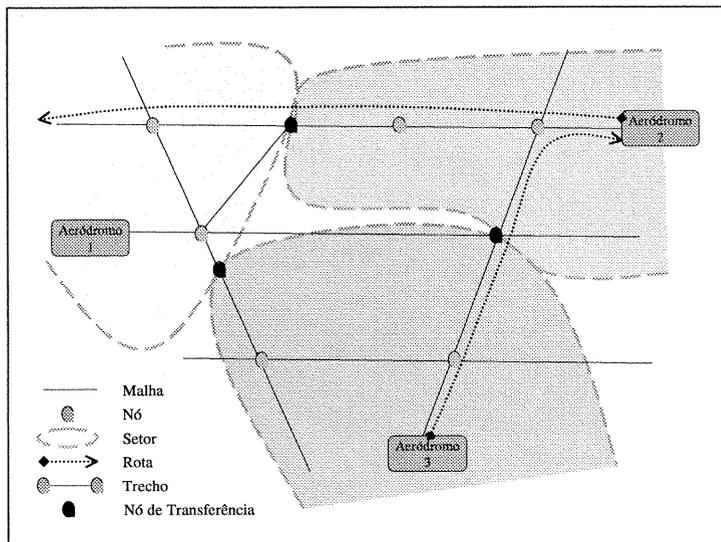


Figura 1: Modelo idealizado do sistema ATC (visto por cima)

Uma rota pode ter origem e/ou destino que não sejam aeródromos. Isto acontece quando uma aeronave utiliza a malha, mas a sua origem e/ou destino não fazem parte da mesma. Por exemplo, supor que esteja sendo preparado um plano para o espaço aéreo do Estado de São Paulo e o modelo deva considerar um vôo internacional partindo de Dallas em direção a cidade de São Paulo. Nesse caso, o aeroporto de Dallas não faz parte do espaço aéreo mencionado e a aeronave deve entrar na malha através de um nó de transferência.

Cada rota deve ser acompanhada de um custo relativo, que pode ser determinado pelo seu comprimento, tempo de percurso, consumo de combustível, etc. Alternativamente, este custo pode ser um valor que indique a prioridade de vôo entre as aeronaves. Por exemplo, numa ordem decrescente de importância: vôo de missão presidencial – custo 1, vôos regulares de aeronaves grandes – custo 2, vôos regulares de aeronaves pequenas – custo 3, outras aeronaves – custo 4.

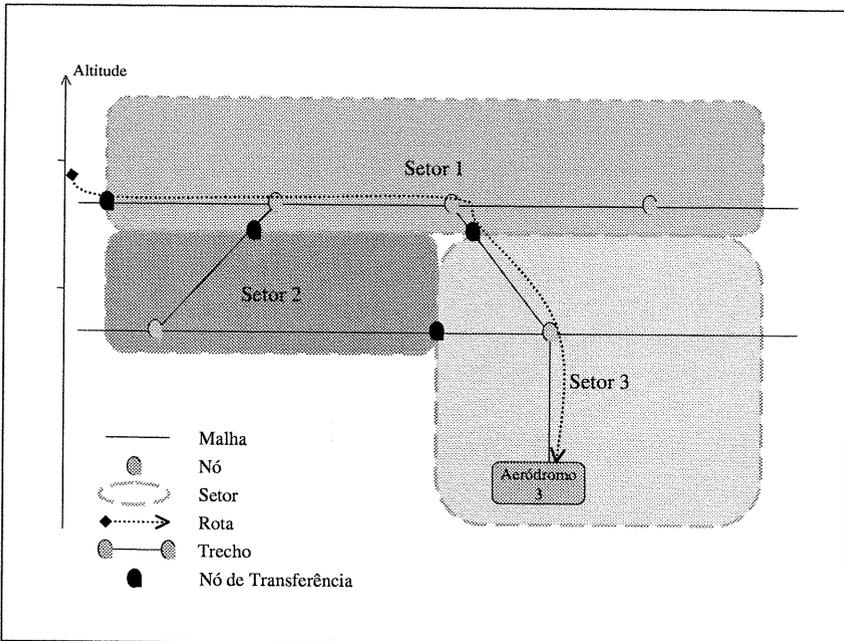


Figura 2: Setorização por altitude (visão lateral)

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Diante do cenário apresentado, este trabalho propõe um modelo de otimização, baseado em programação inteira, para balancear a demanda de tráfego aéreo com a capacidade de controle dos diferentes elementos da malha aeroviária.

2.1. Dados do problema

Dados de entrada do modelo:

- As aeronaves que tem a intenção de sobrevoar a rede num determinado período de tempo;
- As opções de rotas oferecidas para cada uma das aeronaves;
- Custo de utilização da rota;
- Capacidade de controle de cada nó;
- Capacidade de controle de cada setor;
- Capacidade de controle de cada trecho;
- Capacidade de decolagem e pouso em cada aeródromo;
- Subdivisão do período de tempo em intervalos regulares.

Como resultado o modelo oferece uma ou mais soluções. Cada solução é composta de:

- Seleção de uma rota para cada aeronave do problema;
- Valor de custo para o plano, representando a soma dos custos de cada rota escolhida;

- Carregamento de cada setor, nó e trecho, por intervalo de tempo;
- O número de pousos e decolagens em cada aeródromo, por intervalo de tempo.

Cada aeronave deve receber ao menos uma rota referência (custo 0) para o sobrevôo na rede, além de um conjunto de rotas opcionais, definidas pelo órgão de gestão, com custos diferenciados. Esta rota referência seria a mais desejada para participar da solução do problema, por exemplo a rota solicitada pelo operador do voo. No caso de infactibilidade na solução de custo 0, o sistema deve buscar a solução alternativa mais interessante.

2.2. O modelo

O modelamento do problema é apresentado na Formulação (1). A função objetivo busca minimizar a soma dos custos do uso das rotas candidatas. A primeira restrição indica que deve ser escolhida apenas uma rota por aeronave. As restrições 2 a 6 indicam respectivamente a necessidade de respeitar as capacidades de controle dos setores, nós, trechos, pouso e decolagem dos aeródromos, todas por intervalo de tempo. A última restrição indica que as rotas são representadas por variáveis inteiras binárias.

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar } \sum_{(i,j) \in R} C_i X_{ij} \\
 & \text{sujeito a :} \\
 & \sum_{i \in A} X_{ij} = 1 \quad \forall j \\
 & \sum_{(i,j) \in RS_{kl}} X_{ij} \leq S_{kl} \quad \forall k \quad \forall l \\
 & \sum_{(i,j) \in RN_{kl}} X_{ij} \leq N_{kl} \quad \forall k \quad \forall l \\
 & \sum_{(i,j) \in RT_{kl}} X_{ij} \leq T_{kl} \quad \forall k \quad \forall l \\
 & \sum_{(i,j) \in RAP_{kl}} X_{ij} \leq AP_{kl} \quad \forall k \quad \forall l \\
 & \sum_{(i,j) \in RAD_{kl}} X_{ij} \leq AD_{kl} \quad \forall k \quad \forall l \\
 & X_{ij} = 0/1 \quad \forall i \quad \forall j
 \end{aligned} \tag{1}$$

Onde,

- X_{ij}: Variável de decisão binária (0/1) – utilização da rota *i* pela aeronave *j*;
- C_{ij}: Constante real – custo da rota *i* quando utilizada pela aeronave *j*;
- (*i,j*): Par rota/aeronave – uma rota *i* utilizada pela aeronave *j*;
- R: Conjunto dos pares rota/aeronave, incluindo as rotas alternativas;
- A: Conjunto das aeronaves;
- S_{kl}: Número máximo de aeronaves controladas no setor *k* no intervalo *l*;
- RS_{kl}: Conjunto dos pares rota/aeronave controladas no setor *k* no intervalo *l*;
- N_{kl}: Número máximo de aeronaves controladas no nó *k* no intervalo *l*;
- RN_{kl}: Conjunto dos pares rota/aeronave que utilizam o nó *k* no intervalo *l*;
- T_{kl}: Número máximo de aeronaves que utilizam o trecho *k* no intervalo *l*;
- RT_{kl}: Conjunto dos pares rota/aeronave – aeronave que utiliza o trecho *k* no intervalo *l*;
- Ap_{kl}: Número máximo de aeronaves pousando no aeródromo *k* no intervalo *l*;
- RAP_{kl}: Conjunto dos pares rota/aeronave – aeronave pousa no aeródromo *k* no intervalo *l*;
- Ad_{kl}: Número máximo de aeronaves decolando do aeródromo *k* no intervalo *l*;
- RAD_{kl}: Conjunto de pares rota/aeronave – aeronave decola do aeródromo *k* no intervalo *l*;

O modelo suporta a inclusão de novas restrições, como capacidade de estacionamento no aeródromo, capacidade diferenciada do trecho por tipo de aeronave, etc.

2.3. Estudo de caso

Foi preparado um ensaio de pequenas dimensões para demonstrar a funcionalidade do modelo. Trata-se de uma malha de 9 nós, 12 trechos, 2 setores e 5 aeródromos (Figura 3). Foram selecionadas 10

aeronaves (Tabela 1) e construídas 24 diferentes rotas (Tabela 4) cujos comprimentos foram calculados a partir das soma das distâncias dos trechos que as compreendem, distâncias estas apresentadas na Tabela 2.

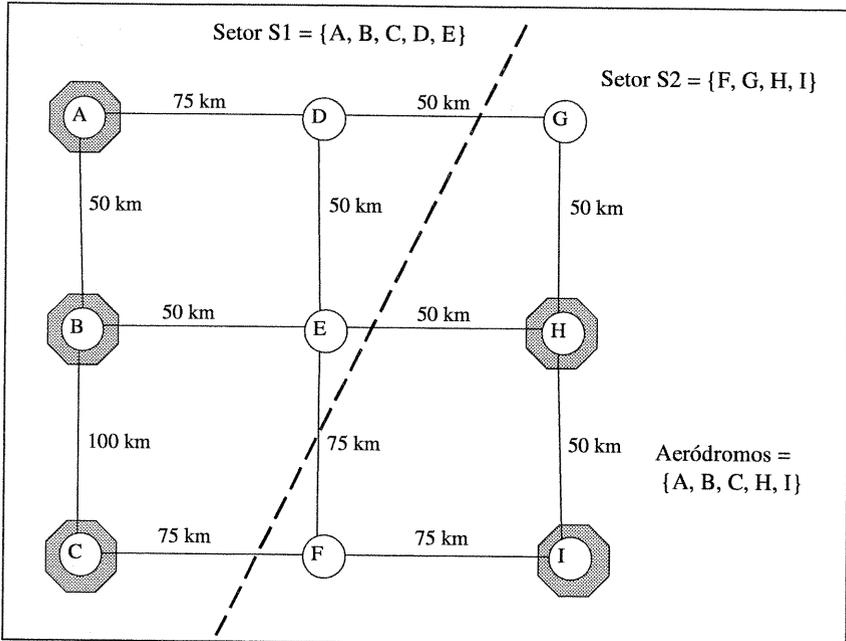


Figura 3: Rede com 9 nós

Tabela 1: Aeronave

Aeronave	Vel (NM/knot)	Origem	Destino
1	100	A	H
2	200	A	I
3	200	A	C
4	200	A	C
5	200	A	C
6	300	B	H
7	300	B	H
8	300	B	I
9	400	B	I
10	400	B	I

As rotas mais curtas foram eleitas as rotas de referência (custo 0). Para o cálculo do custo das rotas opcionais, foi definido que cada rota teria custo igual a subtração do seu comprimento pelo comprimento da rota de referência de mesma origem e destino. Exemplificando, a Tabela 4 mostra que a rota 1 tem o comprimento mais curto para a viagem do nó A para H, que é 150, e custo = $150 - 150 = 0$, enquanto a rota 2, que também vai de A para H, tem comprimento 175 e custo = $175 - 150 = 25$.

Note na Tabela 2 que a distância entre um nó e ele mesmo é diferente de zero; isto significa a distância que uma aeronave percorre quando estiver fazendo um sobrevôo.

Tabela 2: Distância e capacidade entre nós

	A		B		C		D		E		F		G		H		I		
	Dist	Cap																	
A	10	7	50	8			75	9											
B	50	8	10	7	100	9			50	8									
C			100	10	10	7					75	9							
D	75	9					10	7	50	8			50	8					
E			50	8			50	8	10	7	75	9			50	8			
F					75	9			75	9	10	7					75	9	
G							50	8					10	7	50	8			
H									50	8			50	8	10	7	50	8	
I											75	9			50	8	10	7	

Dist = distância; Cap = capacidade.

Tabela 3: Setores

Setor	Nós				
	A	B	C	D	E
1					
2	F	G	H	I	

Foram geradas 45 variáveis de decisão representando as alternativas de rota para cada aeronave. A Tabela 5 apresenta as variáveis de decisão, seus custos e o horário de partida escolhido para cada uma das rotas que representa. O "X" inicial indica uma variável de decisão, o primeiro índice da variável indica a rota escolhida e o segundo índice indica a aeronave. Por exemplo, X2_1 indica que a rota 2 é uma opção para a aeronave 1. Através do horário de partida, da velocidade da aeronave (Tabela 1) e da distância entre os pontos

da rota (Tabela 2), é possível determinar o horário esperado da aeronave em cada nó da rota e o tempo de percurso para cada trecho.

Tabela 4: Rotas

Rota	Distância (NM)	Custo	Nó								
1	150	0	A	B	E	H					
2	175	25	A	D	G	H					
3	175	25	A	D	E	H					
4	300	150	A	B	E	F	I	H			
5	350	200	A	B	C	F	I	H			
6	200	0	A	B	E	H	I				
7	225	25	A	D	G	H	I				
8	225	25	A	D	E	H	I				
9	275	75	A	D	E	F	I				
10	300	100	A	B	C	F	I				
11	425	225	A	D	E	B	C	F	I		
12	150	0	A	B	C						
13	275	125	A	D	E	F	C				
14	275	125	A	D	E	B	C				
15	375	225	A	D	G	H	I	F	C		
16	100	0	B	E	H						
17	200	100	B	E	D	G	H				
18	225	125	B	A	D	G	H				
19	250	150	B	E	F	I	H				
20	300	200	B	C	F	I	H				
21	150	0	B	E	H	I					
22	200	50	B	E	F	I					
23	250	100	B	C	F	I					
24	275	125	B	A	D	G	H	I			

A Tabela 2, Tabela 6 e Tabela 7 apresentam respectivamente os valores das capacidades de controle dos trechos, dos setores e dos nós, além das capacidades de pouso e decolagem dos aeródromos. O modelo considera que esses valores de capacidade são constantes para todo o período de tempo escolhido.

Tabela 5: Variáveis de decisão

Rota/ aeronave	Custo	Partida	Rota/ aeronave	Custo	Partida	Rota/ aeronave	Custo	Partida
X1_1	0	0:02:00	X12_4	0	0:17:00	X18_7	125	0:43:20
X2_1	25	1:02:00	X13_4	125	0:32:00	X19_7	150	1:23:20
X3_1	25	1:22:00	X14_4	125	1:02:00	X20_7	200	0:30:00
X4_1	150	0:02:00	X15_4	225	0:02:00	X21_8	0	0:54:00
X5_1	200	0:02:00	X12_5	0	0:45:00	X22_8	50	0:46:00
X6_2	0	0:32:00	X13_5	125	1:00:00	X23_8	100	0:35:20
X7_2	25	1:22:00	X14_5	125	1:30:00	X24_8	125	1:10:00
X8_2	25	0:42:00	X15_5	225	0:30:00	X21_9	0	0:48:00
X9_2	75	0:02:00	X16_6	0	0:38:00	X22_9	50	0:42:00
X10_2	100	0:02:00	X17_6	100	0:40:00	X23_9	100	0:34:00
X11_2	225	0:02:00	X18_6	125	0:43:20	X24_9	125	1:00:00
X12_3	0	0:17:00	X19_6	150	1:23:20	X21_10	0	1:08:00
X13_3	125	0:32:00	X20_6	200	0:30:00	X22_10	50	1:02:00
X14_3	125	1:02:00	X16_7	0	0:38:00	X23_10	100	0:54:00
X15_3	225	0:02:00	X17_7	100	0:40:00	X24_10	125	1:20:00

Tabela 6: Capacidade de setor

Setor	Capacidade
1	10
2	9

Tabela 7: Capacidade de nó, pouso e decolagem

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Nó	8	8	8	7	7	7	7	8	8
Decolagem	7	7	7					7	7
Pouso	7	7	7					7	7

Tabela 8: Intervalo de tempo

Início	Fim	Intervalo	Ajuste
0:00:00	6:00:00	0:10:00	0:01:00

A Tabela 8 apresenta o horário inicial e final do plano, o tamanho dos intervalos e um fator de ajuste. O modelo em questão analisa o carregamento da rede (carregamento de cada nó, trecho, setor e aeródromo) em cada intervalo de tempo, considerando o ajuste proposto. O ajuste diminui o valor inicial do intervalo e aumenta o

valor final do mesmo. Dessa forma, o plano do exemplo é iniciado as 0:00:00 (0 horas, 0 minutos, 0 segundos), terminado as 6:00:00, tempo este que é subdividido em 36 intervalos de 12 minutos que se sobrepõem nas pontas:

Intervalo 1:	0:00:00 -> 0:11:00,
Intervalo 2:	0:09:00 -> 0:21:00,
Intervalo 3:	0:19:00 -> 0:31:00,
...	
Intervalo 35:	5:39:00 -> 5:51:00,
Intervalo 36:	5:49:00 -> 6:01:00.

Assim, na análise de carregamento, supor uma aeronave prevista de terminar de sobrevoar o trecho AB às 0:20:00 e iniciar o trecho BE no mesmo horário. Estariam sendo acumulados carregamentos para o nó B e para os trechos AB e BE nos intervalos 2 e 3. Caso a mesma aeronave estivesse terminando de sobrevoar o trecho AB às 0:18:00, estariam sendo acumulados carregamentos no intervalo 2 para o nó B e os trechos AB e BE, porém o acúmulo no intervalo 3 seria apenas para o trecho BE.

A sobreposição criada pelos ajustes evita situações como: uma aeronave chegando no nó A às 0:19:55 não acumulando carregamento neste nó, e outra partindo às 0:20:00 acumulando carregamento. Apesar dos tempos serem praticamente os mesmos, as duas aeronaves seriam tratadas como se não estivessem no mesmo nó ao mesmo tempo.

2.4. Análise dos resultados do estudo de caso

A precisão do resultado será tão maior quanto menor for o valor do intervalo adotado, porém uma precisão maior indica maior carga de processamento. Quanto ao ajuste, não há indicação de qual a influência do seu valor na precisão do resultado. O valor de ajuste deve ser determinado pelo *expert* em controle de fluxo de tráfego aéreo em função da experiência e dos resultados esperados. Porém, variação nesse valor não necessariamente implica em variação na quantidade de processamento.

O modelo foi processado com os valores das tabelas apresentadas. Todos os valores de capacidades eram altos, portanto a solução obtida obteve custo 0 e as variáveis escolhidas foram as rotas de referência (custo 0), como mostra a primeira linha da Tabela 9. Em função desse resultado, foi possível verificar o comportamento da rede quanto ao carregamento de seus nós, trechos, setores e aeródromos. Novos casos foram processados, agora limitando uma das capacidades ("Limitação" – Tabela 9), tendo como referência o maior valor de carregamento obtido, dentre todos os intervalos, no resultado de custo zero ("Carregamento máximo no custo zero" – Tabela 9).

Tabela 9: Resultados para a rede de 9 nós

Carregamento Máximo no Custo Zero	Limitação	Solução		
		Custo	Rotas	
	Nenhuma	0	X1_1 X6_2 X12_3 X12_4 X12_5	X16_6 X16_7 X21_8 X21_9 X21_10
Carregamento do nó E = 4	Capacidade do nó E = 0	600	X2_1 X7_2 X12_3 X12_4 X12_5	X18_6 X18_7 X23_8 X23_9 X23_10
Carregamento de decolagem no aeródromo A = 2	Capacidade de decolagem no aeródromo A = 1	150	X3_1 X6_2 X14_3 X12_4 X12_5	X16_6 X16_7 X21_8 X21_9 X21_10
Carregamento de pouso no aeródromo I = 2	Capacidade de pouso no aeródromo I = 1	75	X1_1 X8_2 X12_3 X12_4 X12_5	X16_6 X16_7 X21_8 X21_9 X22_10
Carregamento do setor 1 = 9	Capacidade do setor 1 = 7	50	X3_1 X7_2 X12_3 X12_4 X12_5	X16_6 X16_7 X21_8 X21_9 X21_10
Carregamento do trecho BE = 5	Capacidade do trecho BE = 3	50	X3_1 X8_2 X12_3 X12_4 X12_5	X16_6 X16_7 X21_8 X21_9 X21_10

Apesar do número relativamente alto de variáveis inteiras (45), o processamento deste problema teve tempo de duração desprezível para todos os casos. O processamento se deu em sistema Unix, máquina HP-UX. O software resolvidor de programação linear inteira mista utilizado foi o shareware "lp_solve" (http://sal.kachinatech.com/B/3/LP_SOLVE.html). Dada a pequena dimensão do caso escolhido, esse resolvidor ofereceu resultados corretos para o problema.

2.5. Aplicação do modelo num sistema de planejamento de tráfego aéreo

A motivação da criação do modelo apresentado foi auxiliar a tarefa de redistribuição antecipada da demanda de tráfego aéreo. A Figura 4 apresenta uma proposta de fluxo para aplicação deste modelo. Os dados de entrada são preparados com o auxílio de ferramentas automáticas e georeferenciadas e com auxílio do banco de dados, de acordo com as disponibilidades e necessidades. Os dados de entrada são aplicados ao modelo gerando a formulação do problema, que por sua vez é processado no resolvidor de programação inteira, gerando um conjunto de soluções. Os resultados podem ser tratados, armazenados e apresentados graficamente em uma apresentação georeferenciada.

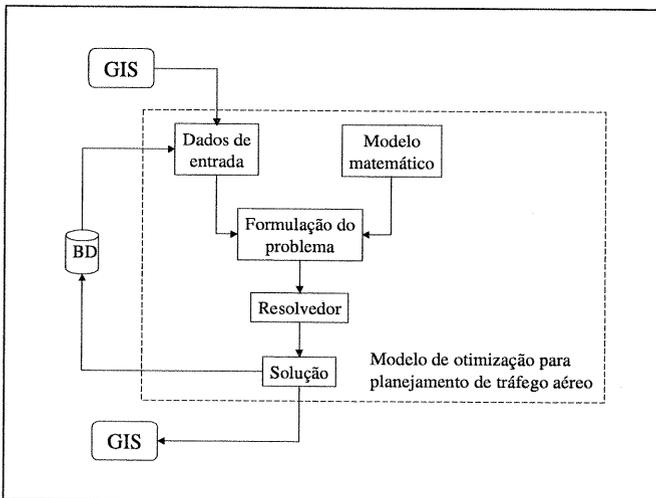


Figura 4: Modelo de otimização

Há a possibilidade desse processo se tornar demasiado custoso computacionalmente em função do número de aeronaves, alternativas de rotas e número de nós da rede. Não foi possível ainda determinar o custo computacional deste processo, porém espera-se que, em geral, o número de aeronaves que necessite de rotas alternativas seja pequeno, se comparado com o número total de aeronaves do problema, diminuindo este perigo.

Estratégias para contornar o problema de custo computacional seriam:

- Calcular as n primeiras soluções factíveis que tenham custo acima de um patamar preestabelecido, ao invés de calcular as n melhores soluções. Usualmente em problemas de programação inteira mista, o tempo de processamento para a busca das primeiras soluções factíveis é bastante inferior a busca da melhor solução (solução ótima), podendo o custo de tais soluções ser próximo ao da solução ótima.
- Intervir no processo de busca do software resolvidor. O modelo criado indica que percorrer a árvore de busca por nível é mais vantajoso do que por profundidade.
- Planejar uma heurística que solucione pedaços da rede, diminuindo o número de opções antes de solucionar o todo. Essa estratégia deve diminuir o tempo de processamento, mas como toda solução heurística, não há garantia de obtenção da solução ótima.
- Processar o modelo em etapas. Numa primeira etapa, seriam liberadas apenas as rotas alternativas para as aeronaves de menor prioridade e as outras aeronaves entrariam apenas com as rotas de referência (custo 0). Uma heurística determinaria, em função da solução obtida, um grupo de alternativas a serem eliminadas do problema. Na segunda etapa, as alternativas do próximo nível de prioridade entrariam no problema em adição as que sobraram da etapa anterior, e seria realizado novo processo

heurístico e conseqüente eliminação de alternativas. O processo se repete até que se ache conveniente.

3. PROPOSTA DE ESTUDOS FUTUROS

Durante os trabalhos de desenvolvimento do modelo apresentado, novas idéias apareceram para contribuir na melhoria dos resultados e para tornar essa idéia mais próxima da realidade. As principais idéias, cujos estudos já estão em andamento, são:

3.1. Reserva de rotas para empresas aéreas

Considerar reservas de rotas para as empresas aéreas no caso de cancelamentos e atrasos (Butler, 1998). Por exemplo, um voo da empresa A foi adiado por algum motivo. O novo horário para esse voo deveria ser o mais próximo possível do horário anterior e deveria ter uma influência mínima nos outros voos, principalmente os de outras empresas. Esse novo aspecto pode ser trabalhado alterando o modelo proposto, ou criando uma heurística anterior a aplicação do modelo proposto. A priorização de rotas através dos custos deve contribuir para a solução desse problema.

3.2. Redes neurais no processo de otimização

Utilização de redes neurais para dinamizar o processo de otimização. O modelo apresentado deveria ser aplicado com grande frequência numa situação real. O ideal é que a cada 10 minutos o planejador tivesse uma atualização do plano. Outro aspecto é que o fluxo de tráfego aéreo normalmente é cíclico, repetindo-se dia a dia, semana a semana, estação a estação, etc., e em geral para as mesmas aeronaves. A proposta da rede neural seria treinar uma rede com os dados de entrada e saída do processo de otimização mais as datas e horários da obtenção dos resultados. Como resultado, os pesos fornecidos como solução da rede neural seriam substituídos nos custos das rotas na fase de otimização. Dessa forma, a rede neural não elimina possíveis soluções da otimização e dá maior ênfase às rotas geralmente escolhidas.

3.3. Composição e correção de demanda

Composição e correção de demanda: o modelo oferece as informações de carregamento para cada setor, nó, trecho (em ambas as direção e o acumulado), por intervalo de tempo, além do número de pousos e decolagens em cada aeródromo. O processamento do modelo de otimização apenas para as rotas de referência, sem alternativas, e sem limitações, deve ser bastante rápido computacionalmente oferecendo um bom parâmetro para determinação da demanda da rede. Por outro lado, caso o problema tenha alternativas e algumas delas tenham sido escolhidas no processamento, a correção da demanda aparecerá automaticamente no resultado dos carregamentos.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta um modelo de programação inteira para o planejamento de tráfego aéreo. O modelo se presta primariamente à atividade de roteamento e *slot ATC* (pouso e decolagem em aeródromos), podendo ser aplicado às atividades de composição e correção de demanda. Além do modelo, é proposta uma forma sistematizada para a aplicação do mesmo.

A formulação matemática apresentada possibilita um número excessivo de variáveis de decisão (variáveis inteiras), o que, em programação inteira, pode debilitar o processo de busca de soluções. Para tanto, este trabalho discute formas em que o modelo permita a sua manipulação, ou controle no processo de otimização, para acelerar o processo de busca de soluções factíveis.

Este documento é um primeiro passo de um trabalho maior que almeja a segurança na rede, e tendo sempre em vista a diminuição dos custos de operação. Como próximos passos, destacam-se a consideração da demanda do espaço aéreo por diferentes empresas aéreas, a utilização de redes neurais como um instrumento para aceleração do processo de otimização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Butler, T. D. (1998) *Optimization Model With Fairness Objective For Air Traffic Management*. Master thesis. University of Maryland at College Park, MD, USA.
- Odoni, A.R. (1987) *The flow management problem in air traffic control. Flow control of congested networks*. pp 269-288, Springer Verlag, Berlin.

Endereço dos autores:

Eduardo Quaglia

Manoel André Neto

Amazon Technologies Company – www.amazontech.com

500 West Cummings Park, Suite 5500

01801 – Woburn – MA – USA

E-mail: equaglia@it.atech-mn.br

manoelandre@atech.br

Douglas Targa

Fundação Aplicações de Tecnologias Críticas – www.atech.br

Aeroporto de Congonhas – Saguão Central – 1o andar

Av. Washington Luis, s/n

04626-911 – São Paulo – SP – Brasil

E-mail: dtarga@atech.br