

Sistema para sincronização e gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo multi-agentes

Marcos Vinícius Pinheiro Dib e Daniel Amaral Cardoso

Politec Informática, Brasil

Li Weigang

Universidade de Brasília, Brasil

RESUMO: Nesta pesquisa propõe-se um sistema para sincronização e gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo que combina tecnologias de Inteligência Artificial – coordenação de Multi-Agentes, e computação distribuída sobre a Internet – *Grid* Computacional – cuja finalidade é otimizar o fluxo de tráfego aéreo, prevenindo congestionamentos e racionalizando a utilização dos recursos dos aeroportos, sem contudo, ferir os princípios de segurança estabelecidos para a área de transportes aéreos. Para demonstrar o sistema desenvolvido, são descritos sua arquitetura, seus componentes e os relacionamentos entre eles, bem como os mecanismos de negociação necessários às tomadas de decisão. A título ilustrativo, é relatado um estudo de caso de planejamento tático, simulado a partir de informações do Aeroporto Internacional de São Paulo. A combinação das duas tecnologias, coordenação de Multi-Agentes e *Grid* Computacional, aplicada ao problema de gerenciamento do fluxo de tráfego aéreo apresenta perspectivas de tornar-se um tópico promissor para pesquisas futuras.

ABSTRACT: A system for Air Traffic Flow Synchronization and Management is proposed in this research. It combines an Artificial Intelligence technology – coordination of Multi-Agents with distributed computation over the Internet – Computational Grid. The main purpose of this system is to optimize air traffic flow, foreseeing congestion and rationalizing airport resources bearing in mind security issues related with air traffic policies. The system architecture, its components and the relationship among them are described here in order to demonstrate the developed system, as well as the necessary mechanisms of negotiation to support the decision taking process. For illustrative purposes, a tactical planning case is reported which was simulated based on data collected from the International Airport of Sao Paulo. The combination of the two technologies, coordination of Multi-Agents and Computational Grid, applied to the problem of Air Traffic Flow Management presents several perspectives to become a promising topic for future research.

1 INTRODUÇÃO

O Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (ATFM) é um tipo de problema cuja solução envolve a sincronização do tráfego aéreo em Tempo Real (Stoltz e Ky, 2001; Stoltz e Guerreau, 2002). Desde os anos 70, cientistas de Inteligência Artificial (IA), Pesquisa Operacional e Transportes Aéreos têm unido esforços para desenvolver sistemas de Controle de Tráfego Aéreo (ATC) e Gerenciamento de Tráfego Aéreo (ATM) mais eficientes. As soluções baseadas na computação têm esbarrado num problema crítico comum que é a eficiência da própria computação no atendimento às necessidades críticas desses sistemas – escalabilidade, segurança e sincronização.

Um sistema de ATM distribuído foi estudado na Austrália (Tidhar *et al.*, 1992) e suas vantagens são: distribuição inerente, autonomia, comunicação e con-

fiabilidade. Um Sistema Baseado no Conhecimento, para suporte ao ATM em tempo real foi desenvolvido pela IBM/Suíça (Schlatter, 1994). No Brasil, foi analisado um sistema especialista de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (ATFM) para fazer a escala de horários e o controle centralizado do fluxo de tráfego (Weigang *et al.*, 1993, 1997).

Foi desenvolvida uma ferramenta automatizada de auxílio à alocação de *slots* (FEAS) como alternativa para o Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo, que propõe uma alteração na programação dos horários de partida dos vôos, de forma a evitar um desbalanceamento entre a demanda e a capacidade nos diversos nós da rede. Esta ferramenta, apesar de muito interessante, apresenta uma deficiência, reside isoladamente em cada aeroporto, e dessa forma, não consegue atuar preventivamente sobre fluxos de origem, causadores do congestionamento (Targa *et al.*, 2001).

Uma ferramenta poderosa, que implementa uma abordagem distribuída para interface de operador, orientação inteligente de vôo, gerenciamento e suporte à decisão (Prevôt, 2002) está sendo desenvolvida no Centro de Pesquisas Ames na NASA.

O Eurocontrol apresentou, recentemente, a proposta de uma aplicação que implementa técnicas de coordenação de Multi-Agentes. Essa proposta fundamenta-se na simplicidade e coerência dos comportamentos coletivos dos agentes controladores e nos resultados promissores de pesquisas realizadas nessa área, cujo estado da arte são os fundamentos de ações coordenadas: planejamento distribuído, intenção comum e reação coletiva (Nguyen-Duc *et al.*, 2003).

Deve-se ainda mencionar que, embora as técnicas de coordenação de Multi-Agentes sejam uma estrutura metodológica útil, a pesquisa (Nguyen-Duc *et al.*, 2003) está limitada a uma camada de software (*software Shell*), e sua implementação na esfera prática seria extremamente complexa, devido ao volume de tráfego processado pelo ATFM.

O conceito de *Grid* Computacional tem sido definido como “recursos coordenados compartilhando e resolvendo problemas em organizações multi-institucionais virtuais e dinâmicas” (Foster e Kesselman, 1999). Atualmente, essa tecnologia apresenta-se como uma perspectiva para a solução de tarefas de computação de larga escala, caso do ATFM (Berman *et al.*, 2003 ; Ferreira *et al.*, 2003; Sotomayor, 2003; Portela e Melo, 2004).

Os pesquisadores dos centros de pesquisas Ames, Glenn e Langley da NASA desenvolveram um protótipo operacional de um espaço aéreo virtual. O protótipo de simulação do espaço aéreo nacional (VNAS) utilizou recursos em grande escala disponíveis de um *Grid* Computacional para atacar o problema de melhorar a segurança do transporte aéreo (McDermott, *et al.*, 2003).

Grids Computacionais são infra-estruturas de hardware e software que possibilitam o acesso seguro, consistente, distribuído e de baixo custo às demandas de alto nível computacional. Um sistema de gerenciamento baseado na tecnologia de Multi-Agentes executado em um *Grid* computacional mostra a importância da pesquisa em ambos os domínios, *Grid* Computacional e Multi-Agentes (Cao *et al.*, 2002).

Este estudo propõe um Sistema para Sincronização e Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo, denominado de ATFM_MAS (*Air Traffic Flow Management Multi-Agents System*), utilizando as tecnologias de Multi-Agentes e *Grid* Computacional, tendo sido baseado nas pesquisas mencionadas, especialmente nos trabalhos publicados em decorrên-

cia delas (Weigang *et al.*, 1993, 1997; Tidhar *et al.*, 1992; Prevôt, 2002; Nguyen-Duc *et al.*, 2003).

O protótipo do ATFM_MAS foi implementado em uma rede composta por quatro computadores, cada um simulando um aeroporto, para que fosse possível ilustrar um estudo de caso de planejamento tático de fluxos destinados a esses aeroportos. A intenção deste artigo é mostrar que a investigação de sistemas Multi-Agentes utilizando *Grid* de Computacional não é apenas uma simples aplicação, mas também, um tópico de estudo importante próprio do tema Transporte.

As seções seguintes estão organizadas em seis partes: a seção 2 introduz os conceitos básicos e características do ATFM; a seção 3 descreve os modelos funcionais dos agentes, incluindo os mecanismos de negociação entre eles; a seção 4 apresenta a arquitetura e os componentes do ATFM; a seção 5 discorre sobre a implementação do sistema, seus agentes e o processo de inferência; a seção 6 ilustra o estudo de caso; a seção 7 encerra as conclusões.

2 PROBLEMA DE SINCRONIZAÇÃO DE TRÁFEGO AÉREO

O ATFM é desenvolvido para assegurar um fluxo otimizado de tráfego aéreo para ou através de áreas nas quais as demandas de tráfego excedem, em certos períodos, a capacidade disponível do sistema ATC (Weigang *et al.*, 1993).

As principais funções do ATFM são: Planejamento estratégico (envolvendo período longo: dias a anos), Planejamento Pré-Tático e Tático (envolvendo períodos médios, de 1 hora a dias) e Monitoramento/ Controle (operação On-Line). O cenário geral de ATFM é mostrado na Figura 1. Conforme mencionado por Stoltz e Guerreau (2002), o sistema ATFM possui duas propriedades especiais:

- Sincronização de Tráfego Aéreo em Tempo Real, que consiste na implementação de ações corretivas aplicadas ao tráfego, até que este seja realmente recebido pelos controladores, para serem monitorados.
- Tomada de decisão colaborativa dinâmica, que realiza a execução imediata de acordos dinâmicos entre os Gerentes de Tráfego, co-envolvidos na implementação de ações corretivas na transição do tráfego de um setor a outro.

Neste estudo, o escopo é limitado ao planejamento tático do ATFM. As principais funções são consideradas conforme se segue (Tidhar *et al.*, 1992; Weigang *et al.*, 1997):

- Criar uma programação de horário para todas as decolagens e aterrissagens no aeroporto, enquanto maximiza a utilização da pista e do terminal;

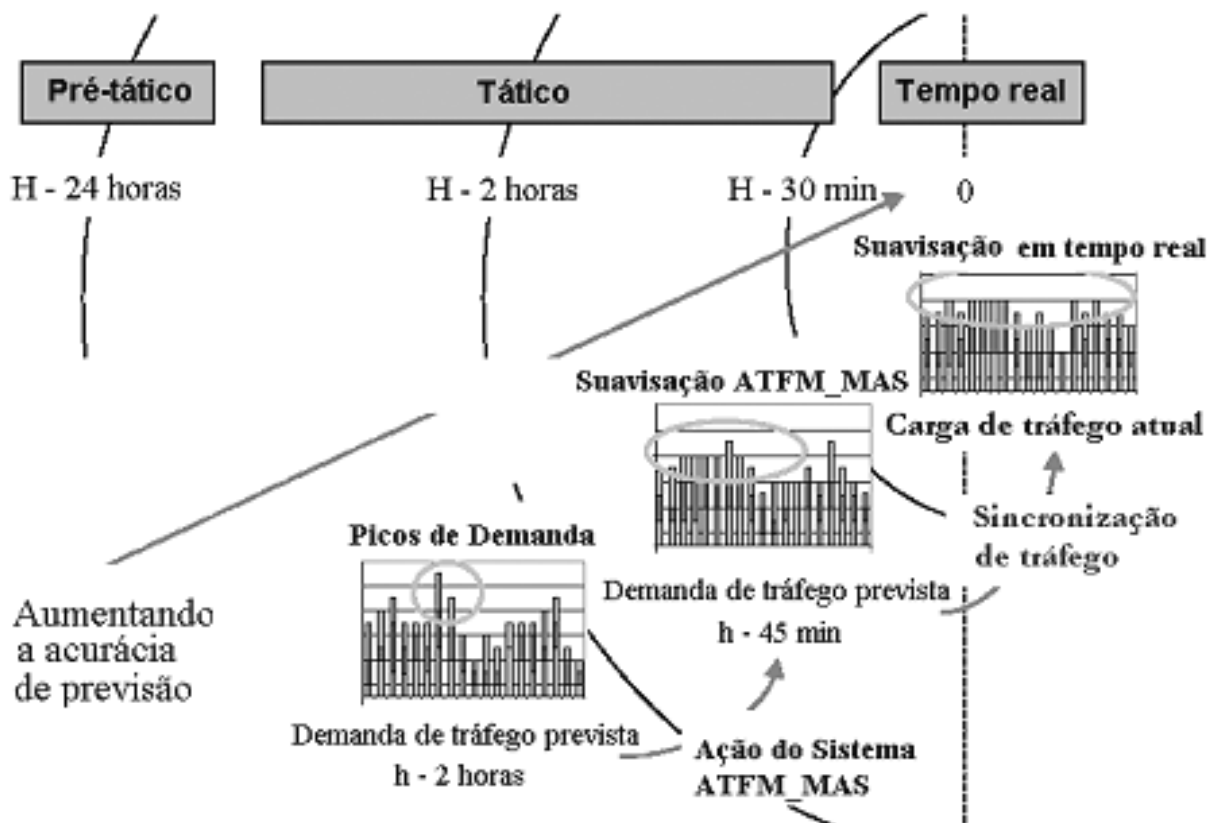


Figura 1: ATFM_MAS no ATFM em Tempo Real (Adaptado de Stoltz e Guerreau, 2002)

- Identificar áreas de congestionamento com relação ao espaço aéreo e pistas;
- Negociar com outros agentes a expectativa de fluxo de tráfego do aeroporto e para o aeroporto;
- Re-programar os vôos de acordo com o resultado da negociação; e
- Comunicar os novos horários a outros agentes afetados.

3 MODELO FUNCIONAL DOS AGENTES

A partir da identificação da demanda esperada, resultante da análise das informações disponíveis dos horários de pousos e decolagens, havendo previsão de um congestionamento, os agentes entrarão em negociação do fluxo aéreo com os aeroportos envolvidos. A idéia é, baseando-se na previsão de se efetuar possíveis atrasos de determinados vôos, habilitar a concordância entre os aeroportos para que seus agentes possam realizar a reprogramação dos horários, a fim de gerar soluções que reduzam o congestionamento, distribuindo o tráfego mais uniformemente entre os aeroportos.

Modelos da demanda esperada e dos recursos disponíveis são constantemente gerados, monitorados e atualizados pelo sistema. É importante ressaltar que, quando nos referimos simplesmente à negociação de fluxo entre aeroportos, remetemos a um sistema complexo que envolve os aeroportos, atra-

vés de suas Torres de Controle (*TWR*), Controles de Aproximação (*APP*) e Centros de Controle de Área (*ACC*), abrangendo, dessa forma, todos os domínios do vôo.

A natureza distribuída da tarefa de gerenciamento do fluxo de tráfego aéreo, envolvendo múltiplos aeroportos, requer que um conjunto de agentes esteja situado fisicamente nesses aeroportos. Dessa forma, em cada aeroporto existirão os seguintes agentes:

Agentes ATC – tratam as informações do controle de tráfego aéreo, manipulando (neste estudo eles simulam) as informações em tempo real, oriundas e destinadas aos controladores da *TWR*, *APP* e *ACC*, tais como o tempo de pouso das aeronaves, levando em conta fatores reais como: vento e condições em rota; vôos eventuais etc.

Agentes Pré-ATC – gerenciam o fluxo do aeroporto local (entrada/saída). Têm por função a manutenção de uma escala de horários previstos para todos os vôos que saem e que chegam ao aeroporto, a fim de maximizar a utilização das pistas e possibilitar a identificação de congestionamentos em relação à capacidade máxima dessas.

Agentes de Planejamento Tático (Agentes PT) – gerenciam o fluxo sobre todo o espaço aéreo, com uma duração mais longa de rastreamento. Monitoram os agentes *Pré-ATC*, as negociações entre os agentes, o fluxo de tráfego aéreo esperado para o aeroporto e do aeroporto, geram novas escalas de horários dos vôos, resultantes das negociações efe-

tivadas, e propagam essas escalas para os demais agentes envolvidos.

Para negociar o fluxo para um aeroporto, foi necessário definir uma medida do fluxo e do congestionamento na utilização dos recursos. Essa *quantia abstracta*, denominada Atraso Total de Peso Combinado (ATPC), é uma função do tempo de atraso de cada voo e do peso (fator de importância) a ele associado, simplificada de (Tidhar *et al.*, 1992), mostrada abaixo:

$$ATPC(t_1, t_2) = \sum_{i=1}^n \text{Custo_de_atraso}(f_i) \quad (1)$$

em que:

ATPC(t_1, t_2): Atraso Total de Peso Combinado entre os instantes t_1 e t_2

n : número de voos entre os instantes t_1 e t_2

f : voo em análise

$$\text{Custo_de_atraso}(f_i) = \text{Atraso_pouso}(f_i) \text{ ou } \text{Atraso_decolagem}(f_i) \quad (2)$$

se f_i = pouso ou decolagem

O ATPC foi escolhido como uma função do tempo de atraso porque quando um aeroporto está congestionado alguns dos voos são atrasados e a extensão do tempo de atraso é proporcional à severidade do congestionamento. Mas, os voos não têm as mesmas importâncias e o atraso de um voo pode ter um custo maior do que o atraso de outro. Assim, combinando-se o tempo de atraso com o peso (fator de importância) do voo atrasado tem-se a indicação da carga do aeroporto.

São calculados ATPC distintos para as aterrissagens e decolagens das aeronaves. Considerando que um dos objetivos do ATFM é minimizar a retenção de aeronaves no ar, nesta pesquisa a função de custo do atraso foi simplificada para a multiplicação de cada minuto de atraso por um peso. Realizadas várias simulações, chegou-se a um peso igual a 5 para aterrissagem e peso igual a 1 para decolagem: esses fatores produzem uma avaliação compatível com a observação de um especialista.

3.1 Criação da Escala de Horários

A criação da escala de horários (*schedule*) e o cálculo do ATPC são feitos localmente em cada aeroporto. A escala de horários é gerada, para um determinado período de tempo *TS* (*Time Slice*), considerando-se as saídas previamente agendadas e o tempo estimado de chegada dos voos de entrada. O *TS* é um intervalo de tempo variável, isto é, pode ser reduzido ou

aumentado quando a carga do aeroporto estiver alta ou baixa, respectivamente.

3.2 Identificando o Congestionamento

Um congestionamento será identificado quando, num intervalo de tempo analisado, a demanda para um aeroporto (pousos/decolagens) superar sua capacidade de vazão. Como essa é uma situação que não pode ocorrer na prática, alguns voos deverão ser atrasados ou retidos no ar. Quanto maior o congestionamento, maior será o atraso.

Numa situação ideal não deveria haver nenhum atraso. No mundo real devem-se manter pequenas filas para as pistas dos aeroportos, de forma a maximizar sua utilização. Neste estudo, após várias simulações, chegou-se a um valor de ATPC definido como *aceitável*, para cada aeroporto, que maximiza a utilização das pistas de forma segura e mantém administrável a sobrecarga sobre o ATC.

Qualquer ATPC de valor maior que o *aceitável* indica um congestionamento de pista. A situação é identificada analisando-se a escala de horários e verificando-se o ATPC em diferentes pontos do tempo. O ATPC, que dá a medida de congestionamento, deve ser reduzido pelo ATPC excedente (i.e., a diferença entre o ATPC calculado e o ATPC *aceitável*). Uma vez que o objetivo é minimizar a *retenção das aeronaves no ar*, a negociação do ATPC é executada apenas para voos de entrada.

3.3 Negociando ATPC adequados

Uma vez que o fluxo de entrada de um aeroporto é influenciado pelo fluxo de saída de outros aeroportos, várias horas antes, os agentes precisam interagir para determinar níveis de fluxo e resolver congestionamentos.

As negociações para serem realizadas utilizam a infra-estrutura implementada pelo *Grid* Computacional. Os agentes negociam usando uma medida concreta, isto é, o tempo de atraso por voo, derivado do cálculo do ATPC. Em seguida, cada agente dos aeroportos de origem absorverá o ATPC relativo ao voo que ele aceitar atrasar. Sob solicitação, pode ser requerida a interação do usuário (controlador de fluxo de tráfego aéreo) no protocolo de negociação na confirmação das mensagens.

Por exemplo, assumindo-se que o Aeroporto Internacional de São Paulo (GRU) está congestionado, devido a pousos programados para um mesmo horário, oriundos dos Aeroportos Internacionais do Rio de Janeiro (GIG) e de Porto Alegre (POA), seria iniciada a seqüência de ações descritas a seguir:

1. GRU, que esta com ATPC alto, iniciará a negociação com agentes do GIG e de POA, a fim de reduzir seu ATPC e, conseqüentemente, seu gerenciamento.
2. GRU enviará uma mensagem de requisição pedindo para GIG e POA atrasarem os vôos indicados, pelos tempos indicados.
3. Cada um dos Agentes *Pré-ATC*, dos aeroportos acionados, calcularão o montante de ATPC que poderá ser absorvido.
4. Se efetivarem os atrasos solicitados, GIG e POA enviarão respostas a GRU com a aceitação.
5. O aeroporto que não efetivar os atrasos solicitados informará GRU da não aceitação.
6. Ao receber as respostas das solicitações efetuadas (ou um *timeout*), GRU enviará mensagem de decisão para o(s) agente(s) apropriado(s), comunicando-o(s) da situação final.

Os modelos funcionais apresentados acima descrevem como os agentes geram os modelos de demanda prevista e de capacidade disponível e criam uma solução usando escalonamento de horários e negociação. Esses modelos são continuamente monitorados e atualizados quando da entrada de informações referentes a novos vôos, mudanças nos vôos, mudanças climáticas (meteorologia), mudanças de recursos, ou resultados de negociações entre agentes.

4 ARQUITETURA E COMPONENTES DO ATFM_MAS

Para construir a solução ATFM_MAS foi necessário combinar vários componentes de hardware e software os quais são descritos abaixo em maiores detalhes.

4.1 Arquitetura

O sistema ATFM_MAS é proposto para dar suporte ao compartilhamento e uso coordenado de recursos diversos dos sistemas brasileiros de controle de fluxo de tráfego aéreo. Como os aeroportos são geograficamente distribuídos, algumas vezes os controladores de ATFM operam seus componentes de forma distintas, inclusive adotando políticas diferentes.

O sistema ATFM_MAS implementa, via *web services*, agentes de software escritos em linguagem Java executados sobre um *Grid* Computacional, o que possibilitará o sincronismo de ações entre os aeroportos envolvidos na solução. Trata-se de um *framework* Java utilizando-se das funcionalidades de *Grid* Computacional definidas pela *OGSI – Open Grid Services Infrastructure* (Ferreira *et al.*, 2003).

O conceito de *Grid* Computacional, conforme Foster e Kesselman (1999), proporciona a infra-estrutura integrada necessária para o gerenciamento de recursos compartilhados e soluções de problemas em ambientes distribuídos. Tal conceito encaixa-se perfeitamente à solução aqui proposta. A ferramenta *Globus Toolkit* (Globus, 2004) implementa o *Grid* aplicando o conceito de *Grid* de Serviços, o qual é considerado como a próxima geração das aplicações baseadas nessa tecnologia (Sotomayor, 2003).

A arquitetura do ATFM_MAS é composta de cinco componentes: Interface, Contêiner *OGSA – Open Grid Service Architecture e Tomcat, Web Services*, servidor de aplicações e base de dados. Esses componentes e seus relacionamentos são apresentados na Figura 2

4.2 Componentes Básicos do ATFM_MAS

4.2.1 A Interface

A função da interface é possibilitar ao controlador de fluxo de tráfego aéreo interagir de forma amigável com o ATFM_MAS. Supondo-se que cada aeroporto tenha seu próprio sistema operacional, com sua própria interface, o controlador envia as solicitações e recebe as respostas dos aeroportos relacionados, por meio de notificações de serviços específicos do *grid* de serviços.

4.2.2 O Contêiner OGSA e Tomcat

O *Tomcat* é um contêiner (servidor) *Web* Java mantido pelo *Apache Jakarta Project* (Apache, 2004). No sistema, sua responsabilidade é abrigar as aplicações *web* que implementam a arquitetura aberta de serviços de *Grid*, a *OGSA*. O *Globus* é o software usado para implementar o que o *OGSA* define e o que o *OGSI* especifica, além de prover vários outros programas, utilitários e serviços. Na *OGSA-Globus* residem os agentes, suas regras de negociações e de comunicações. Os agentes comunicam-se entre si, com as regras negociais e controle de persistências via *Web Services*.

4.2.3 Os Web Services

De acordo com o descrito por Foster e Kesselman (1999) e Sotomayor (2003), os *Web Services* são a base para os *grid* de Serviços, sendo, portanto, componentes essenciais da ferramenta *Globus Toolkit 3*.

Desde que sejam utilizadas mensagens padrão XML, os *Web Services* são, ao mesmo tempo, independentes de linguagens e plataformas. Considerando-se, ainda, o fato de que a maior parte dos *Web Services* utilizam o protocolo HTTP para a transmissão de mensagens isto representa uma vantagem

importante para se construir, num futuro próximo, uma aplicação ATFM baseada na internet.

Os *Web Services* direcionam a computação heterogênea distribuída, através da definição de técnicas para a descrição de componentes de software, métodos de acesso a esses componentes e a identificação de relevantes provedores de serviços de *Web Servi-*

ces. A principal vantagem do uso de *Web Services* é que eles permitem às aplicações o compartilhamento de dados independentemente de quais linguagens foram utilizadas para construção dessas aplicações e em qual sistema operacional ou plataforma elas são executadas.

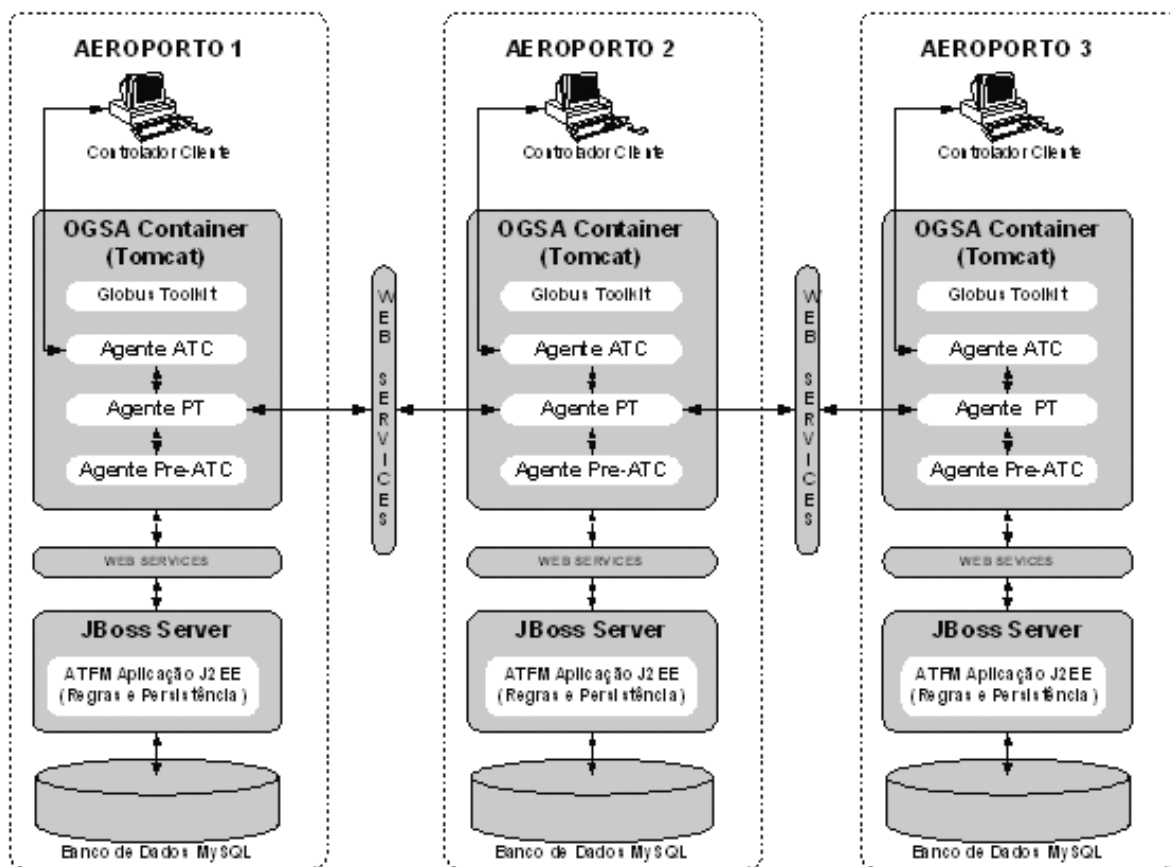


Figura 2: Arquitetura do sistema ATFMGC

4.2.4 O Servidor de Aplicações

O JBoss, servidor de aplicações Java mantido pelo JBoss Group, foi o servidor de aplicações escolhido. Nele, estão contidos todos os contêineres (servidores) *J2EE* esperados em um servidor de aplicações (Servidor *Web*, Servidor *EJB*, Servidor *JNDI*, Controle de Transações, etc.). As regras de negócios e os controles de persistência residem em uma aplicação hospedada nesse servidor e são publicadas automaticamente pelos *Web Services*.

4.2.5 A Base de Dados

Devido às necessidades de sincronização do fluxo de tráfego aéreo em tempo real, o acesso aos dados deve ser fácil e rápido, razão pela qual foi utilizado o sistema de gerenciamento de banco de dados relacional *MySQL*, mantido pelo *MySQL AB* (MySQL, 2004). O mapeamento objeto-relacional é feito pelo

framework Hibernate (Hibernate, 2004) que é uma *API/framework* Java residida no servidor de aplicações.

5 PROCESSO DE IMPLEMENTAÇÃO E INFERÊNCIA

Neste estudo, os agentes *ATC*, *Pré-ATC* e *Planejamento Tático (PT)* foram desenvolvidos para o ATFM_MAS em linguagem Java. A Figura 3 mostra a forma de comunicação e negociação entre agentes no sistema ATFM_MAS.

5.1 Agente ATC

Esse agente possui um módulo denominado *Monitor ATC* que é o responsável por implementar a interface de comunicação com o “mundo real do ATC”. Ele recebe informações de vôos que tiveram seus

horários modificados por motivos diversos (clima, incidente, fechamento de aeroporto etc) e envia para o “mundo ATC” informações de vôos cujos horários foram modificados devido à re-escalamentos feitos pelo agente PT.

5.2 Agente Pré-ATC

O Agente *Pré-ATC* foi desenvolvido de acordo com as regras de ATC/ATM, as quais têm sido definidas pelo Departamento de Aviação Civil – DAC (Weigang *et al.*, 1997; DEPV, 1999). Este agente possui dois módulos:

1. *Scheduler* – responsável por re-escalonar os vôos em conflitos, obedecendo a regras pré-estabelecidas, dentro de um determinado período de tempo; e
2. *Diagnosticador* – responsável por receber a tabela de vôos re-escalada e calcular o ATPC. Com o ATPC calculado, este módulo aciona o agente TP para entrar em negociação com outros agentes, de outros aeroportos.

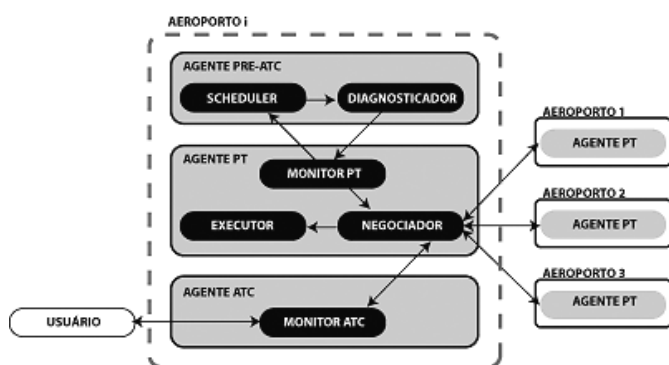


Figura 3: Comunicação e negociação entre os agentes

5.3 Agente de Planejamento Tático (PT)

O agente de *Planejamento Tático (PT)* possui três módulos:

1. *Monitor PT* – responsável por acionar o re-escalamento dos vôos através do agente *Pré-ATC*, fornecendo como parâmetro para o *Pré-ATC* o período de tempo (*TS*) em que o agente irá atuar. Este monitor também recebe solicitações de vôos do agente *Pré-ATC*, a serem negociadas com outros agentes de outros aeroportos;
2. *Negociador* – responsável por efetuar a negociação de re-escalamento de vôos com outros agentes *PT*. Este módulo recebe e responde a uma determinada solicitação de re-escalamento de vôos. Além de receber, efetua uma solicitação de re-escalamento para um outro agente *PT*; e
3. *Executor* – responsável por receber do módulo *Negociador* as solicitações de mudanças de dados de vôo já validados e re-agendados.

6 UM EXEMPLO ILUSTRATIVO

Para esta simulação, iniciada às 7:00 da manhã (horário corrente), foram usadas informações dos vôos agendados para o período de 9:00 às 10:00 da manhã, de 16 de fevereiro de 2004 (Panrotas, 2004).

O agente *Pré-ATC* no Aeroporto Internacional de Guarulhos (GRU) começou a detectar o congestionamento de tráfego para um período de tempo Δt_2 , de t_1 a t_2 , onde $t_1 = \text{Hora corrente} + \Delta t_1$, $t_2 = t_1 + \Delta t_2$. Definindo $\Delta t_1 = 2$ horas e $\Delta t_2 = 1$ hora, o agente *Pré-ATC* considerou o período $t_1=9:00$ e $t_2=10:00$ horas.

Tabela 1: Previsão de chegada de vôos para o aeroporto de Guarulhos às 9:20 horas

Vôo	Tipo da Aeronave	Aeroporto de Origem	Horário previsto de partida	Horário previsto de chegada	Horário re-agendado pelo ATFM_MAS	Atraso (minutos)	Novo horário de partida
PU222	73S	MVD	07:00	09:20	09:22	2	—
RG2308	735	POA	07:50	09:20	09:24	4	07:54
RG8902	733	GIG	08:20	09:20	09:28	8	08:28
RG8936	738	GIG	08:20	09:20	09:26	6	08:26
AA995	777	MIA	23:20	09:20	09:20	0	—

Para detectar o congestionamento de tráfego das aeronaves, o período de tempo Δt_2 foi dividido em intervalos de tempo (*TS*) de 5 minutos, para os quais foi calculado o congestionamento do tráfego.

O *Pré-ATC* foi utilizado para calcular o ATPC para os vôos no intervalo das 9:00 às 10:00. No intervalo das 9:20 às 9:25, o ATPC foi maior que o valor *aceitável*, o que era de se esperar, visto existirem 5 (cinco) chegadas de vôos às 9:20 da manhã: PU222 vindo de Montevideu (MVD), RG 2308 de Porto Alegre (POA), RG8902 e RG 8936 do Galeão (GIG) e AA995 de Miami (MIA), conforme mostrado nas colunas de 1 a 5 da Tabela 1 abaixo.

Para efeito desta análise, definiu-se como parâmetro o intervalo mínimo de 2 minutos entre pousos sucessivos, logo os atrasos serão 0, 2, 4, 6 e 8 minutos. O agente *Pré-ATC*, com base nas regras de ATC/ATM e nas prioridades definidas em DEPV (1999) estabeleceu a seguinte seqüência, em ordem de prioridade, para os pousos: 1) AA995 – mantido no horário; 2) PU222 – pouso retardado em 2 minutos; 3) RG2308 pouso retardado em 4 minutos; 4) RG8936 pouso retardado em 6 minutos; e 5) RG8902 pouso retardado em 8 minutos. Os resultados são mostrados nas colunas 6 e 7 da Tabela 1.

Para uma melhor compreensão do processo de inferência que originou o resultado acima, este será analisado passo a passo. O sistema ATFM_MAS realizou essa análise no tempo corrente igual a 07:00 horas (tempo real). Nesse instante, o vôo PU222 acabava de decolar de Montevideu, o vôo AA995 já se encontrava voando há sete horas e quarenta minutos e os três vôos restantes ainda se encontravam no solo. Como um dos principais objetivos do ATFM é evitar a retenção de aeronaves no ar, as duas aeronaves que já estavam voando tiveram prioridades sobre as demais. Estabelecido este primeiro marco, PU222 e AA995 chegariam, ambos, para pouso às 9:20 horas (neste modelo estamos desconsiderando a influência de ventos). Como AA995 era um Boeing 777 e o PU222 era um Boeing 737-200, o AA995 teve prioridade de pouso sobre o PU222. Logo, o primeiro e o segundo da fila estavam definidos, sendo que o PU222 foi retido no ar por dois minutos para aguardar o pouso do AA995.

Dos três vôos restantes, o vôo RG2308 estava previsto para decolar antes dos demais, tendo preferência da terceira janela de pouso. Quanto aos dois vôos restantes, ambos partindo no mesmo horário do Galeão, o RG8902 (um Boeing 737-300) e o RG8936 (um Boeing 737-800), pelas regras definidas, RG8936 ficou com a quarta janela e RG8902 com a quinta.

Estabelecidas as prioridades e os atrasos necessários, o agente *PT* de Guarulhos contatou o agente

PT de Porto Alegre, solicitando que fosse atrasada a decolagem do RG2308 em 4 minutos e o agente *PT* do Galeão para atrasar os vôos RG8936 em 6 minutos e RG8902 em 8 minutos. Neste instante, os agentes *PT* de Porto Alegre e do Galeão acionaram os agentes *Pré-ATC* de seus aeroportos e verificaram se esses atrasos eram *aceitáveis*. Tendo sido *aceitáveis* as mudanças de horário de decolagens propostas, os agentes responderam para o agente *PT* de Guarulhos, que concluiu a negociação. O resultado do processo é mostrado na Tabela 1, onde os vôos RG2308, RG8936 e RG8902 têm seus horários de decolagem modificados, e o tempo total de espera no ar das aeronaves que seria de 20 minutos, com o ATFM_MAS, reduziu-se para 2 minutos. Isto significou mais segurança e menos custos.

Porém, teria sido possível que os agentes *Pré-ATC*, nos aeroportos do Galeão e Porto Alegre, chegassem a outra configuração de escala de vôo, ou seja, a outro valor de tempo de atraso, para o pedido feito. Por exemplo, a solicitação de atraso da decolagem do RG8936 para 8:26 horas, poderia ter conflitado com algum vôo já programado para pouso nesse horário. Logo, o que Guarulhos poderia ter oferecido seria a próxima janela, isto é 8:28 horas. Esta proposta de 8 minutos seria retornada ao agente *PT* de Guarulhos que a repassaria para o seu agente *Pré-ATC* para análise. Esse processo de negociação avançaria até que os agentes TP entrassem em acordo. O acordo não significa, necessariamente, a obrigação de terem de aceitar uma oferta qualquer: ou seja, a inviabilidade de atraso também é um acordo. Conforme mencionado, no item 3.3, a negociação tem um tempo para ser concluída. Findado este prazo (*timeout*), o agente *PT* que solicita a negociação assume como negativo seus pedidos e procede de acordo como tal.

O agente *PT* no aeroporto de Guarulhos também se comunicou com os agentes *PT* dos aeroportos de destino, informando os novos horários de decolagens de seus vôos, que foram atrasados devido à resolução dos conflitos de pousos e decolagens.

Assim, os agentes *PT* dos diferentes aeroportos envolvidos neste estudo coordenaram seus processos até que a rede ATFM_MAS tivesse atingido o sincronismo.

7 CONCLUSÕES

A utilização de Multi-Agentes com *Grid* Computacional para a solução do problema de sincronização de fluxo de tráfego em tempo real foi proposta nesta pesquisa. O ATFM é um domínio interessante para aplicação dessas duas tecnologias. (Cao *et al.*, 2002; Weiss, 1999).

Não foi registrado, até o momento, nenhum estudo sobre o uso combinado das referidas tecnologias para a solução do problema de sincronização de fluxo tráfego aéreo. Tendo-se em mente as vantagens do *Grid* Computacional, esta proposta também apresenta uma solução para o transporte aéreo, visto que a plataforma utilizada é um eficaz meio de integração de dados e sistemas legados (Lavery, 2002).

Os resultados obtidos neste trabalho podem representar uma significativa contribuição para a pesquisa de tecnologias em transportes aéreos. Para estudos posteriores, os seguintes aspectos devem ser levados em consideração:

- Construção de um *Grid* computacional especial para ATFM, para estudar os principais componentes (hardware e software), bem como sua capacidade para atender às altas demandas geradas pelo controle de fluxo de tráfego aéreo;
- Os parâmetros para organizar o re-escalonamento entre os nós do *Grid* (aeroportos) ainda estão em desenvolvimento. Eles ainda são importantes para avaliação posterior do sistema;
- Implementação do ATFM_MAS num ambiente real de ATC/ATM, a fim de fazer o planejamento tático de ATFM e controle em tempo real.

REFERÊNCIAS

Berman, F.; G. Gox e T. Hey (2003) *Grid Computing: Making The Global Infrastructure a Reality*, John Wiley & Sons.

Cao, J.; S. A. Jarvis; S. Saini; D. J. Kerbyson e G. R. Nudd (2002) ARMS: an Agent-based Resource Management System for *grid* Computing. *Scientific Programming*. vol. 10, pp. 135-148.

DEPV (1999) *IMA 100-12, portaria DEPV No. 46 de 30/06/99*. Departamento de Previsão de Voo – DEPV, Ministério de Aeronáutica.

Ferreira, L.; V. Berstis; J. Armstrong; M. Kendzierski; A. Neukoetter; M. Takagi; R. Bing-Wo; A. Amir; R. Murakawa; O. Hernandez; J. Magowan; N. Bieberstein (2003) *Introduction to Grid Computing with Globus*. IBM Redbooks. Disponível em www.ibm.com/redbooks.

Foster, I. e C. Kesselman (1999) *The grid: Blueprint for a New Computing Infrastructure*. Morgan Kaufmann Publisher.

Lavery, L.; C. Bolbyreff (2002) Laying the Foundation for Web Services over Legacy Systems. *Fourth International Workshop on Web Site Evolution (WSE'02)*. Montreal, Canada.

McDermott, W. J., D. A. Maluf, Y. Gawdiak e P. B. Tran (2003) Airport Simulations Using Distributed Computational Resources, *CrossTalk, The Journal of Defense Software Engineering*.

Nabrzyski, J.; J. M. Schopf; J. Weglarz (2003) (eds.) *Grid resource management – State of the Art and Future Trends*. Kluwer Academic Publishers.

Nguyen-Duc, M.; J. P. Briot; Alexis Drogoul e V. Duong (2003) An application of Multi-Agent Coordination Techniques in Air Traffic Management, in the Proceedings of the

IEEE/WIC International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT'03).

Panrotas (2004) *Guia de Horário de Nacionais e Internacionais*. Panrotas Editora Ltda., No. 375 Ano 31.

Portella, G. J. e A. C. M. A. Melo (2004) – A Load Balancing Strategy to Schedule Independent Tasks in a *grid* Environment, to appear at Europar04, (2004).

Prevôt, T. (2002) Exploring the Many Perspectives of Distributed Air Traffic Management: The Multi Aircraft Control System MACS. In S. Chatty, J. Hansman, and G. Boy (eds.) *Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction in Aeronautics (HCI-Aero 2002)*, AAAI Press. Menlo Park, CA, pp. 149-154.

Schlatter, U. R. (1994) Real Time Knowledge Based Support for Air Traffic Flow Management. *IEEE Expert*, 1994. pp. 21-24.

Sotomayor, B. (2003) *The Globus Toolkit 3 Programmer's Tutorial*.

Stoltz, S. e P. Ky (2001) Reducing Traffic Bunching More Flexible Air Traffic Flow Management. *4th USA/Europe ATM R&D Seminar*, Novo México.

Stoltz, S. e R. Guerreau (2002) Future ATFM Measures (FAM) operational Concept. EUROCONTROL EEC Note No. 13/02.

Targa, D., C. J. P. Alves e M. J. M. Araújo (2001) Uma Ferramenta Automatizada no Auxílio a Alocação de Slots para o Problema de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo, Artigo Científico. XV ANPET – Associação Nacional de Pesquisa em Transportes.

Tidhar, G.; A. Rao e M. Ljunberg (1992) Distributed Air Traffic Management System. *Australian Artificial Intelligence Institute, Tech. Rep. 25*. Melbourne, Australia.

Weingang, L.; C. J. P. Alves e N. Omar (1993) Knowledge – Based System for Air Traffic Flow Management: Timetable Rescheduling and Centralized Flow control. In: G. Rzevski, J. Pastor, and R. A. Adey (eds.). *Applications of AI in Engineering VIII, Vol. 2*. Elsevier, (1993), pp. 655-670.

Weingang, L.; C. J. P. Alves e N. Omar (1997) An expert system for Air Traffic Flow Management. *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 31, No. 3, 1997, pp. 343-361.

Weiss, G. (1999) (ed) *Multiagent systems*, The MIT Press.

Marcos Vinícius Pinheiro Dib (dib@bsb.politec.com.br)

Daniel Amaral Cardoso (danielcardoso@terra.com.br)

Li Weingang (weingang@unb.br)

Artigo recebido em 8/12/2004 e aprovado em 16/07/2005.