Indice

Introducción *1*

Estado del arte *2*

Introducción

La inminente saturación de espacio aéreo civil tanto a nivel físico como a nivel de comunicaciones es un problema que se ha intentado abordar los últimos años. Dicho problema se ve incrementado por el hecho de que cada año se introducen multitud de nuevos vuelos en este espacio aéreo.

De acuerdo con (1) los métodos actuales de control del tráfico aéreo basados en espacios aéreos han mostrado ser ineficientes incluso para la futura coordinación de pilotos de aeronaves. Esto se debe principalmente a:

1. Ineficiente utilización del espacio aéreo que se basa en pasillos predefinidos.
2. Incremento en la carga de trabajo de los controladores aéreos debido al incremento en la densidad del tráfico aéreo.
3. El uso de tecnologías obsoletas, que en algunos casos tienen más de 30 años.

Primeramente haremos una pequeña presentación de lo que es navegación aérea en general. La navegación aérea engloba a un conjunto de técnicas y procedimientos, como planificación, grabación y control de los movimientos del vehículo, que permiten conducir eficientemente una aeronave a su destino. Pilotar con éxito una aeronave implica pilotarla de un punto a otro sin perderse, quebrantar las leyes aeronáuticas o poner en peligro la seguridad de las personas que se encuentran a bordo o en tierra. Un gran hándicap en la navegación aérea es que, por un lado, las aeronaves están limitadas por la cantidad de combustible que pueden llevar y una vez consumido este no puede quedarse paradas esperando un posible rescate. Por otro lado, una colisión de una aeronave puede, muy probablemente, acarrear repercusiones desastrosas. Dentro de la navegación aérea existen dos conjuntos de reglas de vuelo: VFR (Reglas de Vuelo Visual) y IFR (Reglas de Vuelo Instrumental). En el caso de VFR (visibilidad mayor de 5 millas náuticas y techo de nubes por encima de los 1500m), los pilotos suelen usar la técnica de "navegación por estima" (procedimiento para inferir la ubicación actual haciendo cálculos basados en el rumbo y la velocidad de navegación a lo largo de un período) combinada con observaciones visuales contrastándolas con cartas o mapas de navegación aérea y que a veces se puede valer de ayuda por radio. Por otro lado, IFR es más utilizado, por razones de seguridad, en aviones de línea donde los pilotos navegarán usando exclusivamente instrumentos y ayudas de navegación por radio o directamente bajo las órdenes de controladores aéreos. El responsable en tierra de la navegación aérea es el ATC (control de tráfico aéreo) que gestiona el tráfico aéreo haciendo uso de la información suministrada por los pilotos y por los sistemas de radar.

En este artículo se presentará un modelo para realizar una simulación de cómo afectaría la introducción de UAVs (Vehículo aéreo no tripulado) en el espacio civil actual. Un UAV es una aeronave que vuela sin tripulación humana a bordo, es decir, controlado por una máquina, y se define como un vehículo sin tripulación reutilizable, capaz de mantener un nivel de vuelo controlado y sostenido, y propulsado por un motor de explosión o de reacción. Actualmente son usados mayoritariamente en aplicaciones militares aunque también son utilizados en un pequeño pero creciente número de aplicaciones civiles, como en labores de lucha contra incendios o seguridad civil, como la vigilancia de los oleoductos. Los vehículos aéreos no tripulados suelen ser preferidos para misiones que son demasiado "aburridas, sucias o peligrosas" para los aviones tripulados. El uso cada vez mayor de UAVs en diferentes tareas, tanto militares como civiles, como el reducido coste de un UAV con respecto a los vehículos tripulados ha llevado a que la producción de UAVs haya alcanzado unos niveles fiables y rentables, lo cual ha producido que una serie de organizaciones tales como la FAA (Administración federal de aviación de EEUU) o Eurocontrol (Organización Europea de la Seguridad de la Navegación Aérea) se hayan comprometido a hacer uso del potencial de las nuevas tecnologías para solucionar parte de estos problemas, con la introducción, regulación (2) y mantenimiento de vuelos coordinados de UAVs dentro del espacio aéreo civil. Esto conlleva, inevitablemente, a querer hacer previamente cierto tipo de pruebas y simulaciones para comprobar que dicha regulación y mejora tecnológica se adapta adecuadamente a la situación actual de tráfico aéreo, antes de introducir este tipo de vehículos en el entorno real.

Ya que estos vehículos no van a ser elementos aislados cuando sean introducidos en el espacio aéreo civil, es evidente que hay una serie de factores que no se pueden pasar por alto. Estos factores se centran principalmente en que estos vehículos van a interaccionar y depender en muchos casos de los comportamientos, actitudes u órdenes que en un determinado momento uno o más humanos puedan mostrar o mandar, de hecho, es importante distinguir también que el tiempo de respuesta es distinto entre un humano y una máquina. Por otro lado, teniendo en cuenta que un tercio de los accidentes aéreos se deben a errores de los pilotos (3) parece que el comportamiento, actitud o estado de un piloto en un determinado momento es interesante tenerlo en cuenta a la hora de desarrollar nuevas tecnologías basadas en simulación de aviación, las cuales, históricamente, se han enfocado más en los aspectos funcionales o técnicos de la simulación. Los modelos de comportamiento de los humanos, en nuestro caso nos centraríamos en los pilotos, nos ayudan a su vez a detectar defectos de diseño o en la interacción de los humanos con los sistemas y procedimientos existentes, y nos permiten pronosticar las posibles causas de los errores de los pilotos así como saber cuáles son las máximas exigencias de los pilotos como los altos niveles de memorización, la presión temporal o estrés, la carga de trabajo, la fatiga, la atención o distracción en su defecto, etc (4).

Actualmente hay numerosas aplicaciones que se dedican a la simulación aérea. Centrándonos en el área de investigación por un lado tenemos un par de aplicaciones desarrolladas sobre JSBSim que es una librería software (opensource) que modela la dinámica de vuelo de aeronaves (modelo físico de los movimientos de los aviones) (5), este par de aplicaciones son el FlightGear (6) que sirve para simular el pilotaje de un avión, y el OpenEaagles (7) que es un framework diseñado para facilitar la construcción de aplicaciones de simulación en tiempo real usando software orientado a objetos.

Por otro lado tenemos el Aviator Visual Design Simulator (8), una aplicación basada en simulink que se centra en el estudio de los sistemas de control de las aeronaves.

Y por último tenemos una serie de herramientas que se centran más en la navegación aérea. Así tenemos que la NASA ha desarrollado el FACET (Herramienta para evaluar futuros conceptos del tráfico aéreo) (9) (10) que es una herramienta desarrollada para simular el flujo del tráfico aéreo que contiene módulos que se centran en el modelado de la trayectoria, el modelado del tiempo, y también contiene un modelo de la estructura del espacio aéreo, incluidas las regiones ARTCC (Centro de control del tráfico de las rutas aéreas), sectores y rutas aéreas. FACET puede actuar como un simulador o como un mecanismo de reproducción ya sea a partir de datos históricos o de una fuente de datos reales de la FAA. FACET se ha integrado en un producto comercial, Flight Explorer (11), que se usa en la mayoría de las principales compañías aéreas de EE.UU. FACET no es sólo una simulación basada en agentes, que se concentra en los aspectos físicos del flujo de tráfico aéreo, sino que también incluye aspectos físicos, tales como la carga de trabajo del controlador y las iniciativas de gestión del tráfico aéreo.

Por otra parte la FAA tiene el IMPACT (Modelo Inteligente basado en agentes para el Análisis de Políticas de Colaboración de la gestión del Tráfico aéreo) (12) que es una herramienta que utiliza un enfoque ABMS (Simulación y Modelado Basado en Agentes) para simular la interacción entre agentes simples en un entorno basado en la economía (13). En la simulación, los agentes basados en la política de la FAA evalúan e imponen GDPs (programas de retraso en tierra), basados en la capacidad del espacio aéreo y el clima. Sus decisiones se basan en reglas simples acerca de la capacidad de los aeropuertos y la igualdad entre las compañías aéreas. Los agentes de las aerolíneas están basados económicamente en agentes y toman sus decisiones basándose en el cálculo del coste. Mediante la imposición de determinados acontecimientos al azar en el comienzo, la salida de la simulación son estadísticas basadas en el comportamiento de los agentes emergentes en el sistema. El enfoque de IMPACT es modelar las aerolíneas y la FAA como agentes enjambre (swarm) basados en que el uso de un algoritmo simple de toma de decisiones y centrarse principalmente en la gestión de retrasos.

Todos estos enfoques permiten simulaciones que, desde nuestro punto de vista, se quedan un poco incompletas ya que son poco intuitivos, es decir, son muy complejos para una persona no familiarizada con la herramienta, permiten poca flexibilidad a la hora de querer introducir nuevos módulos, hacen muy poca abstracción del problema a abordar, y por último, y lo más importante, destacar que no modelan los comportamientos y conductas de los pilotos, ni la interrelación entre ellos o con otros elementos externos.

Es importante que para la simulación de la introducción de UAVs en el estación civil actual se tengan en cuenta los anteriores aspectos y en especial los últimos mencionados en el párrafo anterior, ya que la conducta de los pilotos y demás individuos involucrados en los vuelos puede interferir en que un UAV lleve a buen puerto un vuelo.

Este trabajo intenta cubrir algunas de las carencias de las anteriores herramientas de simulación haciendo uso de un sistema basado en agentes. Dicho enfoque encaja muy bien en este tipo de simulación porque nos permite abordar el problema de los comportamientos humanos, ya que los agentes son abstracciones computacionales intencionales y sociales, por lo que guardan una cierta similitud con las personas que participan en la gestión de vuelos. Es por tanto factible establecer una correspondencia entre los conceptos de agente y persona, que si bien no son equiparables resultan más próximos que en el caso de otras abstracciones computacionales.

En este artículo se presentará un modelo para realizar una simulación de cómo afectaría la introducción de UAVs en el espacio civil actual, dicho modelo se realizará usando agentes software. Los agentes son abstracciones computacionales intencionales y sociales, por lo que dicha aproximación se ajusta muy bien a la hora de modelar todos los individuos que intervienen en la gestión del tráfico aéreo. Dicho modelo se ha implementado con la herramienta INGENIAS (14) distribuida como software GLP y desarrollada en Java para implementar MASs (sistemas multi agente). En las posteriores secciones entraremos en profundidad en el estado del arte de los actuales sistemas de simulación, presentaremos el objetivo y diseño que hemos elegido para afrontar este problema, mostraremos unas conclusiones ante las simulaciones realizadas y presentaremos las áreas de trabajo futuro que se puede realizar sobre el trabajo actual.

Estado del arte

Ya que este tema de investigación es relativamente nuevo no hay trabajos anteriores que se centren concretamente en el estudio que este trabajo se propone abordar, aun con todo esto, en esta sección se va a proceder a analizar trabajos existentes desde tres puntos de vista. Por un lado los trabajos que se centran en investigaciones realizadas sobre UAVs tanto a la hora de programarlos para que persigan unos determinados objetivos como en cuanto a los protocolos y reglamentación que han de cumplir para poder ser integrados en el espacio aéreo civil. Por otro lado, se van a analizar una serie de trabajos basados en las simulaciones del espacio aéreo, en su mayoría centradas en la gestión del tráfico aéreo. Y por último se hablará del grupo de trabajo que tratan de los factores humanos que intervienen los distintos vuelos, como pueden ser los distintos comportamientos de las tripulaciones de los pilotos o de los controladores aéreos.

Trabajos de investigación sobre UAVs

Hay numerosos trabajos que se centran en la investigación y mejora en el manejo de UAVs.

En primer lugar es evidente destacar que para la introducción de UAVs en el espacio civil actual es necesario establecer una serie de procedimientos y regulaciones que dichos vehículos deben cumplir. De hecho, si la introducción de este tipo de vehículos en el espacio aéreo se ha visto retrasada no ha sido porque haya una dependencia en una tecnología que no haya sido todavía del todo desarrollada, si no que ha sido, más bien, debido al hecho de que había un déficit a la hora de certificar requisitos y definir una sería conceptos procedimentales. Para suplir estas deficiencias se ha dedicado el documento (15), que más que un artículo de investigación es un documento oficial donde se define un sistema ATM (Gestión del Tráfico Aéreo) que estaría debidamente preparado para cumplir las siguientes tareas:

* Establecimiento de los requisitos de aeronavegabilidad y reglamentos comunes para UAVs.
* Establecimiento de la regulación y estandarización del tráfico aéreo y los procedimientos derivados para la integración adecuada de UAVs en el Sistema de Gestión del Tráfico Aéreo.

Por otro lado, y ahora si ya más centrado en la investigación, hay que destacar una serie de trabajos que se centran en modelar UAVs. En (16) se propone un algoritmo para solucionar la limitación debida a posibles oclusiones en el sistema de percepción de los UAVs. Dicho algoritmo modela las limitaciones de los vuelos de estos vehículos de una manera más realista a lo existente anteriormente, y nos confirma la importancia de la oclusión a la hora de la planificación de rutas en el vuelo.

Otro modelo de UAV puede verse en (17) donde se presenta un modelo genérico de UAV a escala reducida enfocado en las claves de los esfuerzos físicos que actúan en la dinámica del avión (física del avión) con el fin de ser lo suficientemente simple como para diseñar un controlador del vehículo.

Por otra parte, el trabajo (18) presenta un framework basado en agentes para modelar UAVs, en donde cada vehículo de este tipo se descompone en múltiples agentes en una serie de niveles. Los principales agentes serán el físico y el lógico. El agente físico será el principal responsable de las interacciones físicas del UAV, como pueden ser maniobras hacia el siguiente waypoint, comprobaciones para asegurarse que no va a colisionar con ningún objeto, actualización del estado del combustible, comprobación de los sensores, transmisión de mensajes pendientes, etc. Por otro lado, el agente lógico es el responsable de generar la lista de waypoints y mandársela al agente físico, y tiene una serie de tareas como decirle a un agente físico transmisor que mande un determinado mensaje.

Simulación y Gestión de Tráfico Aéreo

En cuanto a herramientas de simulación se puede hacer uso del documento (19). Este documento, que hace un resumen de los distintos entornos de simulación en el ámbito de la investigación que explicaremos a continuación, presenta el diseño y la metodología de una simulación multiagente de la ATFM (gestión del flujo del tráfico aéreo) usando diferentes estrategias de selección de rutas simples. En dicho trabajo se presenta el concepto CATFM (Gestión del Tráfico Aéreo Colaborativo) que supone la existencia de múltiples entidades independientes con sus propias creencias y deseos. Este concepto aumenta el intercambio de información y distribuye alguno de los elementos de decisión.

Como hemos comentado antes en (12) se hace una distinción entre una serie de simuladores principalmente centrados en el tráfico aéreo. Se distingue entre los siguientes sistemas:

* ACES (Sistema Airspace Concept Evaluation System) (20) es una simulación basada en agentes distribuidos del NAS (Sistema Nacional Aeroespacial de EEUU), que incluye pero no se restringe al ATFM. Este sistema es capaz de hacer más eficientes las evaluaciones de coste-beneficio basándose en conceptos que van más allá de elementos particulares.
* IMPACT es un modelo de los agentes de la FAA y de las aerolíneas basados en enjambre, usados para evaluar tres tipos de reducciones: en la planificación anticipada, programas de retrasos en tierra (GDPs) sin intercambio de información, y GDPs con horarios de vuelo compartido.
* STEAM (21) (herramienta que permite la representación explícita de los objetivos y planes de un equipo y compromisos de conjuntos de equipos) usada para evaluar un sistema colaborativo para sincronización del tráfico en tiempo real. Dicha sincronización es aquella que tratan los controladores de sectores individuales cuando gestionan vuelos que pasan por múltiples sectores.
* MIDAS (Sistema de análisis y diseño integrado de la interacción hombre-máquina) es un modelo basado en agentes de la eficiencia humana cuando interacciona con interfaces máquina. Esta herramienta ha sido usada con ATFM y enfatiza las capacidades y limitaciones de las facultades cognitivas de los humanos en lugar de la complejidad de la toma de decisiones.

Otras herramientas que no están en este artículo son:

* FACET (22), un modelo físico del espacio aéreo de EEUU desarrollado para modelar eficientemente la complejidad del ATFM y que se basa en la propagación a través del tiempo de las trayectorias propuestas de los vuelos. Es una herramienta cuyo uso está muy extendido dentro de la FAA y de la NASA.
* AVDS (Simulador de Diseño Visual de la Aviación) [5]

Por otro lado, nos encontramos con una serie de trabajos que hacen uso del modelado basado en agentes. Entre estos trabajos podemos distinguir aquellos centrados en el ATFM y los centrados en la gestión de los AOCC (Centros de Control de las Operaciones de las Aerolíneas).

En cuanto al primer tipo podemos ver un ejemplo en (23) donde se presenta una tecnología multi-agente para vehículos autónomos ya sean tripulados o no tripulados. El sistema integra una serie de métodos cooperativos y no-cooperativos de anticolisión que se implementan por los distintos agentes y que son validados y comparados en los experimentos del artículo. Otro trabajo es (22) donde nos muestran un algoritmo adaptativo y distribuido del ATFM que puede implementarse y probarse de manera sencilla con la herramienta FACET, el método está basado en una serie de agentes que representan ciertas regiones y donde cada agente determina la separación entre los aviones que se aproximan a la región. Estos agentes usan un aprendizaje por refuerzo para aprender políticas de control, y en el artículo se estudian las distintas funciones que premian o asignan pesos al algoritmo y las diferentes formas de estimar estas funciones.

El trabajo (24) describe la experiencia de usar una arquitectura de agente BDI (modelo de Creencia-Deseo-Intención) para desarrollar una simulación de un ATFM colaborativo y los problemas de eficiencia que encuentran. Como conclusión nos propone como aproximación más eficiente una que combina componentes con agentes BDI y sin ellos y siguieren una serie de recomendaciones:

1. Usar BDI para procesos cognitivos explícitos. El paradigma BDI se adapta perfectamente cuando queremos modelar toma de decisiones que están bien definidas.
2. Importancia del nivel de granularidad. No hay necesidad de modelar detalles de toma de decisiones cuando tú estás interesado en el resultado, más que el proceso mismo.
3. Considerar las propiedades de ejecución del lenguaje. Toda implementación BDI se convierte en código ejecutado en un ordenador, y entender las propiedades del algoritmo a veces es necesario. Por otro lado, ya que la eficiencia se degrada con el número de agentes introducidos, a veces es conveniente combinar procesos de múltiples agentes en un sólo agente.

**Bibliography**

1. *Conflict Resolution for Air Traffic Management: A Study in Multi-Agent Hybrid Systems.* **Claire Tomlin, George J. Pappas, and Shankar Sastry.** April 1998, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 43, pp. 509--521. 4.

2. **EUROCONTROL.** *EUROCONTROL SPECIFICATIONS FOR THE USE OF MILITARY UNMANNED AERIAL VEHICLES AS OPERATIONAL AIR TRAFFIC OUTSIDE SEGREGATED AIRSPACE.* 2007. http://www.barnardmicrosystems.com/download/EUROCONTROL\_MIL\_UAV\_ATM\_SPEC\_2007.pdf.

3. *Human performance models of pilot behaviour.* **Foyle, D. C., Hooey, B. L., Byrne, M. D., Corker, K. M., Deutsch, S., Lebiere, C.** Santa Monica, CA : s.n., 2005. The Human Factors and Ergonomics Society 49th Annual Meeting. pp. 1109-1113.

4. **Daniel J. Garland, John A. Wise and V. David Hopkin.** *Handbook of Aviation Human Factors.* [ed.] Lawrence Erlbaum Associates. 1999. ISBN 0-8058-1680-1.

5. **JSBSim.** JSBSim flight dynamics model. [Online] http://jsbsim.sourceforge.net/ .

6. **FlightGear Flight Simulator.** FlightGear Flight Simulator. [Online] http://www.flightgear.org/.

7. **OpenEaagles.** OpenEaagles. [Online] http://www.openeaagles.org/.

8. **AVIATOR VISUAL DESIGN SIMULATOR.** *Manual, AVIATOR VISUAL DESIGN SIMULATOR (AVDS) User.* http://www.rassimtech.com/documentation/AVDSManual.pdf.

9. *FACET: Future ATM Concepts Evaluation Tool.* **Bilimoria, K.** Napoli, Italy : s.n., 2000. 3rd USA/Europe ATM 2001 R&D Seminar.

10. *The design of FACET to support use by airline operations centers.* **Smith, P.** 2004 : s.n., IEEE.

11. **Flight Explorer Inc.** Flight Explorer. [Online] http://www.flightexplorer.com/.

12. *A Multiagent Simulation of Collaborative Air Traffic Flow Management.* **Shawn R. Wolfe, Peter A. Jarvis, Francis Y. Enomoto, Maarten Sierhuis,Bart-Jan van Putte.** [ed.] Franziska Klügl Ana L. C. Bazzan. s.l. : Information Science Reference, 2009, Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering, pp. 357-381. NASA Ames Research Center.

13. *Modeling Distributed Human Decision-Making in Traffic Flow Management Operations.* **Keith C, C.** Napoli, Italy : s.n., 2000. 3rd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar.

14. *INGENIAS development kit: a visual multi-agent system development environment.* **Jorge J. Gómez-Sanz, Rubén Fuentes, Juan Pavón, Iván García-Magariño.** 2008. AAMAS (Demos)'2008. pp. 1675-1676.

15. *Improving air traffic management through agent suggestions.* **Adrian K. Agogino, Kagan Tumer.** 2009. AAMAS (2) 2009. pp. 1271-1272.

16. **IABG Dept. Airborne Air Defence.** *CARE Innovative Action, Preliminary Study on Integration of Unmanned Aerial Vehicles into Future Air Traffic Management.* 2001.

17. *Autonomous UAV Surveillance in Complex Urban Environments.* **Eduard Semsch, Michal Jakob, Dusan Pavlícek, Michal Pechoucek.** 2009. IAT 2009. pp. 82-85.

18. *Generic Nonlinear model of reduced scale UAV.* **Cheviron, T., Chriette, A., & Plestan, F.** Kobe, Japan : s.n., 2009. IEEE International Conference on Robotics & Automation. pp. 3271-3276.

19. *An Agent Based Framework for Modeling UAVs.* **N. Huff, A. Kamel, and K. Nygard.** 2003. The 16th International Conference on Computer Applications in Industry and Engineering (CAINE03).

20. *Fast-Time Simulation System for Analysis of Advanced Air Transportation Concepts.* **Sweet, D. N., Manikonda, V., Aronson, J. S., Roth, K., & Blake, M.** Monterey, California : s.n., 2002. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit.

21. *Agent architectures for flexible, practical teamwork.* **Tambe, M.** Providence, Rhode Island : s.n., July, 1997. American Association for Artificial Intelligence Conference (AAAI-2007).

22. *Distributed agent-based air traffic flow management.* **Adrian K. Agogino, Kagan Tumer.** Honolulu, Hawaii : s.n., May, 2007. Sixth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems.

23. *AGENTFLY: A multi-agent airspace test-bed.* **D. Sislak, P. Volf, S. Kopriva, and M. Pechoucek.** May, 2008. 7th Intl. Conf. on Autonomous Agents and MultiAgent Systems.

24. *To bdi or not to bdi.* **S. Wolfe, M. Sierhuis, and P. Jarvis.** 2008. Design choices in an agent-based Traffic Flow Management Simulation Multiconference.

Glosario

ABMS Agent-Based Modeling and Simulation

ACES Airspace Concept Evaluation System

AOCC Airport Operations Control Center

ARTCC Air Route Traffic Control Center

ATM Air Traffic Management

ATFM Air Traffic Flow Management

AVDS Aviator Visual Design Simulator

BDI Belief-Desire-Intention software mode

CATFM Collaborative Air Traffic Flow Management

Eurocontrol European Organisation for the Safety of Air Navigation

FAA Federal Aviation Administration of USA

FACET Future ATM Concepts Evaluation Tool

GDP Ground Delay Program

IMPACT Intelligent agent-based Model for Policy Analysis of Collaborative Traffic flow management

MAS Multi-Agent System

MIDAS The Man-Machine Integrated Design and Analysis System

NAS National Aispace System

STEAM Shell for TEAMwork

UAV Unmanned aerial vehicle

VFR Visual Flight Rules

IFR Instrumental Flight Rules