

## ENTORNO DE SIMULACIÓN DE TRÁFICO AÉREO EXPERIMENTAL BASADO EN SISTEMAS MULTIAGENTE

En este artículo se presenta una implementación de un simulador de tráfico aéreo experimental que modela el comportamiento de diferentes tipos de aeronaves mientras ejecutan un plan de vuelo o siguen las órdenes procedentes de un Controlador de Tráfico Aéreo (ATC). El simulador ha sido implementado como un Sistema Multiagente con el fin de considerar los futuros escenarios de tráfico aéreo donde las aeronaves comparten sus datos de navegación con el ATC y con otras aeronaves. Por tanto, este simulador no solo proporciona datos sintéticos del tráfico aéreo que permitan diseñar y evaluar algoritmos específicos para la gestión del tráfico aéreo (detección y resolución de conflictos, secuenciación de aeronaves durante el descenso y aproximación al aeropuerto, etc.), si no que también admite futuras ampliaciones para incorporar procedimientos de negociación aire-tierra y aire-aire así como nuevos interfaces hombre-máquina para llevarlos a cabo.

**José Miguel Canino  
Rodríguez  
Salvador Durá Bernal  
Luis Gómez Déniz**

*In this paper we present a model to implement an experimental air traffic simulator which accounts the aerodynamic behaviour of different aircraft types while executing a flight plan or orders from an Air Traffic Controller (ATC). The simulator has been implemented as a Multi-Agent System in order to consider future scenarios of air traffic where the aircrafts can share their own navigation data with the ATC and with other aircraft. Thus this simulator not only provides aircraft synthetic data to evaluate algorithms for the management of the air traffic (detection and resolution of conflicts, sequence of aircraft during the descent and approach to the airport, etc.), but also it allows further extensions to evaluate air-ground and air-air negotiation procedures and as well as new man-machine interfaces.*

### INTRODUCCIÓN

Los futuros sistema de Comunicación, Navegación, Vigilancia y Gestión del Tráfico Aéreo (CNS/ATM), permitirán que los datos de navegación de cualquier aeronave (posición, velocidad, rumbo, plan de vuelo, etc.) que se encuentren en una determinada región del espacio aéreo puedan ser enviados desde sus sistemas de navegación a bordo al control de tránsito aéreo o a otras aeronaves circundantes (Morales, 2001). Esta facilidad para compartir datos, unido a la flexibilidad de rutas basadas en la navegación por satélite, sugiere la necesidad de elaborar nuevos procedimientos tanto para la navegación aérea como para la gestión del tránsito aéreo.

En este contexto, la RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics) ha introducido el concepto *free-flight*. Este concepto se define como "...una operación de vuelo segura y eficiente que opera bajo las reglas de vuelo instrumental (IFR) en la que los operadores tienen libertad para seleccionar sus sendas y velocidades en tiempo real. Las restricciones de tráfico aéreo están sólo impuestas para asegurar la separación, para impedir exceder la capacidad del aeropuerto, para prevenir vuelos no autorizados en determinadas regiones o para mantener la seguridad del vuelo" (Rtca, 1997; Nasa, 1999).

La implementación de nuevos procedimientos operacionales para en-



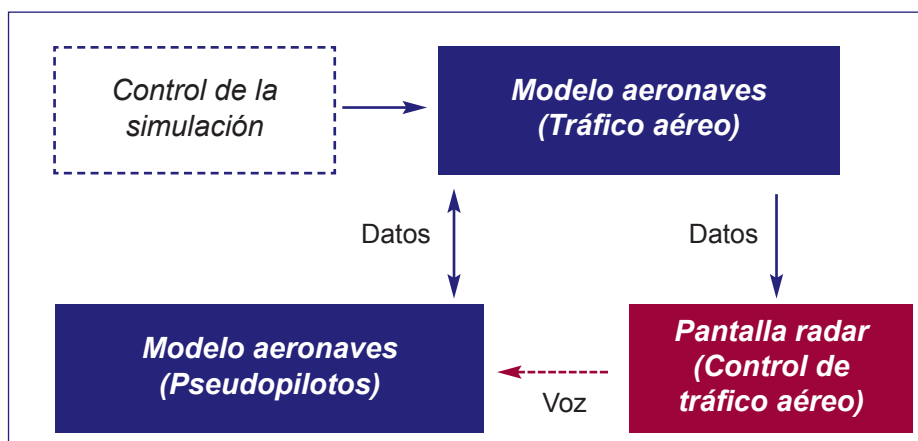


Figura 1. Esquema de un simulador de tráfico aéreo convencional

tráfico aéreo del mismo modo que haría un piloto cuando controla su avión.

Los simuladores de tráfico aéreo experimentales que pretenden simular entornos de tráfico aéreo *free-flight* mantienen esta arquitectura pero deben incorporar nuevas funciones tales como la posibilidad de establecer comunicaciones y negociaciones aire-tierra y aire-aire, exclusivamente en base al intercambio de datos mediante mensajes electrónicos. Además, cada aeronave debe proporcionar información no sólo de su estado actual (posición, rumbo y velocidad), si no también de sus intenciones (plan de vuelo previsto, estimación de trayectorias, etc.).

El desarrollo de un simulador con las características descritas en el párrafo anterior hace aconsejable el uso de SMA, porque ésta tecnología facilita la implementación de diferentes agentes capaces de interactuar y negociar entre sí para lograr sus respectivos objetivos.

Para implementar SMA existen numerosas plataformas de desarrollo de agentes. Una descripción detallada de las características de cada una de ellas se puede encontrar en (Pérez et ál., 2004). En nuestro caso se ha optado por utilizar la plataforma de desarrollos de agentes JADE (Java Agent DEvelopment Framework) (Telecom, 2000). Dicha plataforma

está constituida por un conjunto de librerías programadas en Java para crear agentes. Los agentes llevan a cabo varias tareas concurrentes en respuesta a diferentes eventos externos. Estos agentes pueden comunicarse entre sí mediante un lenguaje de comunicación de agentes (ACL) estandarizado por FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) (Fipa, 2002). El lenguaje FIPA-ACL se basa en la teoría de los actos del habla (*speech act theory*) que asigna una intención a cada acto comunicativo.

El funcionamiento y relación que existe entre los agentes que constituyen nuestro simulador está representado en el esquema de la Figura 2. En ella, los agentes se muestran como cajas amarillas y los mensajes entre agentes como flechas rojas. Las flechas azules representan los agentes lanzados por el agente encargado de proporcionarles los parámetros de la configuración inicial de la simulación (Agente Configuración). Las flechas negras indican las partes de la interfaz gráfica u objetos que pertenecen a cada agente.

Como se puede apreciar en el gráfico anterior, la aplicación está constituida por los agentes físicos siguientes:

- Los Agentes Aeronaves, que simulan el comportamiento de vuelo de aeronaves reales, pudiendo ejecutar tanto planes de vuelos

**La aplicación está constituida por los agentes físicos Aeronave, ATC, Meteorología y Terreno**

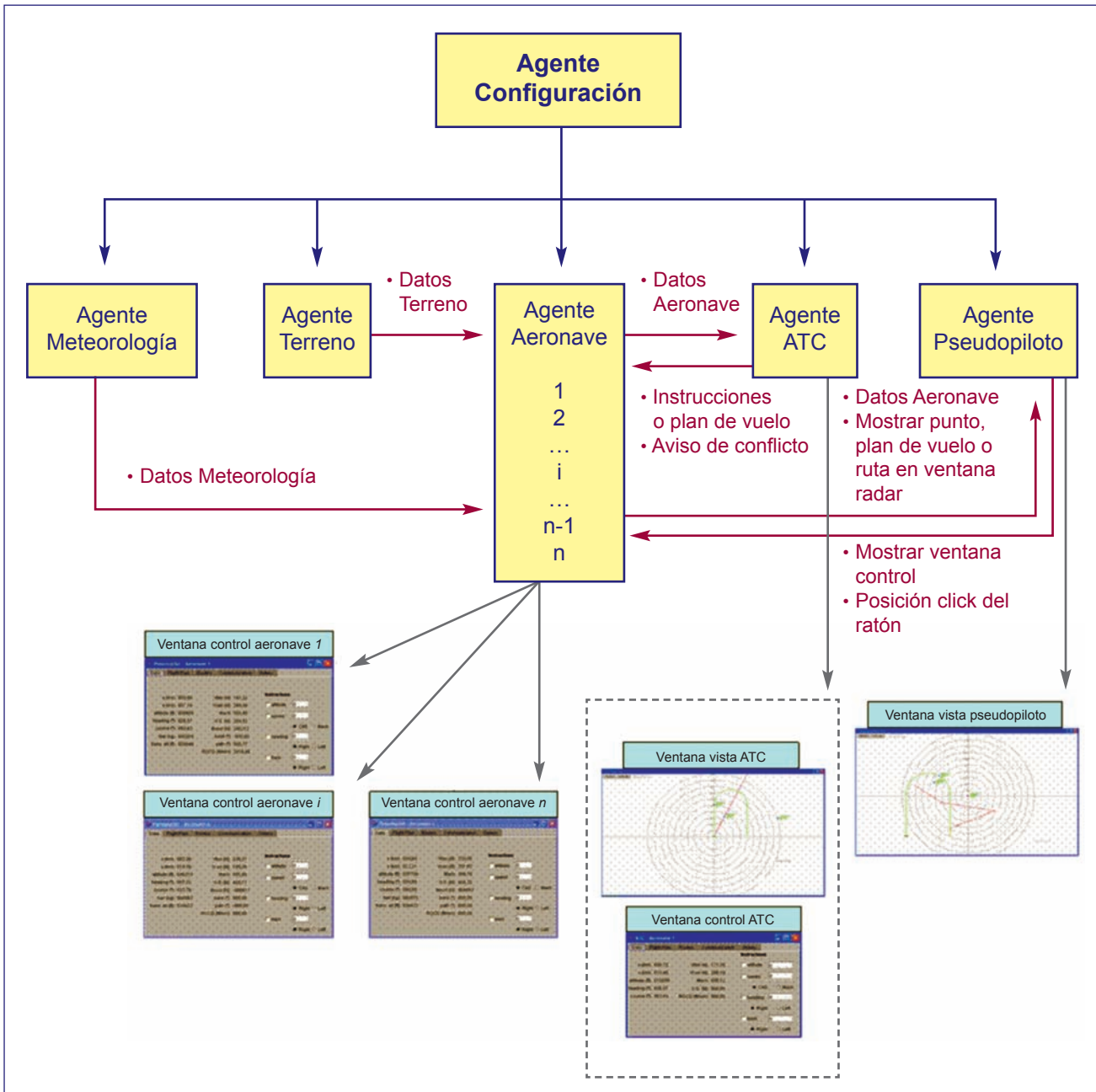


Figura 2. Esquema general de la aplicación

**Los Agentes Aeronaves simulan el comportamiento de vuelo de aeronaves reales, pudiendo ejecutar tanto planes de vuelos como órdenes puntuales para la modificación de la altitud, el rumbo y/o la velocidad**

como órdenes puntuales para la modificación de la altitud, el rumbo y/o la velocidad. Estas órdenes puntuales se pueden introducir desde una ventana de control específica para cada aeronave.

- El Agente ATC, que dispone de la información sobre la posición y planes de vuelo de las aeronaves y puede enviar diversos tipos de mensajes a las aeronaves. El Agente ATC dispone de una pan-

talla de visualización gráfica para representar la evolución temporal de las distintas aeronaves (Ventana Radar ATC) y de una ventana de control a partir de la cual el usuario (controlador ATC) puede generar cualquier instrucción ATC dirigida a una aeronave en particular. Estas instrucciones son ejecutadas por los agentes aeronaves bien de forma automática al recibirse el mensaje ATC o bien



aeronave como una masa puntual sujeta a las leyes de la aerodinámica y representan la variación temporal del vector de estado. Por tanto el vector de estado,  $\mathbf{x}(t)$ , se obtiene en cada instante integrando en el tiempo el sistema de ecuaciones (1).

En dicho sistema  $u_1$ ,  $u_2$  y  $u_3$  representan la potencia, el ángulo de alabeo y el ángulo de senda respectivamente. Asimismo  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$  son las componentes del vector viento. El resto de coeficientes que aparecen en la expresión anterior son coeficientes aerodinámicos y parámetros característicos de cada modelo de aeronave en particular. Dichos coeficientes y parámetros están disponibles en la Base de Datos de Aeronaves (BADA) de EUROCONTROL (Eurocontrol, 2004). BADA está constituida por un conjunto de ficheros ASCII que proporcionan información de los parámetros aerodinámicos y velocidades

de representar como un sistema constituido por dos bloques principales (Figura 3). Un primer bloque denominado Dinámica de Aeronave que modela el comportamiento aerodinámico, es decir, el que implementa e integra las ecuaciones (1) y un segundo bloque, denominado FMS (Flight Management System), que calcula las entradas de control  $u_1$ ,  $u_2$  y  $u_3$  para que el desplazamiento de la aeronave se ajuste a las condiciones impuestas por el plan de vuelo o por las instrucciones ATC.

El cálculo de las entradas  $u_1$ ,  $u_2$  y  $u_3$  depende fundamentalmente del modo de vuelo. El modo de vuelo hace referencia al estado discreto en el que se encuentra la aeronave. Es decir, indica si ésta se encuentra en ascenso, descenso o a nivel de vuelo (Climb Mode) o bien si está acelerando, desacelerando o a velocidad constante (Acceleration Mode), etc.

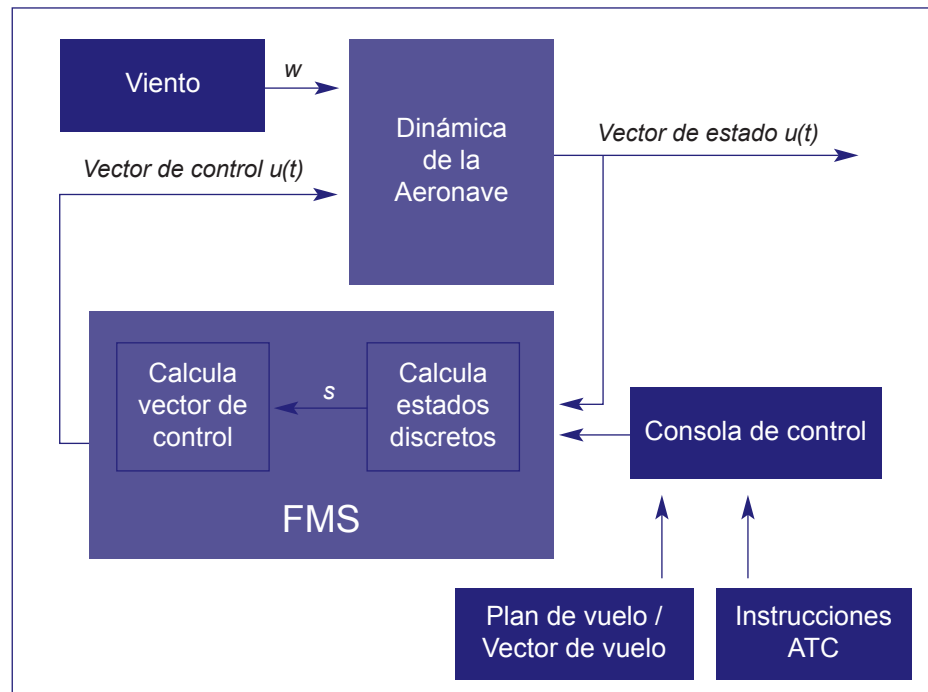


Figura 3. Diagrama de bloques del modelo de aeronave

operativas estándar de unas 295 aeronaves civiles.

El sistema dinámico expresado a través de las ecuaciones (1) se pue-

De acuerdo con el trabajo propuesto por (Glover et ál., 2004) se han definido hasta ocho estados discretos distintos. El valor de cada uno de los estados discretos se obtiene



La comunicación bidireccional aire-tierra entre los agentes aeronave y el agente ATC se realiza a través de los siguientes mensajes:

- a) Mensajes enviados por la aeronave al ATC:
  - Mensaje para informar sobre el vector de estado.
  - Mensaje para informar sobre la modificación de las altitudes del plan de vuelo después de calcular el TOD.
- b) Mensajes recibidos en la aeronave procedentes del ATC:
  - Mensajes de instrucción.
  - Mensajes de detección de conflicto con otras aeronaves.

A partir de este núcleo de comunicaciones aire-tierra se pueden implementar nuevos tipos de mensajes en futuras ampliaciones con el fin de establecer negociaciones más complejas entre aeronave y ATC o entre aeronaves.

Además de las comunicaciones anteriores, existen otras comunicaciones con el Agente Meteorología (para obtener información atmosférica) y el Agente Terreno (para solicitar las rutas disponibles). También existe una comunicación entre Agente Aeronave y Agente Pseudopiloto que equivale al envío de información entre el agente físico aeronave a un agente interfaz hombre-máquina que representa al CDTI.

### AGENTE ATC: COMPORTAMIENTO Y COMUNICACIONES

El agente ATC se encarga de recibir información periódica de todas las aeronaves y de representarla en la Ventana de Radar de ATC. A partir de estos datos, un algoritmo específico se encarga de detectar un conflicto cada vez que dos aeronaves se aproximen entre sí a una distancia inferior a cinco millas náuticas en el plano horizontal y mantengan una diferencia de altitud inferior a mil pies. Una vez detectado el conflicto, se activa el algoritmo de resolución de conflicto que generará las correspondientes

instrucciones a las aeronaves implicadas para resolverlo. El algoritmo de resolución de conflicto implementado no pretende ser el más adecuado desde el punto de vista operacional, si no más bien constituir una acción a partir de la cual generar un comportamiento de respuesta del agente ATC a una situación conflictiva entre aeronaves. Tanto la detección del conflicto como las instrucciones ATC para su resolución serán enviadas a través de sendos mensajes a las aeronaves implicadas.

El comportamiento del ATC consiste en la recepción de mensajes de las aeronaves (comportamiento cíclico). Los datos procedentes de estos mensajes son utilizados para presentarlos en la pantalla radar ATC (comportamiento periódico) y para detectar posibles conflictos entre dos o más aeronaves. Los algoritmos de detección y resolución de conflictos así como el envío de mensajes a las aeronaves implicadas, en caso de que éste se produzca, se han implementado dentro de otro comportamiento periódico.

Además de las comunicaciones con el Agente Aeronave, el Agente ATC se comunica con el Agente Terreno para obtener datos relativos a las rutas disponibles. En posteriores ampliaciones de este trabajo se pueden mejorar las capacidades del Agente Terreno y la comunicación entre éste y el ATC con el fin de mantener, por ejemplo, una información actualizada de la saturación de tráfico aéreo en cada ruta.

### APLICACIONES Y RESULTADOS

Para ilustrar algunas de las capacidades de la aplicación descrita en este artículo, se presenta un escenario con dos aeronaves: la primera de ellas, que denominaremos *CESSNA*, se trata de una aeronave del tipo *Cessna Golden Eagle*, que aparece en el instante de tiempo 0 en la ruta número 0 con una altura inicial de 10,000 pies; la segunda aeronave,





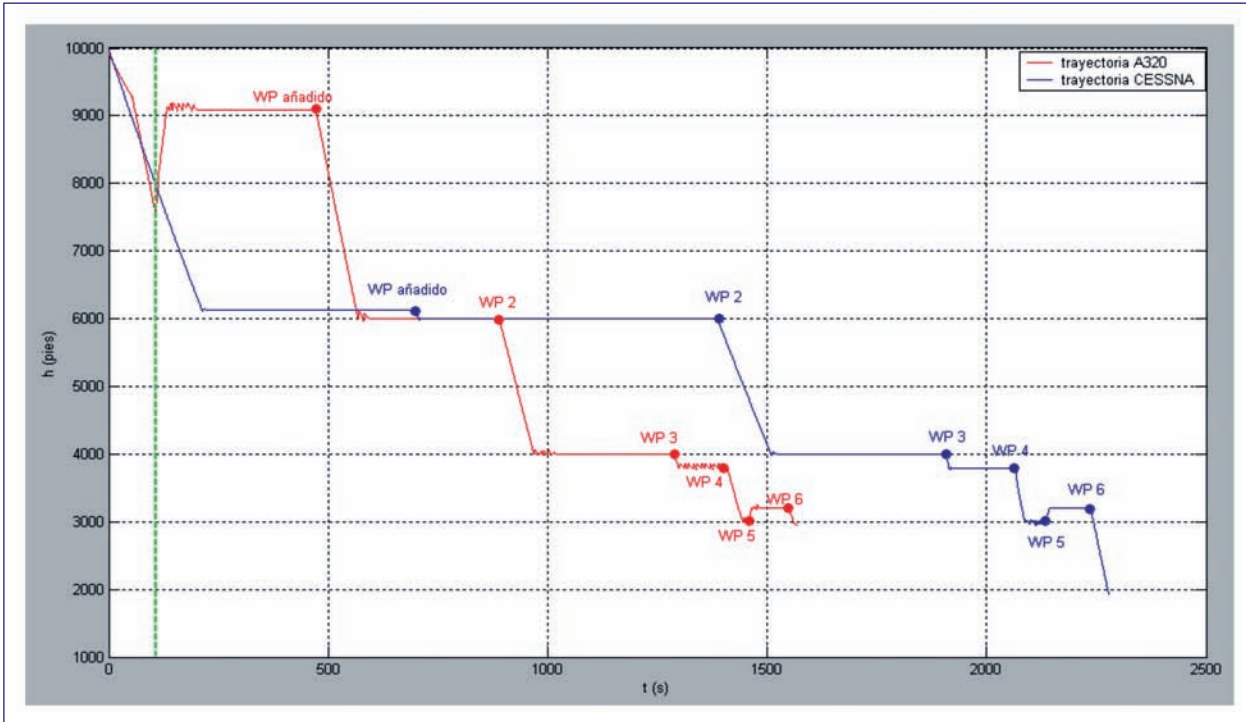


Figura 6. Trayectoria vertical de las aeronaves

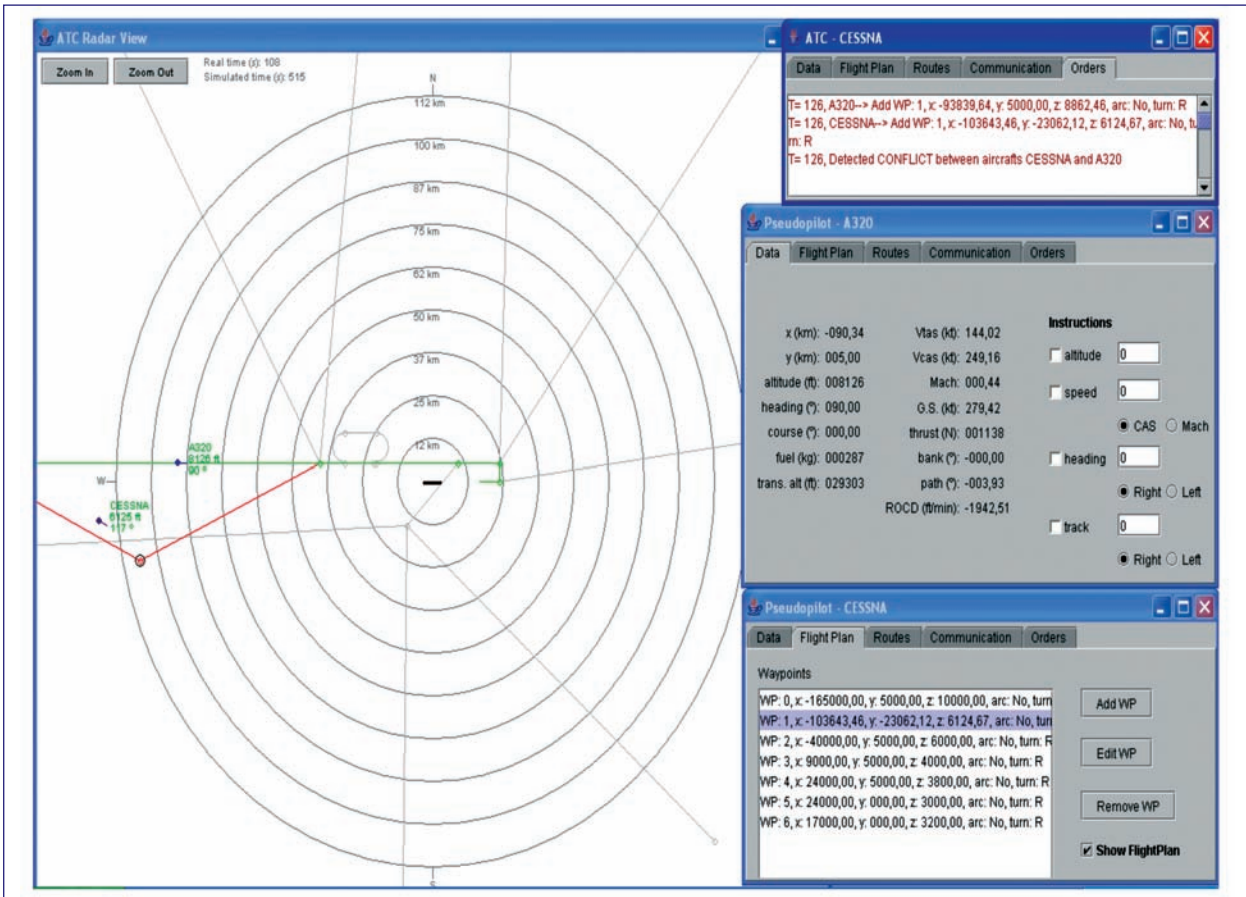


Figura 7. Captura de pantalla de la aplicación para el escenario descrito



- Fipa, 2002. Foundation for Intelligent Physical Agents *Specifications*, <http://www.fipa.org/specifications/index.html> (2002).
- Glover et ál., 2004. W. Glover y J. Lygeros. *A Multi-Aircraft Model for Conflict Detection and Resolution Algorithm Evaluation*. Technical Report WP1, Deliverable D1.3, HYBRIDGE, 2004.
- Hoekstra, 2001. Hoekstra, J. M. *Designing for Safety: the Free Flight Air Traffic Management Concept*. Ph. D. Dissertation, Delft University of Technology, 2001.
- Morales, 2001. Juan de Mata Morales López. *CNS/ATM*. Cuadernos Aena nº 2. AENA (2001).
- Nasa, 1999. NASA. "Concept Definition for Distributed Air/Ground Traffic Management (DAG-TM). V 1.0" NASA Advanced Air Transportation Technologies Project, 1999.
- Oaci, 1998. Planificación de la Navegación Aérea para los sistemas CNS/ATM. OACI, Doc. 9750, 1998.
- Perez et ál., 2004. Agentes Software y sistemas Multia-agentes; José Luis Pérez de la Cruz, Juan Pavón Mestras; Pearson Prentice Hall, 2004.
- Rtca, 1997. Proceedings of RTCA, Inc. Annual Symposiums, *Free Flight: New Concepts, A New Architecture*, New Opportunities, 1997.
- Telecom, 2000. Telecom Italia Lab, *Java Agent Development Framework (JADE)* webpage, <http://jade.tilab.com>, 2000.

## BIOGRAFÍAS

**JOSÉ MIGUEL CANINO** es Profesor Titular de Escuela Universitaria del Departamento de Señales y Comunicaciones de la ULPGC. Es Licenciado en Ciencias Físicas por la UNED, Ingeniero Técnico de Telecomunicación (ULPGC) y está en posesión del Título de Piloto Comercial de Avión. Actualmente realiza su Tesis Doctoral en el ámbito de los sistemas y procedimientos de navegación y gestión del tráfico aéreo en entornos de vuelo free-flight. Ha realizado diversas estancias de investigación en la UPM donde ha trabajado en el seno del Grupo de Procesado de Datos y Simulación del Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicación dicha Universidad.

**SALVADOR DURÁ BERNAL** es Ingeniero Superior de Telecomunicación por la ULPGC. Actualmente realiza su Tesis Doctoral en el Centro de Neurociencia Teórica y Computacional de la Universidad de Plymouth (Reino Unido), en el ámbito de modelos computacionales del Sistema Visual basados en redes Bayesianas jerárquicas.

**LUIS GÓMEZ DÉNIZ** es Profesor Titular de Universidad del Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática de la ULPGC, donde imparte su docencia en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación desde el año 1991. Licenciado en Ciencias Físicas por la UNED y Doctor Ingeniero de Telecomunicación por la ULPGC. Su campo de trabajo e investigación se centra en la optimización y métodos numéricos aplicados a la ingeniería. Actualmente desarrolla su investigación en el CTM (Centro de Tecnología Médica) de la ULPGC en el campo de la elastografía por ultrasonidos y en la optimización de algoritmos aplicados a la navegación y gestión del tráfico aéreo.

Patrocinador de esta investigación:

**BELEYMA**