

SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES DE TRÁFICO AÉREO

ORIÓN GARCÍA GALLARDO

MÁSTER EN INVESTIGACIÓN EN INFORMÁTICA, FACULTAD DE INFORMÁTICA,
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID



Trabajo Fin Máster en Sistemas Inteligentes

Septiembre de 2011

Director: RUBÉN FUENTES FERNÁNDEZ

Convocatoria: Septiembre 2011
Calificación: 10 (SOBRESALIENTE)

Autorización de Difusión

ORIÓN GARCÍA GALLARDO

Septiembre de 2011

El abajo firmante, matriculado en el Máster en Investigación en Informática de la Facultad de Informática, autoriza a la Universidad Complutense de Madrid (UCM) a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a su autor el presente Trabajo Fin de Máster: “Simulación basada en agentes de tráfico aéreo”, realizado durante el curso académico 2010-2011 bajo la dirección del Dr. Rubén Fuentes Fernández en el Departamento de “Ingeniería del Software e Inteligencia Artificial”, y a la Biblioteca de la UCM a depositarlo en el Archivo Institucional E-Prints Complutense con el objeto de incrementar la difusión, uso e impacto del trabajo en Internet y garantizar su preservación y acceso a largo plazo.

Resumen en castellano

La importancia del transporte aéreo genera crecientes necesidades de estudiar y comprender sus distintas facetas. En esta tarea cabe destacar el papel clave de las simulaciones. Éstas han ayudado tanto a la hora de saber cuáles son los factores claves que intervienen en este transporte y en qué modo, como en la aplicación de nuevas técnicas, estrategias y tecnologías para su mejora.

Dada la cantidad y complejidad de los factores involucrados, las simulaciones suelen centrarse en algunos aspectos particulares del transporte aéreo: el vuelo de aeronaves individuales, la gestión del vuelo de múltiples aeronaves y la interacción entre las personas participantes. Esta parcelación hace que las simulaciones frecuentemente simplifiquen en exceso algunos aspectos en los que no se centran. Además, la constante evolución del transporte aéreo hace necesario adaptar estas simulaciones a los nuevos escenarios que surgen. Aquí hay que destacar por su novedad y potencial impacto los esfuerzos para introducir aviones comerciales no tripulados en el espacio aéreo actual.

Para intentar abordar algunas de estas carencias, este trabajo considera la utilización de aproximaciones basadas en agentes software y de desarrollo dirigido por modelos para estas simulaciones. Los agentes software permiten implementar sistemas muy modulares donde es sencillo representar comportamientos, estados e interacciones mediante metáforas de grupos de personas. Por ello facilitan estudiar la influencia que tienen sobre los participantes en este transporte el entorno físico y social, así como los distintos comportamientos y estados emocionales tanto propios como de las personas que les rodean. El desarrollo dirigido por modelos permite generar las simulaciones de forma semi-automatizada a partir de esos modelos.

La aproximación propuesta se ilustra con el desarrollo de los modelos para estudiar las interacciones piloto-aeronave y piloto-controlador, y un sistema basado en ellos. Se presta especial atención a los intercambios de información entre los participantes y a la influencia en su comportamiento de su estado. Este caso de estudio muestra la viabilidad y flexibilidad de la propuesta para hacer explícito el conocimiento del dominio empleado y adaptarlo a nuevos requisitos.

Palabras clave

Tráfico aéreo, Simulación, Simulación Basada en Agentes, Comportamiento, Piloto, Avión, Controlador Aéreo, Factores Humanos, Agentes Software.

Resumen en inglés

The relevance of air transport generates a growing need to study and understand its different aspects. Simulations play a key role for this task. They support researchers to know what the key aspects involved in this transport are and how they affect it, as well as to discover and apply new techniques, strategies and technologies to improve it.

Given the number and complexity of the involved factors, simulations tend to focus on particular aspects of air transport: the flight of an individual aircraft, the traffic management in the airspace of multiple flights, and the interactions between participants. This fragmentation makes that simulations frequently over-simplify those aspects outside their focus. In addition, the ever evolving air transport demands from simulations their continuous adaptation to the new scenarios that arise. Here are notable for their novelty and potential impact the efforts to introduce unmanned commercial aircrafts in the airspace.

In order to address some of these shortcomings, this paper considers the use of approaches based on software agents and model-driven processes to develop these simulations. Agents are useful to develop highly modular systems where it is easy to represent behaviors, state and interactions with metaphor of groups of people. Therefore, they facilitate studying the influence on participants of the physical and social environment, and the different behaviors and emotional states, both their own and those of people around them. The model-driven development facilitates the semi-automated generation of simulations from these models.

This approach is illustrated with the development of models to study the interactions aircraft pilot and pilot-controller, and a system based on them. The study pays particular attention to the exchange of information among participants and the influence of participants' state in their behavior. This case study shows the feasibility and flexibility of the proposal to make explicit the applied domain knowledge and adapt it to new requirements.

Keywords

Air traffic, Simulation, Agent based simulation, Behavior, Pilot, Plane, Air Controller, Human Factors, Software Agents.

Índice de contenidos

Autorización de Difusión	iii
Resumen en castellano	v
Palabras clave.....	v
Resumen en inglés	vi
Keywords	vi
Índice de contenidos.....	7
Tabla de Figuras.....	9
Agradecimientos	10
1. Introducción	11
2. Conceptos básicos de navegación aérea	15
3. Estado del arte.....	19
3.1. Factores humanos en aviación	19
3.2. UAVs	20
3.3. Simulación y Gestión de Tráfico Aéreo	21
3.3.1. Dinámica del vuelo.....	22
3.3.2. Navegación aérea	23
3.3.3. Factores humanos	25
3.3.4. UAVs.....	25
4. Requisitos del Sistema	27
4.1. Aspectos del tráfico aéreo.....	27
4.1.1. Vuelo	27
4.1.2. Aeronaves.....	28
4.1.3. Pilotos.....	29
4.1.4. Controladores	29
4.2. Desarrollo.....	29
5. Entorno de simulación	33
5.1. Especificación.....	33
5.1.1. Casos de uso	33
5.1.2. Objetivos principales del sistema	34
5.1.3. Generación y obtención del plan de vuelo	35
5.1.4. Seguimiento del plan de vuelo	37
5.1.4.1. Arranque del avión	38
5.1.4.2. Descomposición del plan de vuelo	40

5.1.4.3.	Toma de decisiones en un tramo	40
5.1.4.4.	Ejecución de maniobras	42
5.1.4.5.	Comprobaciones tras la maniobra	43
5.1.5.	Gestión de conflictos	44
5.1.5.1.	Detección de conflictos.....	46
5.1.5.2.	Generación y comunicación de órdenes	46
5.1.5.3.	Ejecución de órdenes	48
5.2.	Simulación	50
5.2.1.	Módulo de lógica.....	50
5.2.2.	Visualización	51
5.2.3.	Controlador.....	54
6.	Casos de estudio.....	55
6.1.	Caso básico: dos aviones	55
6.1.1.	Dos aviones sin puntos de paso	55
6.1.2.	Dos aviones con puntos de paso.....	61
6.2.	Caso avanzado: varios aviones	64
6.2.1.	Varios aviones sin puntos de paso.....	64
6.2.2.	Varios aviones con puntos de paso.....	67
6.3.	Discusión	68
7.	Conclusiones y trabajo futuro	71
7.1.	Conclusiones.....	71
7.2.	Trabajo Futuro	72
	Bibliografía	73
	Glosario.....	77
	Apéndice A: Tabla de identificadores de puntos de paso en la Península Ibérica	79

Tabla de Figuras

<i>Figura 1: División del espacio aéreo [27].</i>	15
<i>Figura 2: Casos de Uso.</i>	34
<i>Figura 3: Diagrama de Objetivos.</i>	35
<i>Figura 4: Estado Mental inicial del agente "FlightPlanner".</i>	35
<i>Figura 5: Tarea de Crear Planes de Vuelo.</i>	35
<i>Figura 6: Diagrama de Interacción Para Recibir el Plan de Vuelo Inicial.</i>	36
<i>Figura 7: Creación del Estado Mental Inicial del Piloto.</i>	36
<i>Figura 8: Diagrama de Actividades General.</i>	38
<i>Figura 9: Comprobación de la Hora de Salida del Vuelo.</i>	39
<i>Figura 10: Interacción para Arrancar el Avión.</i>	39
<i>Figura 11: Descomposición del Plan de Vuelo.</i>	40
<i>Figura 12: Tiempo de Creación de las Decisiones.</i>	41
<i>Figura 13: Creación de las Decisiones.</i>	41
<i>Figura 14: Descomposición de Decisiones.</i>	42
<i>Figura 15: Interacción Piloto-Avión: Ejecución Maniobra.</i>	43
<i>Figura 16: Aplicación que Comprueba la Finalización del Tramo.</i>	44
<i>Figura 17: Diagrama para Ir al Siguiente Tramo.</i>	44
<i>Figura 18: Diagrama de Actividad Evitar Conflicto.</i>	45
<i>Figura 19: Comprobación de Nuevo Conflicto.</i>	46
<i>Figura 21: Interacción Controlador-Piloto traspaso de Ordenes.</i>	47
<i>Figura 22: Piloto Obedeciendo una Orden.</i>	48
<i>Figura 23: Conflicto Finalizado por Lejanía entre Aviones.</i>	49
<i>Figura 24: Ir al Siguiente Tramo Con Conflicto.</i>	50
<i>Figura 25: IAF Estado Mental.</i>	51
<i>Figura 26: IAF Interacciones.</i>	52
<i>Figura 27: IAF Logs.</i>	52
<i>Figura 28: Aplicación de visualización.</i>	53
<i>Figura 29: Despliegue dos aviones.</i>	55
<i>Figura 30: Resolución de conflicto entre dos aviones volando rutas sin puntos de paso especificados.</i>	56
<i>Figura 32: Alto riesgo de conflicto entre dos aviones volando rutas sin puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con altos valores de estrés y fatiga, y poca experiencia.</i>	57
<i>Figura 33: Dos aviones volando rutas sin puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con altos valores de estrés y fatiga, y poca experiencia, cambiando el tramo actual.</i>	58
<i>Figura 35: Conflicto entre dos aviones volando rutas sin puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con valores medios de estrés, fatiga y experiencia.</i>	59
<i>Figura 37: Conflicto entre dos aviones volando rutas sin puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con valores bajos de estrés, fatiga y bastante experiencia.</i>	60
<i>Figura 39: Dos aviones volando rutas con puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con valores altos de estrés, fatiga y poca experiencia, finalizando conflicto.</i>	62
<i>Figura 40: Dos aviones volando rutas con puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con valores altos de estrés, fatiga y poca experiencia, llegando al destino.</i>	63
<i>Figura 42: Despliegue seis aviones.</i>	64
<i>Figura 43: Alto riesgo de conflicto entre varios aviones volando rutas sin puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con altos valores de estrés y fatiga, y poca experiencia.</i>	65
<i>Figura 45: Varios aviones volando rutas sin puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con bajos valores de estrés y fatiga, y bastante experiencia gestionando conflictos.</i>	66
<i>Figura 46: Varios aviones volando rutas sin puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con bajos valores de estrés y fatiga, y bastante experiencia finalizando conflictos.</i>	67
<i>Figura 47: Varios aviones volando rutas con puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con distintos valores de estrés, fatiga y experiencia gestionando conflictos.</i>	68

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer a mis padres, Miguel e Isabel, y a mi hermana Almudena por los valores que me han transmitido y la confianza depositada en mí en todo momento. Si no hubiera sido por ellos no habría llegado hasta aquí.

También querría agradecer al tutor de este proyecto, Rubén Fuentes Fernández, la paciencia y dedicación que ha tenido al atender todas mis dudas y ayudarme con el desarrollo de este proyecto y con la escritura de la memoria.

Le agradezco también a Jorge Jesús Gómez Sanz el tiempo que me dedicado ayudándome con las dudas que he tenido con y acerca de la herramienta INGENIAS, lo que me ha facilitado el desarrollo de este proyecto.

1. Introducción

El tráfico aéreo es una actividad de vital importancia para las sociedades modernas. Es el medio principal de transporte para mover personas y mercancías a medias y largas distancias en cortos periodos de tiempo. Sus mejoras en velocidad, eficiencia, seguridad y coste han incrementado muy notablemente su uso durante las últimas décadas. En algunos países como EEUU, el avión es ya el medio de transporte más usado para algunos ciudadanos, y Eurocontrol¹ estima que éste continuará creciendo aproximadamente al 3,7 por ciento anual en Europa entre 2005 y 2011 [1]. Debido a ello se dedican en la actualidad importantes esfuerzos a su análisis y mejora. Sin embargo, estos estudios se enfrentan a un fenómeno de elevada complejidad y en continua evolución.

Existen numerosos factores que afectan al desarrollo del tráfico aéreo. En primer lugar, se encuentran los factores relacionados con los usuarios. Personas y organizaciones emplean aeronaves para muy diversas actividades, tales como viajes de ocio, movimientos de mercancías o vigilancia. Conocer las motivaciones, necesidades y desarrollo temporal de tales movimientos es clave para organizar de forma eficiente las infraestructuras y el movimiento de aeronaves [2]. La componente humana también aparece desde el punto de vista de los encargados directos de gestionar el tráfico aéreo y ejecutar sus operaciones. El personal de las compañías aéreas y los responsables que planifican y preparan los vuelos, y los controladores y los pilotos que los ejecutan tienen una importancia clave [3]. Sus procesos están marcados por numerosas consideraciones de eficiencia, seguridad y legalidad. En segundo lugar hay que considerar las aeronaves, incluyendo aspectos de limitaciones en el vuelo según sus características o configuraciones óptimas [4]. Por último, existen también factores del entorno, como geográficos y de condiciones ambientales que afectan a la navegación y al diseño de aeropuertos [5]. El análisis de estos factores por separado reviste una gran dificultad, pero se torna aún más complejo cuando se consideran sus influencias mutuas. Precisamente, estas interrelaciones hacen que sea necesario abordar los estudios sobre el tráfico aéreo con enfoques sistémicos, que permitan asegurar que no se obvia la influencia de factores relevantes para un aspecto dado.

El segundo elemento que marca la dificultad para estudiar el tráfico aéreo es su continua evolución, tanto por los cambios en las necesidades que atiende como por la evolución tecnológica. Además de las preocupaciones habituales en cualquier actividad de transporte por mejorar el rendimiento y la seguridad, existe aquí una notable preocupación por la posible saturación en un futuro cercano del espacio aéreo y de los aeropuertos [6]. Si bien es difícil limitar la demanda de vuelos, existen otros aspectos del tráfico aéreo que influyen en esta potencial saturación y sobre los que es posible actuar. Por ejemplo, se pueden adoptar diferentes organizaciones del espacio aéreo o cambiar los procedimientos de operación. Explorar estas alternativas requiere disponer de datos y medios para evaluar de forma realista diferentes hipótesis.

Para hacer frente a estos retos, el análisis del tráfico aéreo hace uso de multitud de aproximaciones. Los estudios sobre entornos reales son necesarios para recopilar datos, identificar las características de los elementos participantes y realizar la validación definitiva de hipótesis. Sin embargo, no son muy adecuados para la evaluación de estas hipótesis (por ejemplo por motivos de seguridad y tiempo), además de tener unos costes elevados. Para solventar estas limitaciones es frecuente recurrir a herramientas de simulación [7]. Las simulaciones son un proceso relativamente económico para crear y analizar modelos de la realidad sin interferir en ella.

Actualmente hay numerosas herramientas que se dedican a la simulación aérea, cubriendo la

¹ *European Organisation for the Safety of Air Navigation*. Eurocontrol es la organización internacional civil que planifica y controla el tráfico aéreo en Europa.

práctica totalidad de los aspectos señalados anteriormente. Atendiendo a su foco de análisis, estas herramientas pueden clasificarse en tres categorías principales:

- *Dinámica del vuelo*. Estas aplicaciones se centran en la simulación del vuelo de aeronaves individuales. Atienden a aspectos como la física del vuelo (ej. ángulos de ataque, velocidades y alturas máximas, o radio de giro) y las maniobras de bajo nivel para operar el avión (ej. ángulo de los alerones y el timón o potencia en los motores). Dentro de este grupo de aplicaciones, las más populares hoy en día son posiblemente las basadas en *JSBSim*. *JSBSim* [8] es una librería software de código abierto que modela la dinámica de vuelo de aeronaves, el denominado modelo físico de los movimientos de los aviones. Basándose en el entorno *JSBSim* se encuentran una serie de herramientas que simulan vuelos centrándose en el manejo y control de los aviones, como *FlightGear* [9] y el *OpenEagles* [10].
- *Navegación aérea*. Se trata de herramientas centradas en la simulación de la navegación aérea. Consideran simultáneamente las trayectorias de múltiples aeronaves y cómo influyen en estas trayectorias diversos factores externos. Los factores más comunes son las distintas regiones para la gestión de vuelos, las interacciones de los vuelos con los elementos de control humanos (controladores) y automáticos (ej. radiobalizas y GPS²) y las condiciones climáticas y orográficas. Ejemplos destacados de este grupo de herramientas son *FACET (Future ATM³ Concepts Evaluation Tool)* [11] de la NASA⁴ e *IMPACT (Intelligent agent-based Model for Policy Analysis of Collaborative Traffic flow management)* [12] de la FAA⁵.
- *Factores humanos*. Son simulaciones concebidas para proporcionar entornos realistas de estudio y enseñanza de la actuación de personas en el tráfico aéreo. Son ampliamente utilizados en la práctica de procedimientos de operación. Un ejemplo de este tipo de herramientas es el Sistema de Análisis Integrado de la Interacción Hombre-máquina (*MIDAS, Man-machine Integrated Design and Analysis System*) [13].

A pesar de su variedad y funcionalidad, estas herramientas de simulación presentan varios inconvenientes a la hora de abordar la problemática señalada anteriormente. El primero viene del hecho de que los modelos siempre suponen una simplificación de la realidad, centrada en los aspectos que se consideran más relevantes [14]. Aunque esta simplificación es necesaria para gestionar la complejidad de los fenómenos a estudiar, puede llevar a obviar o simplificar inadvertidamente elementos que aportan información relevante. Para abordar este problema es necesario poder comprobar hipótesis alternativas sobre los fenómenos con diferentes configuraciones de las simulaciones. Este requisito nos conduce al segundo problema. El diseño de estas herramientas es bastante cerrado, en el sentido de que no facilita su modificación para abordar nuevas necesidades. En la mayor parte de los casos son herramientas donde el usuario sólo puede parametrizar elementos ya disponibles. En ocasiones, por ejemplo en las herramientas de código abierto como *JSBSim* [8], es posible añadir nuevos componentes, pero ello requiere importantes conocimientos de programación y de la propia herramienta. Además, estas herramientas suelen tener el conocimiento e hipótesis sobre el fenómeno embebidos en el código, por lo que es difícil para los expertos discutir, elaborar y actualizar esta información. Por último, el foco de atención de estas herramientas también limita los estudios sobre tráfico aéreo. Históricamente los simuladores relacionados con aviación se han enfocado más a los aspectos funcionales o técnicos del vuelo y la gestión del tráfico. En la mayoría de los casos, estos sistemas no modelan directamente las actividades y comportamientos de las personas que intervienen en ellas (ej. pilotos y controladores), ni las interrelaciones entre ellos o con otros elementos externos. Sin embargo, los estudios sobre el fenómeno real muestran la relevancia de estos aspectos, con datos como que un tercio de los

² *Global Positioning System*

³ *Air Traffic Management*

⁴ *National Aeronautics and Space Administration, EEUU*

⁵ *Federal Aviation Administration, EEUU*

accidentes aéreos se deben a errores de los pilotos [15]. Esta relevancia no ha pasado inadvertida a los investigadores que les han prestado especial atención, por ejemplo con estudios etnográficos sobre los grupos participantes [16] y sobre factores humanos [17].

Con vistas a abordar los problemas anteriores, este trabajo se plantea la necesidad de desarrollar plataformas de simulación que hagan explícita la información manejada al nivel de abstracción de los expertos en el dominio, y cuya traslación al código sea precisa. Se persigue además que esta plataforma preste atención al modelado de las personas participantes y sus interacciones, sin descuidar los aspectos funcionales del vuelo. Por último, es necesario que ofrezca la posibilidad de considerar estos aspectos a diferentes niveles de abstracción para permitir la elaboración de distintos tipos de estudios. Estos requisitos se han abordado a través de las decisiones de diseño que se resumen a continuación.

Se han considerado propuestas de Ingeniería Dirigida por Modelos (MDE, *Model-Driven Engineering*). La MDE [18] es un paradigma de desarrollo que se centra en la especificación de una serie de modelos que describen las entidades del sistema desde diferentes perspectivas y a distintos niveles de abstracción. Estos modelos son sometidos a transformaciones semi-automatizadas para propagar información (por ejemplo entre representaciones alternativas de la información) y obtener otros productos del desarrollo (ej. código, documentación o pruebas). En este tipo de aproximaciones resulta clave una correcta elección de los lenguajes de modelado, a fin de facilitar el trabajo de los expertos en las distintas áreas.

Con vistas a facilitar el modelado a alto nivel de sistemas relacionados con el tráfico aéreo, prestando especial atención a los aspectos humanos del mismo, se consideran particularmente apropiadas las aproximaciones basadas en agentes. El Modelado Basado en Agentes (ABM, *Agent-Based Modelling*) [19] se centra en unas entidades denominadas agentes, que son abstracciones de modelado intencionales y sociales. El aspecto intencional indica que se modelan en términos de una serie de objetivos que persiguen y que pueden satisfacer mediante una serie de capacidades; el aspecto social hace hincapié en que los agentes dependen e interactúan con los otros agentes que hay en el sistema. Dadas estas características, se considera que los agentes son una abstracción que guarda una cierta similitud con las personas, al menos más que otras abstracciones de modelado, por lo que facilitan la descripción de sistemas sociales. En el caso de este trabajo, el ABM resulta de interés para especificar sistemas donde se consideran las personas que participan en la gestión o toma de decisiones de los vuelos [20].

ABM y MDE se aplican en nuestra propuesta mediante INGENIAS [21]. INGENIAS es una metodología de la Ingeniería del Software Orientada a Agentes (AOSE, *Agent-Oriented Software Engineering*) [22]. La AOSE es una aproximación al desarrollo de software basada en los agentes como abstracciones computacionales. Los agentes de la AOSE son entidades intencionales y sociales, como las del ABM. Esta proximidad facilita la transición desde los modelos conceptuales del ABM a los computacionales del AOSE, más próximos a la simulación final. Además, INGENIAS es una aproximación MDE. INGENIAS ya ha sido usado con éxito en contextos de simulación ABM con MDE de subastas y gestión de recursos urbanos [23].

El tercer elemento de la propuesta son los modelos concretos que cristalizan el conocimiento acerca del área. Como se ha comentado, el tráfico aéreo es un fenómeno muy rico, por lo que plantear unos modelos que cubran todas las necesidades existentes excede el esfuerzo de proyectos individuales. En su lugar, este trabajo propone desarrollar un prototipo limitado de los modelos con el objetivo de validar la propuesta. Para ello la memoria presenta un modelo básico donde se consideran las interacciones entre controladores y pilotos (ej. comunicación del plan de vuelo u órdenes de maniobra), de los pilotos con los aviones (ej. recepción de alertas y manipulación de los controles) y automatizadas entre aviones (ej. detección de proximidad o de velocidad). Para

comprobar la extensibilidad y flexibilidad del modelo, así como su capacidad como herramienta de validación de hipótesis, se propone modificar esos modelos originales para introducir un nuevo elemento: Aeronaves No Tripuladas (UAV, *Unmanned Aerial Vehicle*) en el espacio aéreo civil [24]. La posibilidad de introducir estos vehículos está en la actualidad sobre la mesa como un elemento para utilizar más eficazmente el espacio aéreo disponible y reducir costes [25].

Los experimentos llevados a cabo con la infraestructura y modelos anteriores han permitido observar fenómenos similares a los existentes en entornos reales y otros simuladores. Por ejemplo, se ha mostrado su capacidad para reflejar situaciones de peligro por proximidad entre aviones, gestión de modificaciones en planes de vuelo o las interacciones piloto-controlador. Al mismo tiempo, la introducción de los UAVs sobre los modelos iniciales ha mostrado la flexibilidad de la propuesta para atender nuevas necesidades de estudio.

El resto de la memoria se organiza en las siguientes secciones. La Sección 2 (*Conceptos básicos de navegación aérea*) define los conceptos fundamentales de organización y ejecución del tráfico aéreo. A continuación, la Sección 3 (*Estado del arte*) revisa los actuales sistemas de simulación de acuerdo con la clasificación vista en esta introducción. Esta revisión es la base para la definición de los requisitos de la propuesta y el sistema, que son presentados en la Sección 4 (*Requisitos del Sistema*). La Sección 5 (*Entorno de simulación*) describe en detalle los elementos elaborados para abordar estos requisitos, incluyendo los modelos sobre el tráfico aéreo (ver Sección 5.1) y la simulación basada en ellos (ver Sección 5.2). Seguidamente, en la Sección 6 (*Casos de estudio*), se presentan una serie de casos de estudio y pruebas realizadas sobre el entorno de simulación desarrollado y se discuten y analizan los resultados obtenidos. Finalmente, la Sección 7 (*Conclusiones y trabajo futuro*) discute las conclusiones sobre el trabajo a partir de la experimentación y plantea las áreas de trabajo futuro que se pueden abordar.

2. Conceptos básicos de navegación aérea

La navegación aérea engloba el conjunto de técnicas y procedimientos que permiten conducir eficientemente una aeronave a su destino. Los aspectos clave de este proceso son la planificación del vuelo, su ejecución por la tripulación de la aeronave, y el seguimiento y ajuste del mismo por los controladores. Antes de discutirlos, hay que considerar cómo se organiza el espacio aéreo [26].

El espacio aéreo contiene las áreas terminales de los aeropuertos y una serie de *puntos de paso* (*waypoints*) tridimensionales controlados para la navegación. Entre estos puntos discurren las aerovías (*airways*), que son los pasillos por los que circulan las aeronaves. Dado el elevado número de estos elementos y de vuelos que pasan por ellos, el espacio aéreo se divide en regiones de información de vuelo. No existe una correspondencia directa entre países y estas regiones. Cada país puede estar a cargo de un *área de responsabilidad* dentro de la cual pueden existir varias regiones. Estas decisiones dependen de acuerdos internacionales tomados para administrar el tráfico aéreo en el seno de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI).

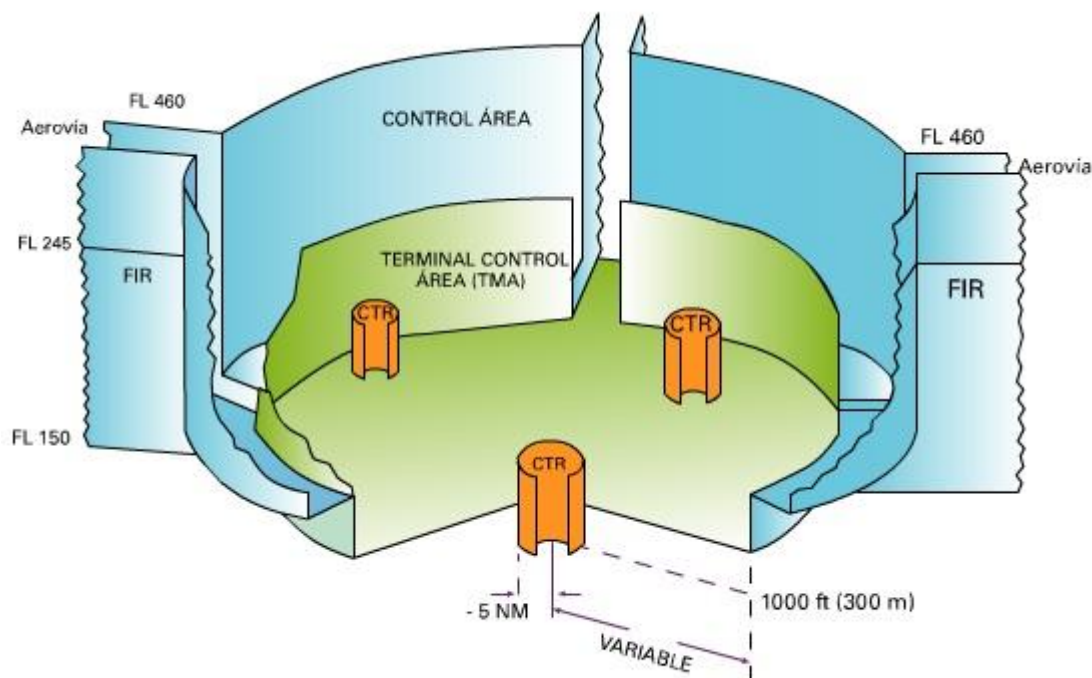


Figura 1: División del espacio aéreo [27].

Como puede observarse en la Figura 1 cada región de información de vuelo se divide verticalmente en dos zonas: un espacio inferior, también llamado Región de Información de Vuelo (FIR, *Flight Information Region*), que incluye el espacio comprendido entre el suelo y el nivel de vuelo FL 245 (24500 pies), y un espacio superior, Área Superior de Información (UIR, *Upper Information Region*), que se extiende desde el nivel de vuelo FL 245 hasta una altura ilimitada [27]. No obstante, esta división es opcional y frecuentemente la FIR también incluye la UIR para la gestión del tráfico si no hay necesidades especiales. En el resto de la discusión consideraremos esta última situación, por lo que usaremos el acrónimo FIR para referirnos a las regiones globalmente.

Las regiones se pueden dividir en espacio aéreo controlado y no controlado. El *espacio aéreo controlado* es aquel en el que los Servicios de Tráfico Aéreo (ATS, *Air Traffic Service*) prestan el servicio de control. Por el contrario, en el *espacio aéreo no controlado* los ATSs sólo prestan

servicios de información y alerta, pero no existe ningún tipo de control. Las regiones también pueden incluir áreas prohibidas, restringidas o peligrosas, que son zonas donde el vuelo de aeronaves está limitado en diferentes medidas y por causas diversas.

A su vez, para hacer más eficaz el volumen del tráfico aéreo existente, la FIR se subdivide en distintos sectores de gestión: las áreas de control, las zonas de control y las de tránsito de aeródromo. Cada uno de estos sectores tiene una unidad, denominada Centro de Control de Área (ACC, *Area Control Center*), asignada [28]. El ACC es responsable, por un lado, del control de los vuelos en su sección, y, por otro, de transferir a otro ACC el servicio de control de una aeronave cuando ésta se encuentra a punto de salir de su sector. Otras unidades son aquellas centradas en el control de los aeropuertos, donde el movimiento de los aviones tiene condiciones particulares. Estas unidades son las Torres de Control y las Oficinas de Control de Aproximación.

Todas estas unidades disponen de varios sistemas electrónicos y de computación para el control y gestión del tráfico. Entre ellos se cuenta el *Radar* (RDR, *Radio Detection and Ranging*), que es un instrumento emisor/receptor de ondas de altísima frecuencia empleado para detectar los objetos que vuelan dentro del espacio aéreo. Su información es procesada por programas computacionales que la presentan en *Pantallas de Radar*. Actualmente, la mayor parte de las rutas aéreas están cubiertas por radares, lo que permite hacer un seguimiento permanente de los vuelos. Existen otros programas de asistencia, como los que ajustan las pistas disponibles de un aeropuerto, tanto para despegue como aterrizaje de aviones, y el orden en que los vuelos han de despegar y aterrizar para optimizar el número de vuelos controlables.

Los controladores de tráfico aéreo son el personal que trabaja en las instalaciones anteriormente descritas. Son los máximos responsables del control de tránsito aéreo y se encargan de dirigir el movimiento de aeronaves en el espacio aéreo y en los aeropuertos de modo seguro, ordenado y rápido. Para ello deben proporcionar a los pilotos las instrucciones e información necesarias dentro del espacio aéreo de su jurisdicción. El controlador es responsable de las aeronaves que vuelan en un área tridimensional del espacio aéreo conocida como área de control o área de control terminal. Cada controlador ha de coordinarse con los controladores de sectores adyacentes para planificar las condiciones en las que una aeronave ingresará en la otra área de responsabilidad. El vuelo se ha de entregar sin ningún tipo de conflicto respecto de otro tránsito, condición meteorológica, posición geográfica o de altitud (nivel de vuelo), siendo esto válido, tanto para vuelos nacionales como internacionales.

La actividad de los controladores, así como la de los otros participantes en el tráfico aéreo tales como pilotos, está regulada por una extensa normativa que determina como han de realizarse los vuelos. Parte de esta normativa está recogida en los *Reglamentos de Circulación Aérea* de cada país, que trasponen normativas internacionales, y afectan a todos los vuelos, sean nacionales o internacionales y dentro del espacio aéreo controlado o no controlado. Una parte importante de esta normativa se refiere a los planes de vuelo.

Para volar en el espacio aéreo, toda aeronave tiene que contar con un plan de vuelo. Se trata de un informe donde se indican todos los datos referentes al vuelo incluyendo el lugar y hora de salida y los de destino, la altitud y velocidad de crucero durante el vuelo, los puntos intermedios por los que ha de pasar el vuelo, el tipo de vuelo a realizar, y la información referente al avión. Antes de iniciarse el trayecto, el plan de vuelo ha de ser notificado a la autoridad ATS competente para que sea aprobado.

La forma de ejecutar el plan de vuelo no es única, sino que depende del tipo de infraestructura disponible (ej. radiobalizas e indicadores de aproximación), del tipo de aeronave (ej. su capacidad de vuelo y pasajeros desplazados) y de la zona (ej. aeropuertos y baja altitud). Según estos factores es posible realizar navegación con Reglas de Vuelo Visual (VFR, *Visual Flight Rules*) o con Reglas

de Vuelo Instrumental (IFR, *Instrument Flight Rules*). Las VFRs se pueden aplicar con una visibilidad mayor de 5 millas náuticas y techo de nubes por encima de los 1500 metros. En este caso los pilotos suelen usar la técnica de “navegación por estima”. Este procedimiento infiere la ubicación actual haciendo cálculos basados en el rumbo y la velocidad de navegación a lo largo de un período, combinados con observaciones visuales. Estos datos y cálculos se contrastan con cartas o mapas de navegación aérea. También es posible que hagan uso de la radio para hacer validaciones adicionales. Las IFRs son más utilizadas en aviones de línea puesto que ofrecen mayor seguridad. Aquí los pilotos navegan usando exclusivamente instrumentos y ayudas de navegación por radio, o directamente bajo las órdenes de controladores aéreos.

Una de las tareas principales de los controladores para vuelos IFRs, y en ocasiones también para los VFRs, es gestionar la *resolución de conflictos*. La normativa para el tráfico aéreo [29] establece valores mínimos de separación entre aviones:

- Separación vertical:
 - 1000 pies (305 metros) cuando se vuela por debajo de los 29000 pies (8839 metros).
 - 2000 pies (610 metros) cuando se vuela por encima de los 29000 pies.
- Separación longitudinal: 5-10 millas náuticas (9.260 - 18520 metros).

Cuando no se representa estas distancias de separación se produce un conflicto, que podría degenerar en una colisión. Los conflictos se resuelven logrando que las aeronaves involucradas vuelvan a volar dentro de los márgenes seguros. Para ello, los controladores dan órdenes de maniobra a los pilotos que estos deben acatar obligatoriamente y de forma prioritaria. Para los controladores estas tareas de resolución de conflictos también son prioritarias sobre cualquier otra.

Los anteriores conceptos de navegación aérea definen una parte importante de los requisitos que ha de soportar el lenguaje de modelado. Definen las primitivas que usarán los expertos para definir el espacio aéreo simulado, la información que deben manipular los agentes y las interacciones que deben estar contempladas.

3. Estado del arte

El presente trabajo persigue proporcionar simulaciones realistas del tráfico aéreo. Por ello está conectado con varias líneas de investigación. En primer lugar es necesario considerar la importancia que tiene en este fenómeno la componente humana. Aquí nos centramos en aquellos participantes activos en la navegación (pilotos y controladores). Este interés conecta con investigación acerca de los Factores Humanos (HF, *Human Factor*) que intervienen en los vuelos, que será revisada en la Sección 3.1. La Sección 3.2 analiza la investigación en UAVs, tanto desde el punto de vista de su control como de su participación en el espacio aéreo. Por último, la Sección 3.3 analiza qué tipos de aplicaciones existen en el campo de la simulación, qué conceptos contemplan y qué funcionalidades proporcionan.

3.1. Factores humanos en aviación

La componente humana es básica en el tráfico aéreo. Los participantes han de operar de forma precisa, posiblemente en condiciones de presión, y garantizando el máximo de seguridad y eficiencia. Para tal fin existen numerosos estudios orientados a dotarles de los protocolos y herramientas óptimas para sus labores. La relevancia de estos elementos viene subrayada por datos como que más de un tercio de los accidentes aéreos son debidos a errores humanos, y dentro de estos la mayoría son debidos a fallos en la comunicación, toma de decisiones o liderazgo [30]. Por tanto, es necesario tener en cuenta estos factores a la hora de realizar simulaciones del tráfico aéreo.

El estudio de “los Factores Humanos (o ergonomía) puede definirse como la tecnología orientada a optimizar las relaciones entre personas y sus actividades haciendo uso de la aplicación sistemática de las ciencias humanas, integrada en el marco de la ingeniería de sistemas” [31]. De esta definición se extraen varias observaciones relevantes para el presente trabajo:

- Al describir los HFs como una tecnología, se hace hincapié en su carácter práctico; se orienta a problemas más que centrarse en la disciplina. La relación entre los HFs y las ciencias humanas podría compararse con la relación entre ingeniería y ciencias físicas. Las ciencias humanas comprenden los estudios de la estructura y naturaleza del ser humano, sus capacidades y limitaciones, y sus comportamientos ya sea en solitario o en grupo. En común con todas las tecnologías, los HFs se preocupan de la búsqueda y uso de conceptos y datos seleccionados según su importancia en un problema práctico.
- La ergonomía implica un interés por la comunicación entre individuos y en el comportamiento de grupos de personas. La optimización en las relaciones personales viene dada por dos conjuntos de criterios: el bienestar humano y la eficacia del rendimiento del sistema.
- Con el fin de contribuir eficazmente en el diseño y las operaciones del sistema, es necesario que los ergónomos integren sus contribuciones con las de otros expertos.

Dentro de los estudios en HF usados en la aviación comercial, destacan por su relevancia la gestión de recursos por la tripulación y el entrenamiento de vuelo orientado a la línea aérea. Ambos pretenden dotar a las tripulaciones de las aeronaves de conocimiento y protocolos para gestionar sus vuelos, aunque el foco es diferente.

La industria aeronáutica incorporó hace décadas [32] el procedimiento de Gestión de los Recursos por la Tripulación (CRM, *Crew Resource Management*) como parte fundamental del entrenamiento y formación de las tripulaciones de aviones. El CRM se puede definir como “el uso eficiente de todos los recursos disponibles por la tripulación del avión, incluyendo el equipamiento, las habilidades tanto técnicas como procedimentales, y las contribuciones del resto de la tripulación

del vuelo y demás personas” [33]. A lo largo de los años, el CRM ha ido evolucionando [30], pasando a ser básico en la coordinación de la tripulación y la toma de decisiones. Entre los principales objetivos del CRM se encuentran evaluar, desarrollar y mejorar el trabajo en equipo, la habilidad en la toma de decisiones, la conciencia situacional, el pensamiento crítico y las comunicaciones interpersonales [34]. De los artículos [35] [36] [37] se puede extraer que las temáticas principales del CRM incluyen:

- *Procesos de comunicación y toma de decisiones.* Comunicación entre los distintos miembros de la tripulación y con el exterior, y las distintas acciones a tomar dependiendo de lo que se transmita en estas interacciones.
- *Trabajo en equipo y dinámicas de grupo.* Para poder abordar de forma conjunta y lo más rápido posible los problemas en situaciones críticas.
- *Liderazgo y coordinación de actividades.* El capitán de la aeronave es en última instancia el responsable dentro del vuelo, por lo que ha de saber dirigir y coordinar a su equipo.
- *Carga de trabajo y conciencia situacional.* Cada miembro del equipo debe tratar de dedicarse exclusivamente y lo más eficientemente posible a sus competencias.
- *Rendimiento humano y psicológico.* Las capacidades de atención, estrés y fatiga se deterioran a lo largo del vuelo y es preciso tratar de mantenerlas en el punto adecuado tanto tiempo como sea posible.
- *Planificación.* Capacidades de planificación de la ruta y tiempos de ésta.

El segundo procedimiento típico de HFs considerado aquí es el Entrenamiento de Vuelo Orientado a la Línea Aérea (LOFT, *Line-Oriented Flight Training*) [32]. Una aproximación LOFT es un tipo de entrenamiento donde se simula un vuelo de línea con la tripulación completa del aparato. El instructor o la compañía diseñarán la ruta con los posibles incidentes que puedan surgir durante su realización, con la documentación completa de los vuelos, las actividades previas a los vuelos, procesos y actividades de distribución de tareas, operaciones en ruta e información post-vuelo [38]. Nótese que un entrenamiento LOFT incluye aspectos de CRM, pero también otros adicionales. En todos los casos se consideran procedimientos normales, anormales y de emergencia típicos en vuelos de ruta. Un instructor monitoriza el rendimiento y el resultado de toda la tripulación, tanto en el simulacro actual como en su histórico, para mejorar el rendimiento o arreglar fallos de procedimientos en la toma de decisiones o en la manera de actuar.

Este tipo de estudios, pruebas y entrenamientos de HFs han permitido saber que controlar factores como el estrés y la fatiga es esencial para poder llevar a cabo un vuelo sin ningún incidente significativo. En el caso concreto de los pilotos es importante que estos controlen el tipo de pilotaje que realizan, aspecto relacionado con su personalidad [39]. También es clave su experiencia, determinada por las horas de vuelo que han acumulado. Ésta les permitirá resolver de forma más rápida y eficaz aquellas situaciones comprometidas que hayan experimentado en el pasado. Por ello, todos los pilotos, después de adquirir el título de pilotaje, deben acumular una serie de horas de entrenamiento en simuladores antes de empezar en los vuelos reales.

3.2. UAVs

Los UAVs se han convertido en una alternativa fiable y rentable frente a las aeronaves tripuladas en numerosos escenarios, tanto civiles como militares. Esta situación ha conducido a que una serie de organizaciones como la FAA o Eurocontrol se hayan comprometido a hacer uso del potencial de estas nuevas tecnologías para solucionar parte de los problemas de saturación aérea y operación en escenarios peligrosos. Ello implica la introducción, regulación y mantenimiento de vuelos coordinados de UAVs dentro del espacio aéreo civil, conjuntamente con vuelos tripulados [40]. Abordar estos objetivos requiere realizar estudios de las condiciones de tales vuelos, y comprobar hipótesis de funcionamiento y ordenación del tráfico.

La introducción de UAVs en el espacio aéreo civil requiere establecer una serie de procedimientos y regulaciones que dichos vehículos deben cumplir. Esta normativa estaría en línea con la que se exige a las aeronaves tripuladas, pero teniendo en cuenta las características particulares de los UAVs. Generar dichas regulaciones y obtener las certificaciones de que se cumplen son en general procesos largos y complejos. De hecho, la introducción de UAVs en el espacio aéreo se ve retrasada hoy en día no tanto por limitaciones tecnológicas sin resolver, sino por el déficit a la hora de definir los requisitos para que puedan volar junto con tráfico tripulado y a la hora de certificar estos. Para suplir estas deficiencias se está desarrollando tanto investigaciones como trabajos de regulación en los organismos correspondientes. Ejemplos de estos trabajos son [25], [41] y [42].

En [25] se analizan escenarios y requisitos de un futuro espacio aeroespacial donde conviven vuelos tripulados y no. Se apuntan aspectos acerca de reducida separación entre vuelos, debido al menor tiempo de respuesta de los UAVs, uso de espacios aéreos cuatridimensionales que tengan en cuenta el tiempo con ventanas pequeñas, y un mayor uso de comunicaciones electrónicas.

También en esta línea se enmarca el proyecto Access 5 [41]. Access 5 fue un proyecto de cinco años dirigido por la NASA en colaboración con la FAA, el DoD⁶, el DHS⁷ y una serie de empresas privadas. Dicho proyecto empezó en Noviembre de 2003 y tenía como objetivo diseñar una serie de recomendaciones para que la integración de los UAVs en el espacio aéreo civil fuera lo más segura y fiable posible.

Finalmente, [42] propone un sistema ATM 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 supuesto, existen aún también limitaciones [43] en el control y navegación de los UAVs que son objeto de investigación. Por ejemplo, en [42] se abordan los fallos en percepción o maniobra de los UAVs, dichos fallos pueden deberse bien a errores de sus sistemas o a causas externas, que es uno de los asuntos que generan aún reservas sobre su uso. También [44] estudia este tipo de fenómenos. Concretamente considera problemas de oclusión, donde existen obstáculos que limitan la percepción del UAV, y como hacer consiente al control de la aeronave de que su información es limitada.

3.3. Simulación y Gestión de Tráfico Aéreo

Como se ha comentado en la introducción, actualmente hay numerosas aplicaciones que se dedican a la simulación aérea. Estas simulaciones se pueden clasificar atendiendo a varios criterios, tales como el foco del análisis, las primitivas empleadas en el modelado, la integración con información del entorno o la distribución de la simulación. Esta sección analiza estos aspectos partiendo del foco de estudio. Distingue entre las simulaciones centradas en las aeronaves a nivel individual (ver Sección 3.3.1), las que se centran en la gestión del tráfico cuando interactúan varias aeronaves entre sí y con el control (ver Sección 3.3.2), las que abordan los HFs (ver Sección 3.3.3) y las que consideran la participación de UAVs (ver Sección 3.3.4).

⁶ *Department of Defense*, EEUU

⁷ *Department of Homeland Security*, EEUU

3.3.1. Dinámica del vuelo

Las simulaciones de aeronaves individuales se centran en los aspectos físicos de su vuelo [8] [45]. Implementan modelos que integran los distintos factores que afectan a éste para mostrar la respuesta de la aeronave. Estos factores suelen incluir:

- *Configuración de la aeronave.* Se trata de las características intrínsecas del tipo de aeronave. Ejemplos de ellas son la disposición de las alas y el fuselaje, sus dimensiones, los límites de carga, altura y velocidad, o la potencia de los motores. Resultan especialmente relevantes los sistemas de control disponibles, que permitirán al piloto actuar sobre la aeronave.
- *Parámetros del vuelo.* La aeronave realiza el vuelo con unas condiciones concretas. Generalmente estas se encuentran dentro de los límites determinados por parámetros de la configuración de la aeronave. No obstante, es posible intentar superar tales límites para comprobar el comportamiento en situaciones extremas. Ejemplos de estos parámetros son la carga, velocidad y altitud actuales.
- *Condiciones externas.* Se trata de condiciones del entorno que afectan al vuelo de la aeronave. Ejemplos típicos son la temperatura exterior, la luminosidad, la velocidad y dirección del viento o la presencia de precipitaciones.

Además de estos factores, la mayor parte de los simuladores también incluyen una especificación del entorno con el que interactúa la aeronave. Aquí se incluye la orografía del terreno, además de las condiciones externas antes mencionadas.

Al margen de incluir con mayor o menor detalle los elementos anteriores, la diferencia fundamental entre estos simuladores se encuentra en la forma en la que describen el modelo de vuelo. Éste puede especificarse mediante [46] las ecuaciones que determinan la respuesta de la aeronave, en la línea de los tradicionales modelos analíticos, o bien mediante un algoritmo, más en línea con los modelos programados. Estas opciones no son mutuamente excluyentes, ya que los modelos programados suelen estar basados en la integración mediante código de múltiples modelos analíticos. El primer caso corresponde a simuladores centrados en aspectos específicos del vuelo porque requiere en general una gran simplificación de otros elementos. Este tipo de simuladores se emplea, por ejemplo, para conocer la respuesta ante el viento del fuselaje o la dinámica del vuelo. Dentro del segundo grupo destacamos los simuladores basados en *JSBSim* [8] y *AVDS (Aviator Visual Design Simulator)* [45].

JSBSim [8] es una librería software de código abierto que permite modelar la dinámica de vuelo de las aeronaves. Constituye la base para desarrollos más complejos como *FlightGear* [9] y *OpenEagles* [10]. Ambos son entornos para el desarrollo de simulaciones que incluyen tanto herramientas de simulación para el usuario final como la posibilidad de programar nuevos elementos usando sus librerías.

FlightGear [9] contempla una amplia variedad de aeronaves, información extensa y realista del entorno (ej. aeropuertos, ciudades, montañas y ríos) y opciones de simulación en tiempo real. Destaca por la posibilidad de modelar de forma realista y precisa el comportamiento de los componentes del mundo real, incluyendo fallos de muchos sistemas e instrumentos. *FlightGear* se ha usado a su vez como base de numerosos proyectos de simulación, por ejemplo en investigación sobre sistemas inteligentes de asistencia a la tripulación en situaciones de máxima atención [47] o en el diseño de vehículos aéreos autónomos que puedan realizar operaciones en atmósferas de otros planetas [48].

OpenEagles [10] es otro entorno de simulación. Proporciona un amplio conjunto de librerías para la definición de los paneles de control de las aeronaves, y librerías gráficas para la

visualización de vuelos. Estas librerías pueden combinarse con otras soluciones, aunque se obtiene un mayor rendimiento cuando simulación y gráficos se usan conjuntamente. También proporciona herramientas para diseñar simulaciones complejas a través de su editor gráfico. *OpenEagles* aborda el problema de la interoperabilidad usando estándares para la codificación de archivos y los protocolos de comunicación. Por ejemplo, soporta el estándar abierto DIS (*Distributed Interactive Simulation*), del IEEE⁸ que usan muchas de las plataformas de simulación de juegos de guerra en tiempo real. Algunas de las aplicaciones construidas sobre *OpenEagles* son *OpenSpace* [49], que simula el vuelo de una cápsula lunar Apollo, y *LifeForce* [49], una aplicación de tiro en primera persona (*First Person Shooter*) donde el jugador interactúa con objetos móviles en el aire y el terreno.

El segundo entorno considerado en esta categoría es AVDS [45]. Al contrario que los ejemplos anteriores, AVDS no está desarrollado sobre un conjunto de librerías escrito en un lenguaje de programación de propósito general. Está desarrollado en Simulink [50], que es un entorno sobre MATLAB para la simulación y diseño basado en modelos y orientado a sistemas dinámicos y embebidos. Aunque se pueden programar elementos con un lenguaje de scripts, está pensado para que la interacción sea con un mayor nivel de abstracción. Así, AVDS ofrece una visualización gráfica combinada y animada de los parámetros de estado de los aviones y sus maniobras. También permite examinar la simulación desde distintas cámaras (perspectivas). Algunos de los componentes que se pueden utilizar para definir sus simulaciones son cartas de navegación, superficies articuladas, datos del terreno y tres cámaras virtuales. Al igual que las herramientas previas, la arquitectura de AVDS también presta atención a facilitar la integración con otras soluciones mediante el uso de formatos estándar para la información y protocolos de comunicaciones.

De los ejemplos anteriores se extraen varias conclusiones importantes. La primera es que existen comunidades muy activas en el desarrollo de este tipo de simuladores, aunque no hay ningún estándar comúnmente aceptado. Además, hay una inquietud por hacer que las herramientas puedan servir de base a otros desarrollos. La segunda es que la simulación del tráfico aéreo es un problema de enorme complejidad, por lo que no existen soluciones que pretendan abordar todo el fenómeno a través de una única aplicación. Por tanto, existe una necesidad de propuestas que contemplen la integración de múltiples soluciones. Esta integración se ve facilitada por una definición explícita y flexible de la información empleada, así como por el uso de estándares para formatos y comunicaciones.

3.3.2. Navegación aérea

Las aeronaves vuelan en espacios aéreos compartidos con otras aeronaves, interactúan con los controles de tierra y están sujetas a ciertas restricciones. Por ello también es importante saber cómo se han representado estos entornos complejos de navegación y gestión del tráfico aéreo y las herramientas para su simulación. Estos trabajos se pueden clasificar atendiendo a criterios como el foco de su simulación dentro del tráfico aéreo o el tipo de paradigma de modelado empleado. Atendiendo al foco encontramos herramientas centradas en la planificación de los vuelos y en la gestión del vuelo en sí. Atendiendo al paradigma veremos aproximaciones estándar de desarrollo (típicamente orientadas a objetos) y ABM.

La planificación de los vuelos juega un papel clave para lograr un tráfico aéreo fluido y eficiente. Los aeropuertos o los pasillos aéreos experimentan puntas de tráfico intensas que es necesario tratar con una previsión adecuada. En este campo destacan propuestas como IMPACT [12], FACET [51] y ACES [52].

⁸ *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IMPACT [12] modela los actores de la FAA y de las aerolíneas. Persigue evaluar el impacto de tres factores: la planificación anticipada, los Programas de Retrasos en Tierra (GDP, *Ground Delay Program*) sin intercambio de información y los horarios de vuelo compartido. Los agentes de las aerolíneas toman sus decisiones basándose en el cálculo del coste de cada tarea realizada. Mediante la imposición de determinados acontecimientos en el comienzo de la simulación, el sistema devuelve como salida de la simulación una serie de estadísticas basadas en el comportamiento de los agentes en el sistema. El enfoque de IMPACT es modelar las aerolíneas y la FAA basándose en el uso de un algoritmo simple de toma de decisiones, y centrarse en la gestión de retrasos.

FACET [51] es principalmente conocido como simulador del flujo del tráfico aéreo. Sin embargo, también incluye otros aspectos, tales como la carga de trabajo del controlador y las iniciativas de gestión del tráfico aéreo.

El Sistema de Evaluación de los Conceptos Aéreos (ACES, *Airspace Concept Evaluation System*) [52] es una herramienta de simulación que incluye pero no se restringe al ATM. Se basa en la arquitectura HLA (*High-Level Architecture*), que es un estándar para implementar sistemas de simulación distribuidos. HLA define herramientas, reglas y protocolos para estos sistemas.

Dentro de la gestión del tráfico aéreo existen varios trabajos que se centran en alternativas de organización del mismo basadas en procesos colaborativos semi-automatizados que reducen la participación humana. Aquí consideramos los trabajos descritos en [51], [53] y [54].

Los trabajos en [51] y [54] describen sistemas distribuidos basados en agentes para el ATM. Ambos están implementados sobre FACET. En [51], una serie de entidades representan regiones del espacio aéreo. Estos agentes establecen la separación entre los aviones que se aproximan a sus regiones. Para determinar la separación óptima, estas entidades usan aprendizaje por refuerzo sobre las políticas de control. El trabajo describe distintas funciones de aprendizaje y sus efectos en el tráfico. En [54], el análisis se centra en la toma de decisiones de los participantes y las implicaciones para el rendimiento de representar esa toma de decisiones explícitamente, con arquitecturas cognitivas, o implícitamente, centrándose en el resultado.

STEAM (*a Shell for TEAMwork*) [53] es una arquitectura que permite la representación explícita de los objetivos, planes y compromisos conjuntos de equipos. Se usa para evaluar un sistema colaborativo de sincronización en tiempo real. Dicha sincronización se emplea, por ejemplo, para organizar a los controladores de sectores individuales cuando gestionan vuelos que pasan por múltiples sectores.

Un segundo grupo de herramientas se centra en el propio flujo del tráfico aéreo. Aquí vuelve a aparecer FACET [51]. Este simulador contiene herramientas que se centran en el modelado de la trayectoria y del tiempo de los vuelos. También contiene un modelo de la estructura del espacio aéreo, incluyendo las regiones, 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. Esta herramienta ha sido integrada en un producto comercial, *Flight Explorer* [55], que se usa en la mayoría de las principales compañías aéreas de EE.UU.

En cuanto al paradigma de modelado, existe una amplia utilización de aproximaciones generales, como la orientación a objetos, y el uso de entornos específicos, por ejemplo basados en MATLAB. Resulta no obstante notable el uso de un paradigma menos extendido como es el ABM [19], basado en agentes y mencionado en la introducción. Dentro del enfoque ABM hay que incluir los ya mencionados IMPACT [12], ACES [52], y [54], y también [56]. Son de particular interés en este punto los dos últimos, que evalúan el impacto de distintas alternativas relacionadas con agentes y la gestión del tráfico aéreo. El trabajo en [56] explora la posibilidad de estrategias colaborativas y distribuidas de selección de rutas simples entre los participantes en el tráfico aéreo. El trabajo en

[54] describe la experiencia de usar una arquitectura de agente BDI (*Belief-Desire-Intention*) [57] para desarrollar la simulación de un ATM colaborativo y los problemas de eficiencia que se encuentran. Como conclusión propone una aproximación híbrida. Ésta usa componentes implementados con agentes BDI cuando se requieren procesos cognitivos explícitos, y componentes implementados con objetos cuando no. Subraya además la importancia del nivel de granularidad: no hay necesidad de modelar detalles de la toma de decisiones cuando uno está más interesado en el resultado que en el proceso mismo. Además, los componentes complejos (agentes BDI) resultan más costosos computacionalmente.

3.3.3. Factores humanos

Los procedimientos considerados en HFs suelen analizarse y practicarse en simuladores, que permiten abordar la amplia variedad de situaciones que pueden afectar a estos procedimientos. El uso de estos simuladores proporciona a los estudiantes el conocimiento, habilidad y experiencia necesarios para operar eficientemente como miembros de una tripulación. En el artículo [58], además de describir una herramienta educacional económica con la que se pueden enseñar los fundamentos del CRM, se enumeran los beneficios que aportan los simuladores de vuelo a la hora de instruir a los pilotos. Éstos son:

- Un entorno físico controlado.
- Control de la carga de trabajo de la tripulación por parte de un instructor.
- Control de los sistemas de la aeronave por parte del instructor.
- El simulador puede facilitar escenarios de vuelo que de otra manera serían imposibles o muy arriesgados.
- Los simuladores tienen la opción de congelar situaciones y repetirlas permitiendo opiniones y correcciones inmediatas cuando se necesitan.
- Muchos de los simuladores pueden proveer opciones de grabación, lo que permite el posterior análisis crítico de las decisiones tomadas.
- Los simuladores proporcionan la posición instantánea de las aeronaves.
- Un instructor puede monitorizar fácilmente las conversaciones y acciones de la tripulación sin distraerles.
- Los simuladores pueden suministrar distintos tipos de aviones, sistemas de control de las aeronaves y otro equipamiento que no esté disponible, sea económicamente fácil de adquirir o apropiado usarse en entrenamientos.
- La personalización de controles y cabinas se puede reconfigurar fácilmente.
- La configuración de las aeronaves y las características de los vuelos es programable.
- Una variedad de ayudas electrónicas a la navegación pueden ser simuladas.

Un ejemplo de simulador para el estudio de HFs es el Sistema de Análisis Integrado de la Interacción Hombre-máquina (MIDAS) [13]. Se trata de un simulador basado en agentes que se centra en la eficiencia humana cuando hay interacciones con interfaces máquina. Esta herramienta ha sido usada para ATM y enfatiza principalmente las capacidades y limitaciones de las facultades cognitivas de los humanos, en vez de la complejidad de la toma de decisiones.

3.3.4. UAVs

Con vistas a analizar el comportamiento de los UAVs, tanto en vuelo con tráfico tripulado como en otras situaciones, se ha recurrido a simulaciones. Al igual que en los casos de vuelos tripulados, existen ejemplos centrados en el vuelo de UAVs individuales y en la gestión de grupos de estos.

En cuando al estudio de UAVs como elementos individuales destacar una serie de trabajos que se centran en modelar las características físicas de estos. Aquí se encuentra una variedad de

propuestas, incluyendo modelos analíticos, basados en técnicas generales de simulación [59] y ABM. Por ejemplo, dentro de los ABM encontramos [60]. Éste trabajo presenta un marco de modelado donde cada vehículo se descompone en una serie de niveles controlados por agentes. Los principales agentes son el físico y el lógico. El agente físico es el principal responsable de las interacciones físicas del UAV, como pueden ser maniobras hacia el siguiente punto de paso, las comprobaciones sobre posibles colisiones, la actualización del estado del combustible, la comprobación de los sensores o la transmisión de mensajes pendientes. Por otro lado, el agente lógico es el responsable de generar la lista de puntos de paso y solicitar el envío de mensajes.

En cuanto a los simuladores que analizan el vuelo combinado de múltiples UAVs, ya se han revisado algunos casos en las secciones anteriores. Por ejemplo [56], considera principalmente el control de agentes individuales pero también aborda cómo será el paso de mensajes entre UAVs para volar en espacios compartidos. También son populares los trabajos que como [61] consideran aspectos de auto-organización en enjambres de UAVs para alcanzar objetivos globales.

4. Requisitos del Sistema

En este apartado se van a especificar los requisitos básicos que el entorno de simulación del transporte aéreo debe cumplir. Se descompone en dos partes. La Sección 4.1 está dedicada a los aspectos del tráfico aéreo que han de cubrir los modelos a realizar. La Sección 4.2 se centra en la infraestructura metodológica y de herramientas usada para el desarrollo dirigido por modelos de la simulación.

4.1. Aspectos del tráfico aéreo

El objetivo es obtener una simulación del espacio aéreo suficientemente fidedigna para modelar fenómenos que involucren a varios actores y flexible para adaptarse a nuevos o modificados elementos en el dominio. Esta simulación cubrirá los elementos esenciales de la gestión del tráfico aéreo (interacciones controladores-pilotos) y de la navegación aérea (interacciones controladores-pilotos y pilotos-aeronaves). Para este fin, y en función del estudio del estado del arte de la sección anterior, se plantean los requisitos discutidos en esta sección. Estos se organizan en secciones relativas al vuelo (ver Sección 4.1.1), las aeronaves (ver Sección 4.1.2), los pilotos (ver Sección 4.1.3) y los controladores (ver Sección 4.1.4).

4.1.1. Vuelo

El vuelo requiere una fase de planificación previa y otra de ejecución. En la planificación se describen los planes de vuelo, que son los informes que contienen toda la información referente a un vuelo. Las compañías se los entregan a los pilotos antes de iniciar el vuelo y estos junto con su tripulación se encargan de llevarlos a cabo con una aeronave.

Los planes de vuelo oficiales contienen información completa acerca de como realizar el vuelo. Para la propuesta de este trabajo no es necesaria toda ella, sino que sólo se utilizarán los datos que son imprescindibles para realizar el vuelo. Estos datos son:

- El aeropuerto de origen.
- El aeropuerto de destino.
- La hora de despegue.
- La velocidad de crucero del avión, que está determinada por el modelo del avión.
- La altura de crucero del avión.
- La lista de puntos de paso por los que tiene que pasar el avión antes de llegar al destino.
- Aeropuerto alternativo de destino.
- El piloto al que se le asigna el plan de vuelo.
- El avión al que va dirigido este plan de vuelo.

La asignación de valores de algunos de los datos anteriores, corresponde a la creación y coordinación de planes de vuelo según las necesidades de transporte y la disponibilidad en los aeropuertos. Este es un proceso complejo y que no es objeto de estudio en este trabajo. Por ello, esta parte de los datos del plan de vuelo será suministrada por el usuario, y el resto tratados por los agentes de la simulación. Los parámetros suministrados externamente serán:

- Los aeropuertos de origen y destino.
- Los puntos de paso. Los puntos de paso tienen un identificador numérico estándar acordado por los actores del tráfico aéreo [62]. El Apéndice A recoge estos identificadores. El usuario del entorno de simulación suministrará los números que representen a los puntos por los que quiere que pase la aeronave.

- El tiempo que ha de pasar después de arrancar el sistema para que despegue el avión, siendo responsabilidad del usuario que no haya vuelos que despeguen del mismo aeropuerto a la misma hora.

En cuanto a la velocidad y altura de crucero estarán establecidas siempre a un valor por defecto que vendrá determinado por las especificaciones técnicas de los aviones. Así, por ejemplo, como podemos ver en los documentos [63] [64], para los Airbus A-320 dichos valores son:

- Velocidad de crucero: Mach 0,76 (930 Km/h)
- Altura de crucero: 36000 pies (11000 Km)

Por último, tanto el piloto como el avión asignados a un plan se corresponderán con los primeros que el sistema tenga disponibles, es decir, que no estén asignados a otro plan. Una vez realizada esta asignación podrá comenzar el vuelo en sí.

La simulación del vuelo considerará únicamente el tiempo que el avión pasa en el aire. El despegue y el aterrizaje son actividades con características particulares y muy dependientes del propio aeropuerto y tráfico del momento. Su estudio se deja para una fase siguiente de la propuesta. Esta simplificación lleva a imponer ciertas restricciones a las simulaciones. A fin de dotar de una cierta uniformidad a todos los vuelos respecto a las fases iniciales y finales del vuelo, y omitir consideraciones sobre la orientación de las pistas en los distintos aeropuertos, se considerará que todas las pistas están orientados hacia el norte. Como no se considera la fase de despegue en sí, todos los aviones comenzarán su vuelo con una velocidad de 300 Km/h, que es la velocidad aproximada a la que una aeronave despegue de tierra. El vuelo en sí consistirá en un trayecto desde el aeropuerto de inicio al de destino pasando por los puntos de paso que vengan determinados en el plan de vuelo. En la actualidad se restringe el entorno a los principales aeropuertos y puntos de paso españoles de la Península Ibérica [62]. Durante los vuelos, pilotos y controladores intentarán que no se produzca ningún incidente grave, como podría ser una colisión entre aeronaves.

4.1.2. Aeronaves

La descripción de las aeronaves en este trabajo se centra en las características que describen su vuelo. Por supuesto, todas las características mencionadas en las Secciones 2, 3.3.1 y 3.3.2 influyen en el vuelo de la aeronave, pero muchas de ellas son irrelevantes desde el punto de vista del comportamiento percibido. Por ejemplo, para alcanzar una cierta velocidad, la potencia que han de suministrar los motores variará según el peso del aparato, pero sólo la velocidad será observada y por tanto describirá el vuelo en la simulación. Entre estas características observables se puede diferenciar entre aquellas ligadas al tipo de avión y las que lo están al vuelo.

En cuanto a las características ligadas al tipo de avión se puede decir que son aquellas que limitan las capacidades físicas del vuelo. Se trata de la *configuración de la aeronave* de la Sección 3.3.1. Dentro de este tipo de características se han tenido en cuenta la velocidad y la altitud. El tipo de avión limita estas características con valores máximos y mínimos. En algunos casos se puede prescindir de uno de estos límites y considerar sólo un valor de crucero recomendado. Un avión tendrá durante el vuelo un valor actual de cada una de estas características entre los límites fijados por su tipo de avión. Se trata de los *parámetros de vuelo* de la Sección 3.3.1. A modo de ejemplo de tipo de avión se incluye el Airbus A-320 cuyas características se pueden ver en [63] [64]. Dicho modelo de avión es el más utilizado por Iberia, la mayor compañía aérea española [65].

Las características ligadas al vuelo identifican aspectos que no están limitados por el tipo de avión. Ejemplos de estas características, que se tendrán en cuenta en este sistema, serán el rumbo y la posición actual.

Las posibles maniobras que se pueden realizar sobre los aviones se abstraen como modificaciones de los valores de algunos de los atributos previos, en concreto del rumbo, la altura y la velocidad. El resto de los valores de atributos se actualizarán automáticamente a partir de los ya mencionados.

4.1.3. Pilotos

Los pilotos son las entidades encargadas de manejar los aviones: dan órdenes a estos a través de los correspondientes controles y reciben información desde sus sensores. Los pilotos deben ser conscientes de su plan de vuelo durante todo el trayecto, pero deberán acatar las órdenes que les puedan dar los controladores en un momento dado. Los UAVs serán representados como aeronaves donde los pilotos son sistemas automáticos.

Para los pilotos se tendrán en cuenta características de su comportamiento como pueden ser la experiencia, el estrés, la fatiga o la agresividad a la hora de ejecutar las maniobras. Sólo los pilotos humanos presentarán todas estas características con valores significativos. Los pilotos automáticos no presentarán, por ejemplo, fatiga o estrés. Estas características incidirán sobre todo en el tiempo de respuesta para tomar decisiones y ejecutar las maniobras.

4.1.4. Controladores

Los controladores se limitarán en esta primera aproximación a dos tareas: comunicar el plan de vuelo a los pilotos y gestionar las posibles colisiones que puedan surgir entre aviones. El plan de vuelo se discutió en la Sección 4.1.1 y la resolución de conflictos en la Sección 2.

Otras tareas de los controladores se dejan para posteriores versiones de estos modelos. Por ejemplo, la gestión de las aproximaciones a los aeropuertos o de los aterrizajes y despegues no está contemplada, ya que estas son fases del vuelo no incluidas en la actual especificación como se ha comentado en la Sección 4.1.1. Del mismo modo, la coordinación entre los distintos controladores, por ejemplo para la entrada y salida de regiones de información de vuelo, se plantea también como trabajo futuro. En los modelos actuales se ha considerado que todas las aeronaves vuelan sobre la misma región gestionada por un único controlador.

4.2. Desarrollo


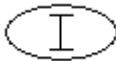
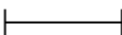

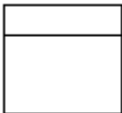

La propuesta de este trabajo combina el ABM [19] con MDE [18], usando una metodología de AOSE, INGENIAS [21], como elemento integrador de estas aproximaciones. El objetivo es facilitar el desarrollo de las simulaciones a los propios expertos del dominio, de forma que se puedan centrar en la información propia del transporte aéreo y la plataforma final de simulación les resulte transparente en buena medida.

Como se comentó en la introducción, ABM [66] y AOSE [22] comparten la utilización de conceptos de agentes para la especificación de sus sistemas. Ambas aproximaciones consideran los agentes como entidades intencionales y sociales. La intencionalidad supone que los agentes se definen como entidades que persiguen objetivos. Los agentes pueden alcanzar estos objetivos gracias a una serie de capacidades (posibilidad de ejecutar acciones) que pueden cambiar su estado interno (o estado mental) o el externo (bien de otros agentes o del entorno). La decisión de qué tareas abordar y la propia ejecución de estas dependen de la información de la que dispone el agente y del entorno. Los agentes son además sociales porque parte de estas acciones requieren la participación de otros agentes para su compleción. Estos agentes pueden representar tanto seres animados que toman decisiones (ej. personas o animales) como organizaciones o sistemas complejos inanimados (típicamente sistemas informáticos). La elección de modelar un elemento

como agente o no depende fundamentalmente del grado de atención que se preste a su toma de decisiones. A pesar de estas similitudes, ABM y AOSE trabajan con distintas orientaciones, lo cual influye en los modelos que generan. ABM trabaja con simulaciones y su uso de agentes está próximo a los dominios modelados; por el contrario, AOSE trabaja con sistemas informáticos por lo que sus agentes están más próximas a abstracciones computacionales. En todo caso y pese a las diferencias, el hecho de trabajar con la abstracción común de agente facilita establecer conexiones entre los modelos de ABM y AOSE, como por ejemplo han mostrado trabajos con INGENIAS [23].

INGENIAS es una metodología MDE de AOSE. Las propuestas MDE se centran en la creación y explotación de modelos de dominio como base del desarrollo. Estos modelos son representaciones abstractas de los conocimientos y actividades que rigen un dominio de aplicación particular [18]. En base a estos modelos se generan de forma semi-automática el resto de productos del desarrollo, como código, documentación u otros modelos. Siguiendo esta línea INGENIAS incluye un lenguaje de modelado orientado a agentes. Este lenguaje proporciona primitivas para especificar un sistema software en términos de agentes y su entorno, ayudándose en la especificación de bajo nivel con extractos de pseudo-código o código [67]. Por ejemplo, las acciones disponibles para un agente, así como los elementos de información que emplean, se especifican gráficamente, pero el algoritmo de procesamiento concreto se describe con código. Un proceso de desarrollo en INGENIAS indica como realizar tal especificación para generar después código. Tanto el modelado como la generación de código se realizan con la herramienta de desarrollo denominada IDK (*INGENIAS Development Kit*). Ésta soporta también la generación automática de documentación HTML.

El lenguaje de modelado de INGENIAS se organiza en torno a los agentes. Los principales conceptos que se usan en los diagramas de este trabajo pueden verse en la *Tabla 1*.

Concepto	Descripción	Icono
Agente	Una entidad agente es una entidad autónoma con identidad y objetivos, y que lleva a cabo actividades para alcanzar dichos objetivos.	
INGENIASUseCase (Caso de Uso)	Un caso de uso es una descripción de una funcionalidad completa del sistema que genera un resultado relevante para los usuarios finales. Se especifica con sus precondiciones, postcondiciones, y las diferentes interacciones que pueden surgir en él.	
MentalState	Un estado mental representa el estado interno del agente en un determinado momento. Se describe como un conjunto de entidades mentales, tales como objetivos, hechos y eventos.	
Objetivo	Un objetivo es un deseo que el agente persigue. Para la planificación el objetivo se representa como un estado a alcanzar o mantener.	
FrameFact (Hecho)	Un hecho es una entidad que describe información que el agente acepta como fiable. Ésta entidad general contiene esta información en sus campos.	
Tarea	Es la primitiva que encapsula acciones o algoritmos no distribuidos. Las tareas pueden usar aplicaciones y recursos, y producen cambios en los estados mentales de los agentes que	


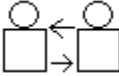

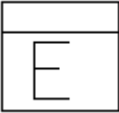
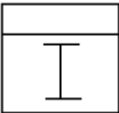
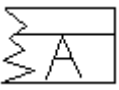
	las ejecutan.	
Rol	Un rol es un conjunto de objetivos y funcionalidades agrupados. Cuando un agente juega un rol, dicho agente persigue los objetivos del rol, cuenta con sus capacidades y participa en las mismas interacciones que él.	
Interacción	Representa una actividad en la que participan dos o más agentes o roles que intercambian información. Sólo puede haber un iniciador y al menos ha de haber un colaborador en la interacción. Una interacción debe detallar también el objetivo que persigue. Este objetivo debe relacionarse con los objetivos de los participantes.	
Especificación GRASIA	Representa una interacción usando los elementos del lenguaje de INGENIAS. Esta descripción permite indicar la información transferida en cada paso entre el iniciador y el colaborador según sus estados mentales. También especifica las tareas que han de ejecutarse, cuando, y el orden de su ejecución.	
Aplicación del Entorno	Representa una aplicación ya existente en el sistema. Una aplicación está contenida en un elemento que no es un agente ni uno de sus recursos. Las aplicaciones poseen métodos que los agentes pueden usar y les proporcionan notificaciones sobre el entorno mediante eventos.	
Aplicación Interna	Es una aplicación implementada específicamente para el sistema que se está desarrollando. Los agentes las usan mediante métodos.	
ApplicationEventSlots (Eventos de Aplicación)	Es un evento producido por una aplicación. Este tipo de evento dispone de una serie de campos para describir información.	

Tabla 1. Principales conceptos del lenguaje de modelado de INGENIAS.

5. Entorno de simulación

Desde la aproximación MDE y ABM adoptada, el trabajo realizado tiene como elemento central los modelos basados en agentes del tráfico aéreo. Como se comentó en la sección anterior, estos modelos se especifican usando el lenguaje de INGENIAS [21] y cubren las actividades e interacciones básicas de pilotos, controladores y aviones, todos ellos considerados agentes. Aunque los aviones no son entes animados, se ha encontrado adecuado especificarlos con agentes para representar su intercambio de información con los pilotos. Este tipo de decisión es común en ABM [68] como también se señaló en la Sección 4.2. A partir de estas especificaciones se genera la simulación en sí. El diseño de ésta se basa en una arquitectura Modelo-Vista-Controlador (MVC, *Model-View-Controller*) [69] de tres capas: lógica, directamente relacionada con los anteriores modelos y en este caso dependiente de la plataforma de simulación de destino; visualización, dependiente de la plataforma gráfica de destino; controlador, que sincroniza a los anteriores. Las siguientes secciones detallan estos componentes, con la Sección 5.1 dedicada a los modelos y la Sección 5.2 a la arquitectura de la aplicación de simulación.

5.1. Especificación

En esta sección se presentan los distintos diagramas para el tráfico aéreo. Al tratarse de una especificación orientada a agentes, los diagramas se centran principalmente en cómo estos agentes realizan las distintas operaciones: objetivos perseguidos, recolección de información, toma de decisiones, y ejecución de acciones. Las secciones se organizan siguiendo esta división. La Sección 5.1.1 describe los principales casos de uso del tráfico aéreo. Después, la Sección 5.1.2 especifica los objetivos de alto nivel involucrados. Las secciones sucesivas, 5.1.3, 5.1.4 y 5.1.5, se ocupan de interacciones específicas. Para ellas describen los objetivos concretos y las interacciones que los abordan.

5.1.1. Casos de uso

En primer lugar se van a presentar los casos de uso principales para el agente piloto, que es el núcleo de este estudio. Como se puede observar en la Figura 2, el objetivo principal del piloto es llegar al destino sin sufrir ningún incidente grave, es decir, que la tripulación llegue al destino sana y salva (“Arrived Safe And Sound”). Para ello el piloto participa en tres casos de uso, que se corresponden con tres partes claramente diferenciadas del vuelo. Dichos casos de uso son:

- *Despegue del avión.* Engloba todas las tareas previas al arranque del avión y despegue del mismo. En esta apartado se incluye el suministro de los planes de vuelo a cada piloto.
- *Interacción con el entorno.* Son los procesos que tienen lugar durante toda la ruta del vuelo. Incluyen el pilotaje del avión por el piloto, la operación de los controladores, el intercambio de mensajes entre controladores y pilotos, y la recepción de señales desde sensores.
- *Aterrizaje del avión.* Como la fase de aterrizaje no se considera en este trabajo, aquí sólo se incluye la parada del avión.

Como se ha especificado en los requisitos, este trabajo se centra principalmente en el segundo de estos casos de uso, el pilotaje del avión durante la realización del trayecto. El primer caso de uso es considerado mínimamente para abordar la comunicación del plan de vuelo.

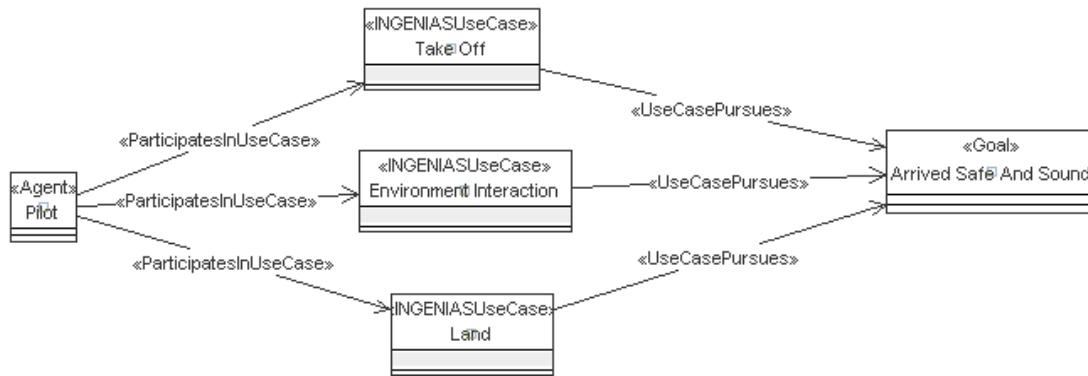


Figura 2: Casos de Uso.

5.1.2. Objetivos principales del sistema

La participación del piloto en los casos de uso anteriores viene dirigida por su persecución de varios objetivos que muestra la Figura 3. Para satisfacer el objetivo “Arrived Safe And Sound”, el piloto debe completar el vuelo. El primer paso es obtener el plan de vuelo (“Flight Plan Take”). Según las regulaciones vigentes, ningún piloto (y por consiguiente avión) puede iniciar su vuelo sin que antes cuente con un plan de vuelo. En estos modelos se considera que los pilotos vuelan para una compañía, así que será la empresa la que suministre los planes. La empresa será un agente que explicaremos más adelante. Una vez que el piloto dispone de su plan de vuelo, su siguiente objetivo es llegar al destino evitando colisiones con otros aviones u obstáculos que se interpongan en la trayectoria del avión, como podrían ser montañas elevadas o zonas restringidas. Llegar al destino se representa mediante el objetivo “Arrived to Destination”, mientras que evitar colisiones se representa en el diagrama por los objetivos “Collision Avoided” y “Conflict Flag Generated”. La satisfacción de estos dos últimos objetivos tiene prioridad sobre la satisfacción del objetivo de llegar al destino, ya que el piloto ha de garantizar en primer lugar la integridad de los pasajeros y el avión. El objetivo de llegar al destino se descompone a su vez en otros tres objetivos:

- *Descomponer el plan de vuelo, “Flight Plan Decomposed”*. El plan de vuelo se ha de descomponer en una serie de tramos. El piloto intentará realizar cada uno de estos tramos, lo que representa el objetivo “DecisionsForLegMade”. Dicho objetivo se satisface mediante la toma de las decisiones pertinentes de pilotaje.
- *Actualizar la posición del avión, “Plane Position Updated”*. Este objetivo se refiere a la actualización de los datos de vuelo del avión. Teniendo en cuenta la velocidad, altura y orientación del avión, se calcula la siguiente posición de la aeronave y la información que proporcionan sus sensores. Ésta será la información percibida por el piloto y en base a la cual actuará.
- *Comprobar que se ha llegado al destino, “Flight Plan Completed”*. Tras completar uno de los tramos del vuelo, el piloto comprueba si ese era el último tramo. Si es así, el avión ha llegado ya al destino; si no, se procesa el siguiente tramo. Como completar el vuelo implica completar sus tramos, este objetivo depende de que se haya cumplido el objetivo de tramo completado “Flight Leg Completed”.

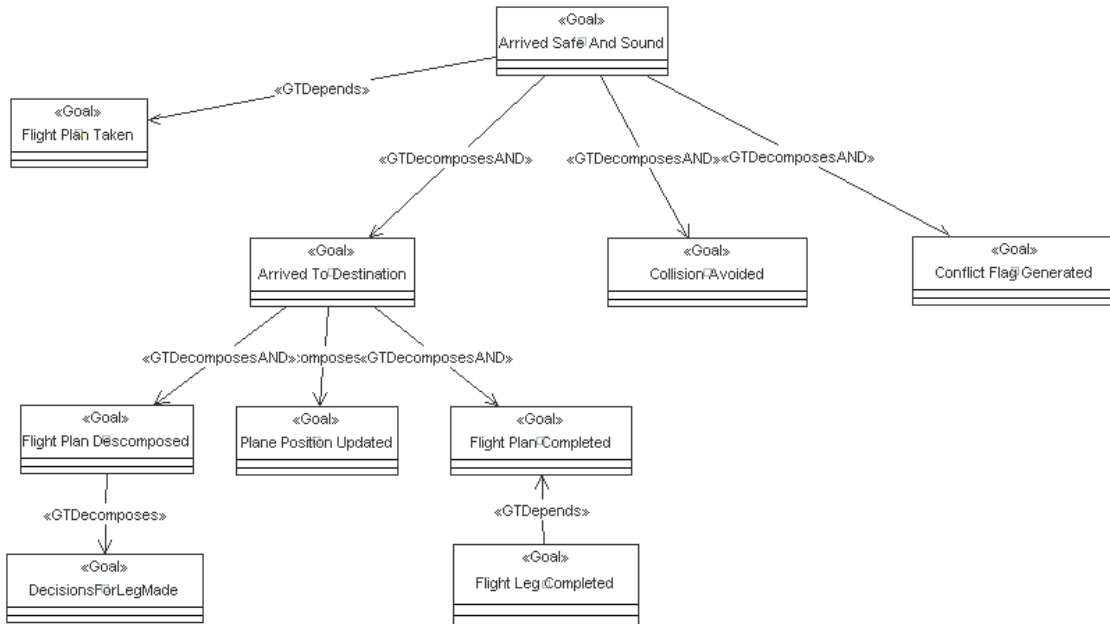


Figura 3: Diagrama de Objetivos.

5.1.3. Generación y obtención del plan de vuelo

El primer objetivo que aborda el piloto es la obtención del plan de vuelo, “Flight Plan Taken”. Como se comentó al introducir los requisitos y en la Sección 5.1.2, hay un agente que representa a la compañía aérea y se encarga de suministrar los planes de vuelo a cada uno de los pilotos. Este agente se denomina “FlightPlanner”. Como se muestra en la Figura 4, inicialmente tiene en su estado mental crear los planes de vuelo. A partir de este hecho, el agente procede a crear los planes de vuelo para los distintos pares piloto-avión que existan. Este proceso se muestra en la Figura 5.



Figura 4: Estado Mental inicial del agente “FlightPlanner”.

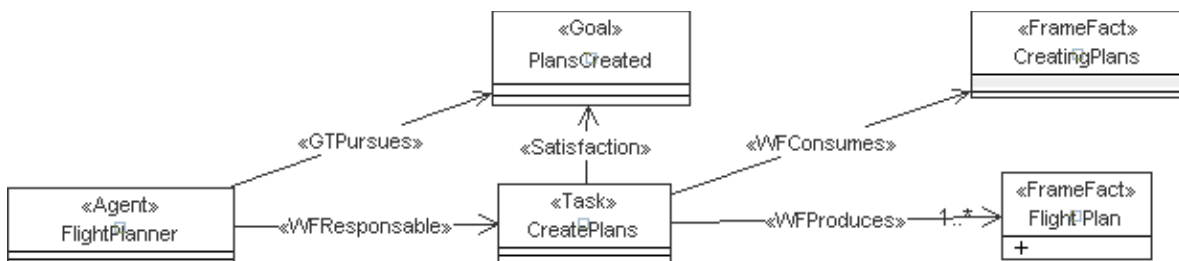


Figura 5: Tarea de Crear Planes de Vuelo.

Los planes de vuelo incluyen, entre otra información, el piloto y avión al que van destinados. De esta forma, una vez generados se pueden enviar al agente piloto correspondiente. Para ello se utiliza la interacción mostrada en la Figura 6, que representa parte de la comunicación entre los agentes indicados. El “FlightPlanner” toma el rol de iniciador de la comunicación y el piloto es el colaborador de ésta. El “FlightPlanner” notifica el plan de vuelo al piloto encapsulándolo en un

campo del hecho denominado “PlanAnswer”. El piloto a través de la conversación (lo que corresponde a un acceso a la interacción), recibe esta información (consume el hecho) y lo añade a su propia información interna como nuevos hechos (crea dos hechos en su estado mental):

- Un hecho representa el plan de vuelo (“Flight Plan”) que ha de seguir el piloto durante todo el trayecto, salvo que alguna circunstancia especial lo impida. La Figura 7 muestra que este plan de vuelo queda encapsulado como un campo del estado mental del piloto “Pilot Mind”. A partir de ese momento se convierte en información interna del piloto a la que éste puede acceder en todo momento. La tarea de “CreatePilotMind” de la Figura 7 también tiene la finalidad de suministrar los valores iniciales de experiencia, estrés y fatiga del piloto dependiendo de su perfil inicial.
- Un hecho para arrancar el avión (“CanInitiateStartPlane”). Se trata de un hecho de control que indica al piloto que aún no ha empezado a volar pero que ya tiene toda la información para hacerlo. El vuelo se iniciará cuando la hora de salida indicada en el plan de vuelo coincida con la hora actual.

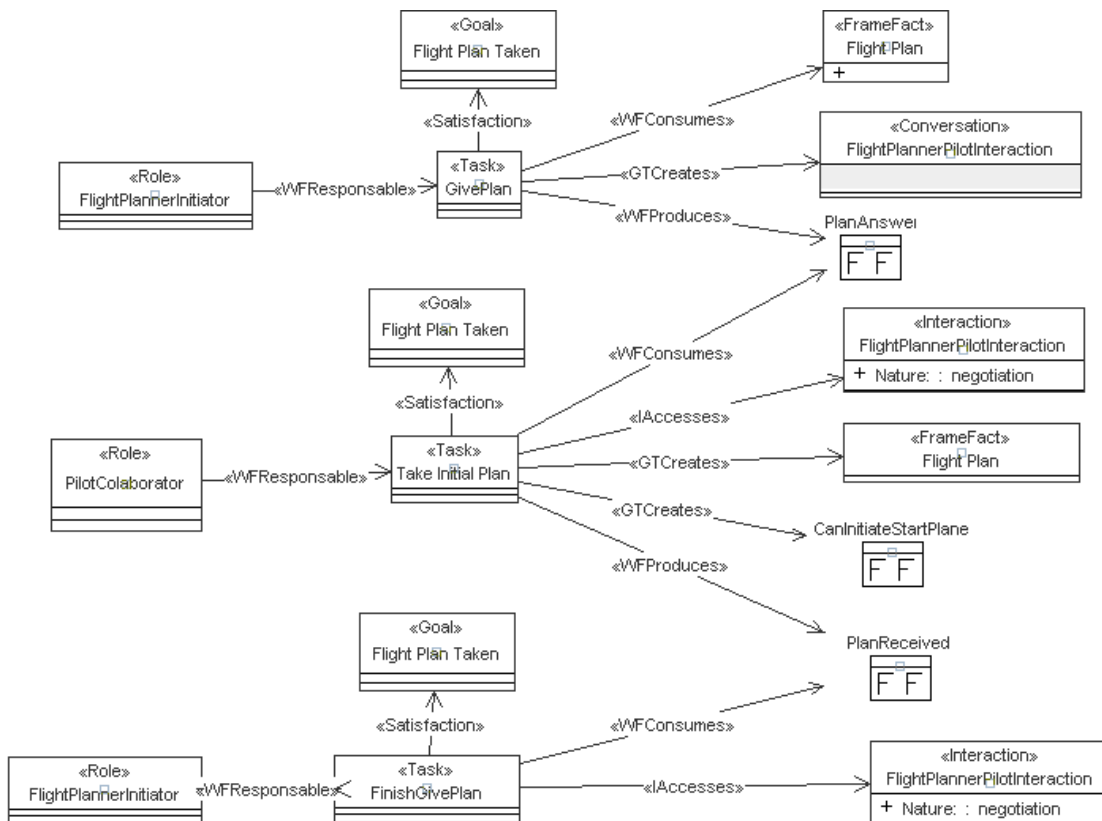


Figura 6: Diagrama de Interacción Para Recibir el Plan de Vuelo Inicial.

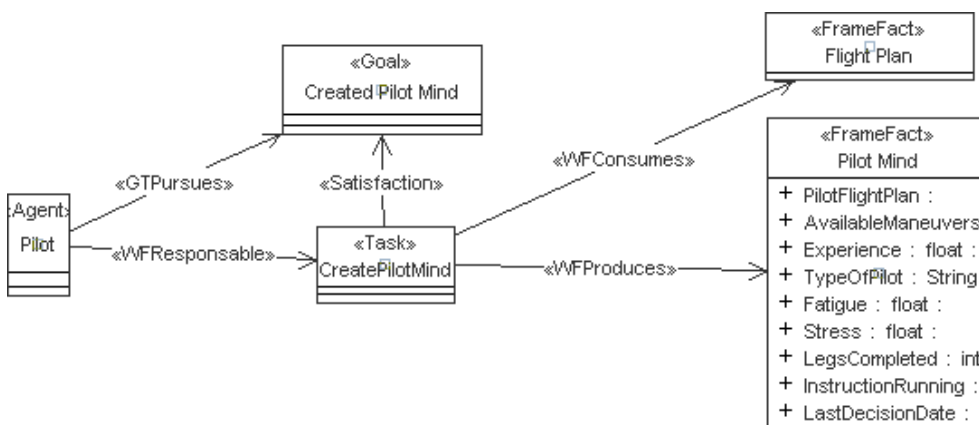


Figura 7: Creación del Estado Mental Inicial del Piloto.

Una vez procesada la información del plan de vuelo, el piloto responde al agente iniciador indicándole que ha recibido la información y que se puede terminar la conversación (interacción). Para ello crea otro hecho (“PlanReceived”) en la interacción. Una vez que el “FlightPlanner” haya recibido este hecho procederá a finalizar definitivamente la comunicación. En ese momento se podrá decir que el proceso de suministrar el plan de vuelo ha concluido y que el objetivo de “Flight Plan Taken” se ha satisfecho.

5.1.4. Seguimiento del plan de vuelo

Una vez que el piloto dispone de su plan de vuelo, su siguiente objetivo es llegar al destino. Para explicar este proceso se ha hecho uso del diagrama de actividad mostrado en la Figura 8. Éste recoge el desarrollo general en el caso de que el trayecto no sufra ningún imprevisto. Lo primero que hace el piloto es recibir el plan de vuelo (“Take Initial Plan”). Esta actividad corresponde con las acciones indicadas en la Sección 5.1.3. A continuación el piloto arranca el avión a la hora que el plan de vuelo indica que debe partir (“Start Plane”). Una vez arrancado el avión, se entra en un proceso iterativo hasta que se llega al destino. Dicho proceso empieza obteniendo el siguiente tramo a partir del plan de vuelo (“Flight Plan Monitoring”). Después se actualiza la posición del avión (“Update Plane Status”) y se consulta si el tramo se ha completado (“Check Leg Completed”).

Cuando el tramo se ha completado hay tres situaciones posibles:

- El tramo que se completó es el último del plan de vuelo. Entonces se satisface el objetivo de plan de vuelo completado y se procede a parar el avión (“Stop Plane”).
- El tramo se ha completado mientras el piloto se encontraba lidiando con una situación de riesgo. En este caso se pasará al siguiente tramo, pero con las condiciones de vuelo que el controlador estableció para el tramo anterior (“GoingNextLegWithConflict”).
- En caso contrario, es decir si no hay conflicto, se intenta obtener el siguiente tramo y pasar a su ejecución.

En otro caso, es decir, cuando el tramo todavía no se ha completado, el piloto crea las decisiones correspondientes para completar con éxito el tramo. Dichas decisiones serán descompuestas en una serie de instrucciones que el piloto ejecutará (“Make and Decompose Decisions”). La ejecución de las instrucciones se modela como una interacción con el agente avión. El piloto manda al avión las maniobras a ejecutar y chequea que se hayan realizado con éxito (“Interaction Pilot-Plane”). Seguidamente se procede otra vez a la actualización de la posición de la aeronave. Hay que señalar que la actualización de la posición del avión no es dependiente de la ejecución de las instrucciones. Es decir, la posición será actualizada tanto si el piloto tiene que ejecutar instrucciones como si no tiene ninguna para ejecutar. En este caso, las limitaciones del lenguaje de modelado para este tipo de diagramas no permiten indicar claramente esto.

Las siguientes secciones detallan algunas de las tareas mostradas aquí. Así en la Sección 5.1.4.1 se habla del *Arranque del avión*, la Sección 5.1.4.2 trata de la *Descomposición del plan de vuelo*, la Sección 5.1.4.3 versa sobre la *Toma de decisiones en un tramo*, la Sección 5.1.4.4 atiende la *Ejecución de maniobras*, y finalmente la Sección 5.1.4.5 se ocupa de las *Comprobaciones tras la maniobra*.

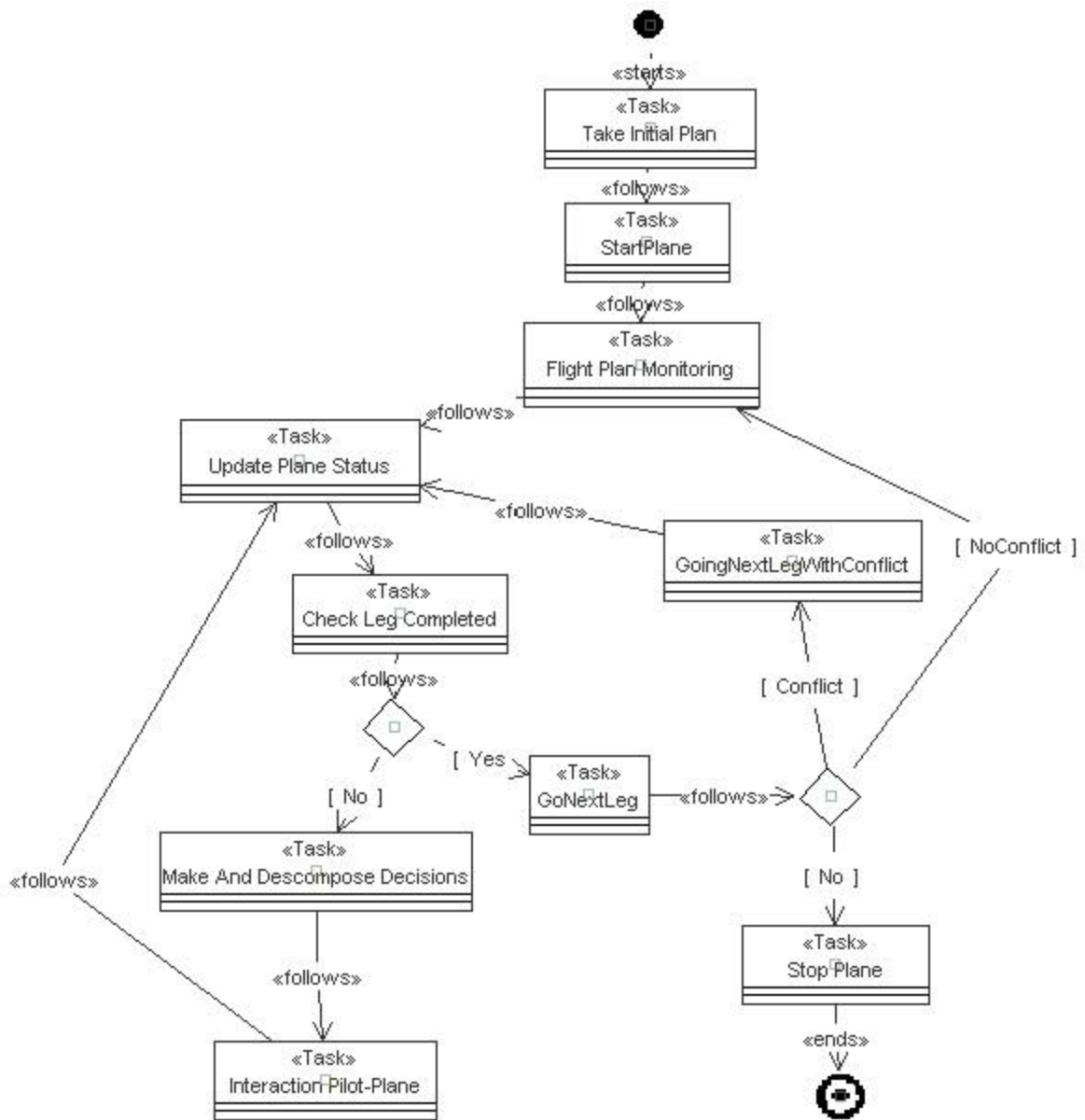


Figura 8: Diagrama de Actividades General.

5.1.4.1. Arranque del avión

Como se vio en la Sección 5.1.3, cuando el piloto recibe el plan de vuelo lo encapsula en su estado mental y crea un hecho denominado “CanInitiateStartPlane”. Este hecho le indica que está preparado para iniciar el vuelo cuando se alcance la hora de salida. Este proceso se representa en la Figura 9. El piloto accede al plan de vuelo en su estado mental para obtener la hora de salida y compararla con la actual. En el caso de que coincidan, el piloto sabe que ha de iniciar ya el despegue, lo cual representa con el hecho “InitiateStartPlane”.

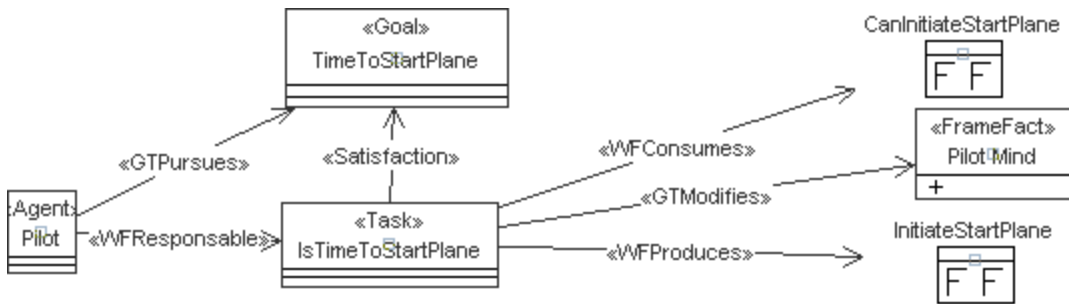


Figura 9: Comprobación de la Hora de Salida del Vuelo.

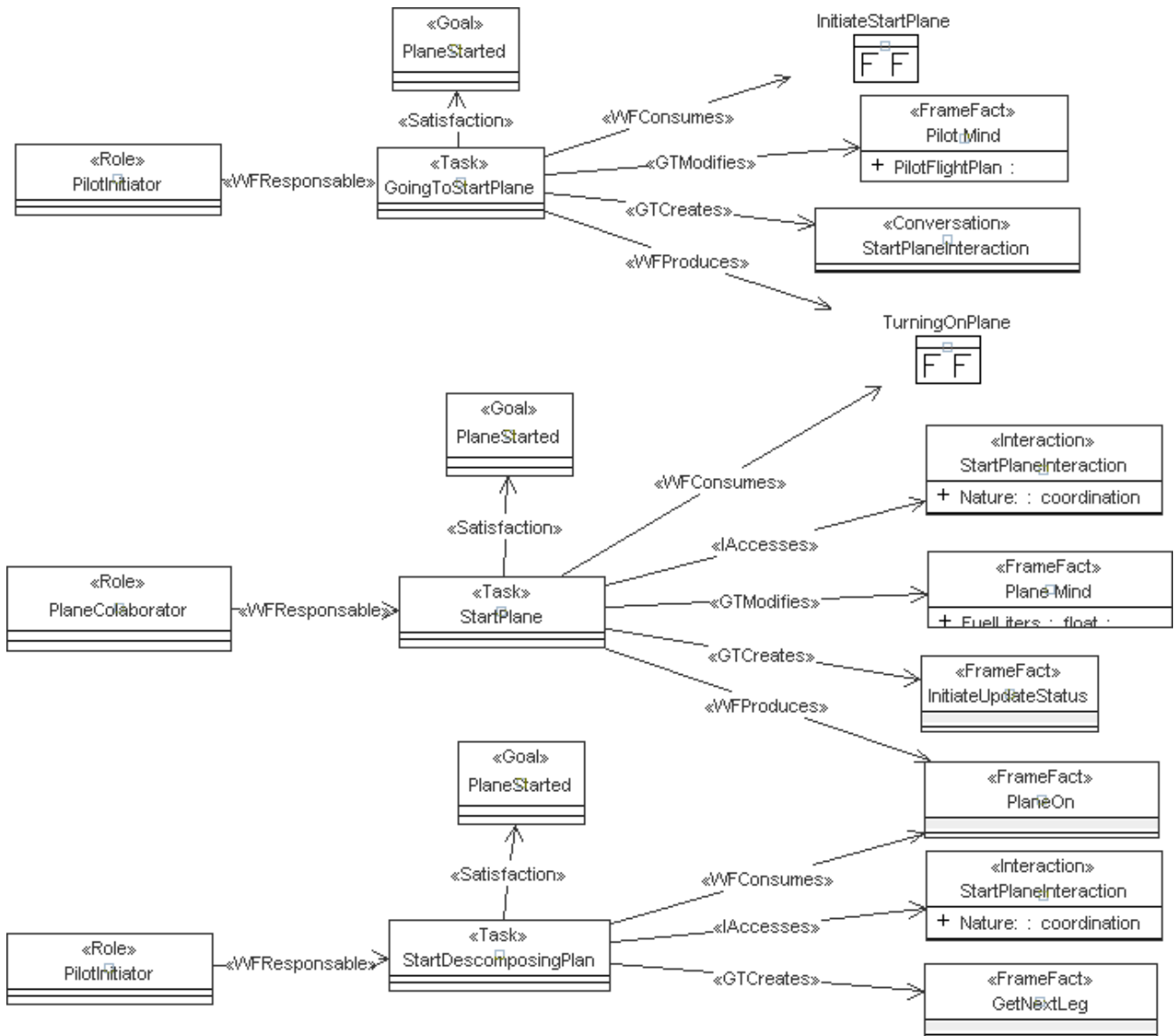


Figura 10: Interacción para Arrancar el Avión.

El piloto inicia el vuelo arrancando los motores del avión. Esta acción se traduce en las especificaciones en la interacción entre el piloto y el avión que se muestra en la Figura 10. En esta interacción el piloto toma el rol de iniciador de la conversación. Primeramente accede al plan de vuelo de su estado mental para saber qué avión se le ha asignado. Éste es el avión con el que tiene que comunicarse. A continuación, el piloto crea una conversación con dicho avión y le pasa a través de ella el hecho (“TurningOnPlane”). Este hecho le indica al avión que debe arrancarse y las coordenadas del aeropuerto de salida. Una vez que el avión ha recibido este hecho, actualiza su posición inicial e indica con el hecho (“InitiateUpdateStatus”) que los valores de su estado mental

se pueden empezar a actualizar teniendo en cuenta la velocidad y orientación que tiene en cada momento. Como última acción, el avión comunica al piloto a través de la interacción que la realización de las tareas correspondientes a la inicialización del avión ha finalizado (“PlaneOn”). Una vez que el piloto ha recibido esta información puede dar por concluido el arranque del avión.

Todas las órdenes de control al avión se transmitirán de una forma similar a la que se acaba de ver. Hay que recordar que en los requisitos (ver Sección 4) se indicó que pilotos y aviones se modelan como agentes, por lo se relacionan mediante interacciones (paso de mensajes) en los diagramas.

Después de arrancar el avión, el piloto puede empezar a trabajar en la descomposición del plan de vuelo. Esta descomposición es iterativa y siempre consiste en obtener y procesar el siguiente tramo del plan que se ha de realizar (hecho “GetNextLeg”) hasta completar el trayecto.

5.1.4.2. Descomposición del plan de vuelo

El hecho “GetNextLeg” indica al piloto que debe proceder a procesar un nuevo tramo del plan de vuelo. Este objetivo se satisface a través de la actividad de descomposición en tramos del plan de vuelo (“Flight Plan Monitoring”). El proceso se muestra en la Figura 11.

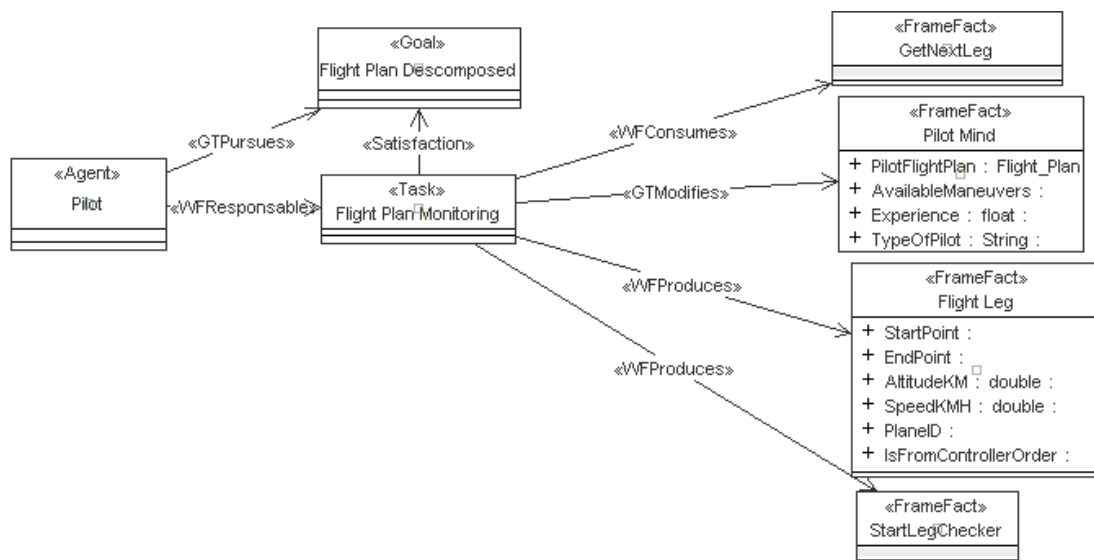


Figura 11: Descomposición del Plan de Vuelo.

Tras recibir el hecho “GetNextLeg”, el piloto accede a su estado mental para obtener el plan de vuelo y saber cuál ha sido el último tramo completado. En el estado mental se tendrá el número de tramos completados y con esto se puede saber cual ha sido el último tramo. A partir de esta información, el piloto construye el siguiente tramo a cubrir y produce un hecho que iniciará el proceso que comprueba si el tramo se ha completado con éxito (hecho “StartLegCheck”).

Si el piloto ha terminado el tramo, pasa a procesar el siguiente (ver Sección 5.1.4.5). En caso contrario, el piloto pasa a tomar las decisiones oportunas para llegar al final del tramo (ver Sección 5.1.4.3).

5.1.4.3. Toma de decisiones en un tramo

Tomar las decisiones acerca de cómo operar en un tramo requiere en primer lugar evaluar la situación. Esta evaluación requiere un tiempo por parte de los pilotos. Dicho tiempo depende de características como el estrés, la fatiga, la experiencia y el tipo de personalidad de dicho piloto. A

fin de incluir este tiempo de decisión explícitamente, se incluyen los elementos mostrados en la Figura 12. El piloto consume un hecho “StartThinkNewDecision” que dispara la tarea de reflexión (“ThinkNewDecision”). Esta tarea accede al tramo actual (“Flight Leg”), que determina que el vuelo se ha iniciado, y al estado mental del piloto, donde se encuentran los atributos que determinan el tiempo de reflexión. Transcurrido el tiempo determinado por la tarea y la información anterior, el piloto habrá procesado la información y estará preparado para producir una decisión, lo cual indicará con el hecho “CanCreateNewDecision”.

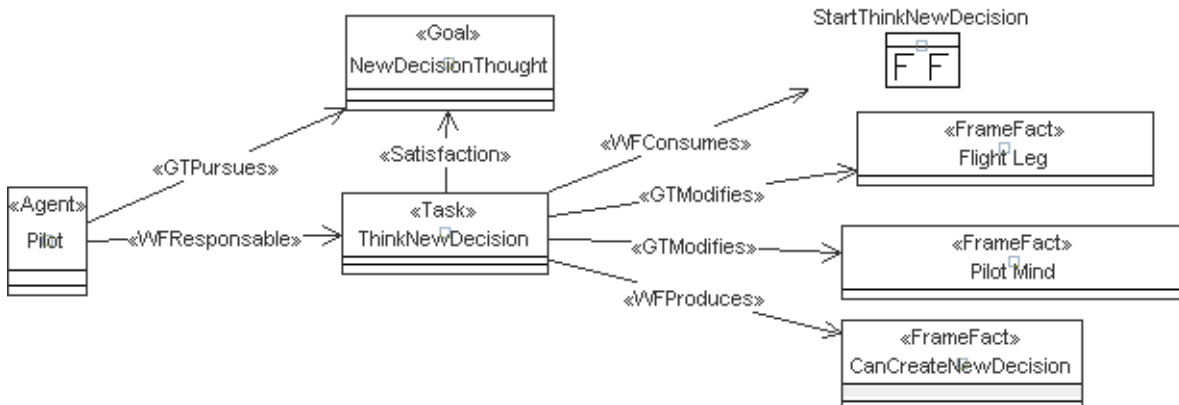


Figura 12: Tiempo de Creación de las Decisiones.

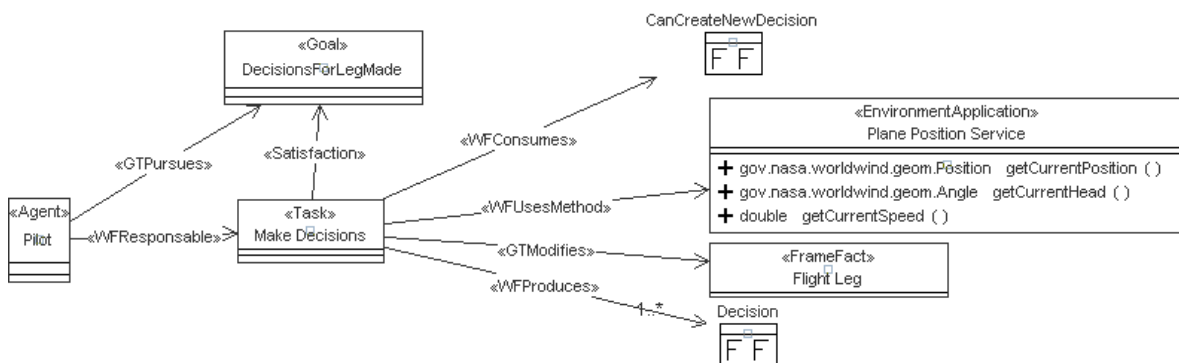


Figura 13: Creación de las Decisiones.

Una vez el piloto ha reflexionado, puede decidir qué hacer para completar el tramo. La generación de estas decisiones se observa en la Figura 13. El piloto usa la información sobre el tramo a completar (hecho “Flight Leg”) y los indicadores del avión (aplicación del entorno “Plane Position Service”) sobre su estado actual, incluyendo posición, orientación y velocidad. Estas decisiones se descompondrán en acciones más simples, que corresponden a maniobras sobre el avión. La Figura 14 muestra este proceso. La decisión tomada (“Decision”) se usa para producir una serie de instrucciones (“Throw Instruction”), que a su vez contienen la información para generar la maniobra. También se crea un hecho que indica que se puede proceder a pensar las siguientes decisiones que se van a llevar a cabo (“StartThinkNewDecision”).

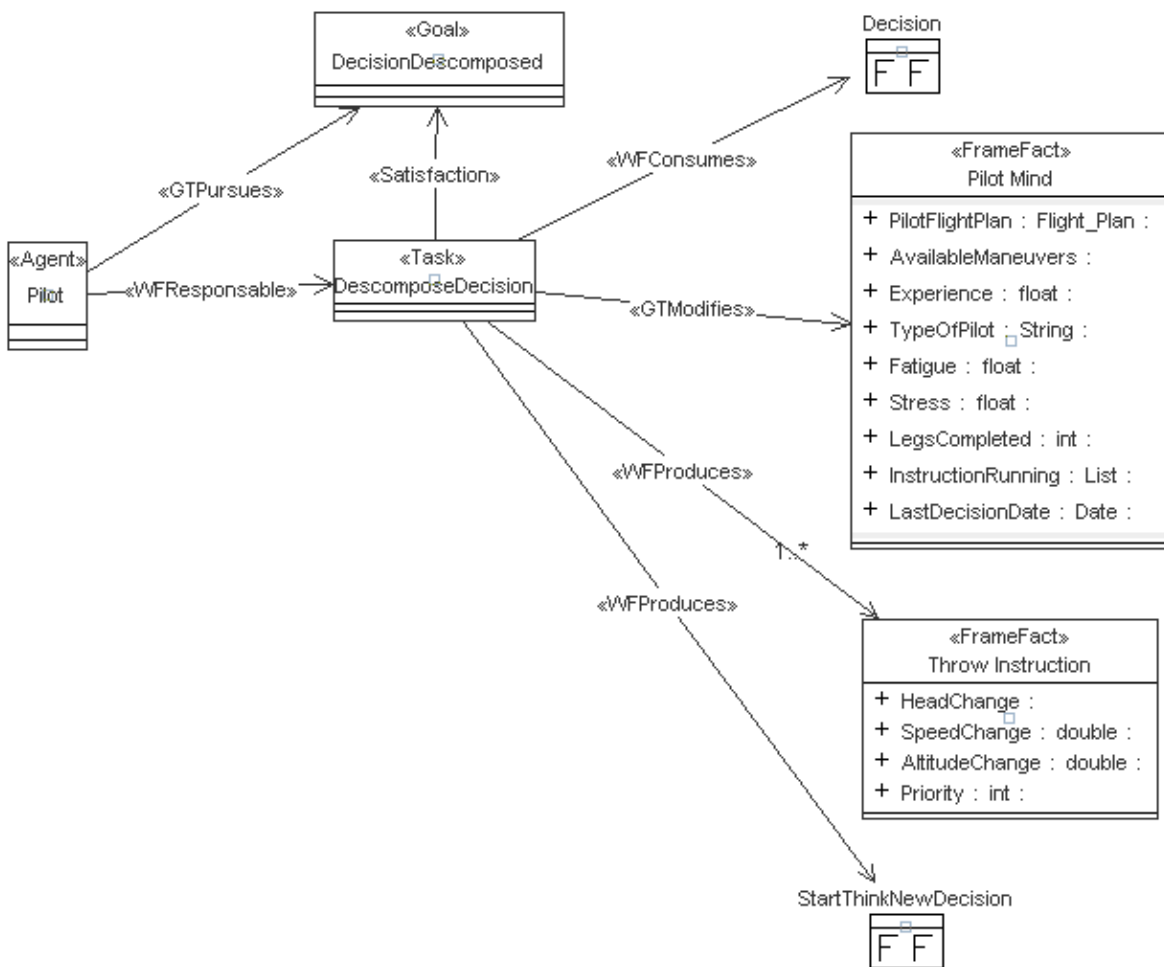


Figura 14: Descomposición de Decisiones.

Se contempla la posibilidad de que un piloto pueda iniciar una acción mientras se está ejecutando otra. Una situación típica sería un cambio de decisión por una situación de peligro o una orden de un controlador. El campo “InstructionRunning” del estado mental del piloto indica si hay alguna instrucción que se esté ejecutando. En caso afirmativo se compara la prioridad de las instrucciones que se están ejecutando y que se desea ejecutar. Sólo se podrá ejecutar la instrucción cuando su prioridad sea mayor o igual a la de las instrucciones que están en ejecución. La prioridad de las tareas puede tomar tres valores posibles:

- 0. Corresponde a decisiones y/o instrucciones que provienen de los pilotos.
- 9. Se trata de órdenes que vienen de los controladores.
- 10. Es un valor especial para la instrucción de parar o aterrizar el avión. Es la de máxima prioridad porque supone que el vuelo ha terminado.

5.1.4.4. Ejecución de maniobras

El piloto ha de operar los controles del avión para llevar a cabo las maniobras seleccionadas, y éste ha de ejecutar tales órdenes. La Figura 15 muestra este proceso. Piloto y avión se modelan como agentes, por lo que hay que crear una interacción para la comunicación entre ellos. El piloto interpretará el rol de iniciador mientras que el avión que pilota tendrá el rol de colaborador. El piloto crea la interacción con la tarea “Execute Instruction”. Para averiguar el agente avión con el que ha de comunicarse, el agente piloto accede al plan de vuelo de su estado mental, y dentro de éste a la identificación de la aeronave. El estado mental del piloto también indica qué instrucción está siendo ejecutada actualmente. Por último, haciendo uso de la instrucción producida por el piloto, esta tarea generará la maniobra que el avión tiene que llevar a cabo (hecho “Manoeuvre”).

Nótese que aunque los contenidos de “Decision” y “Manoeuvre” son similares, son conceptualmente distintos. El primero representa información manejada por el piloto mientras que el segundo representa la acción que se está ejecutando sobre el avión.

Una vez que se indica la maniobra al avión a través de la interacción, éste procede a actualizar los valores de los atributos de su estado mental “Plane Mind”. Dichos atributos son, como se comentó en los requisitos (ver Sección 4.1.2), la velocidad, altitud o rumbo del avión.

La realización de la maniobra por el avión consume un cierto tiempo. Durante este tiempo, el piloto examina los indicadores del avión para determinar cuándo ha concluido la maniobra. Cuando esto ocurre, el piloto elimina la instrucción de aquellas que tenía marcadas como en ejecución dentro de su estado mental (atributo “InstructionRunning”).

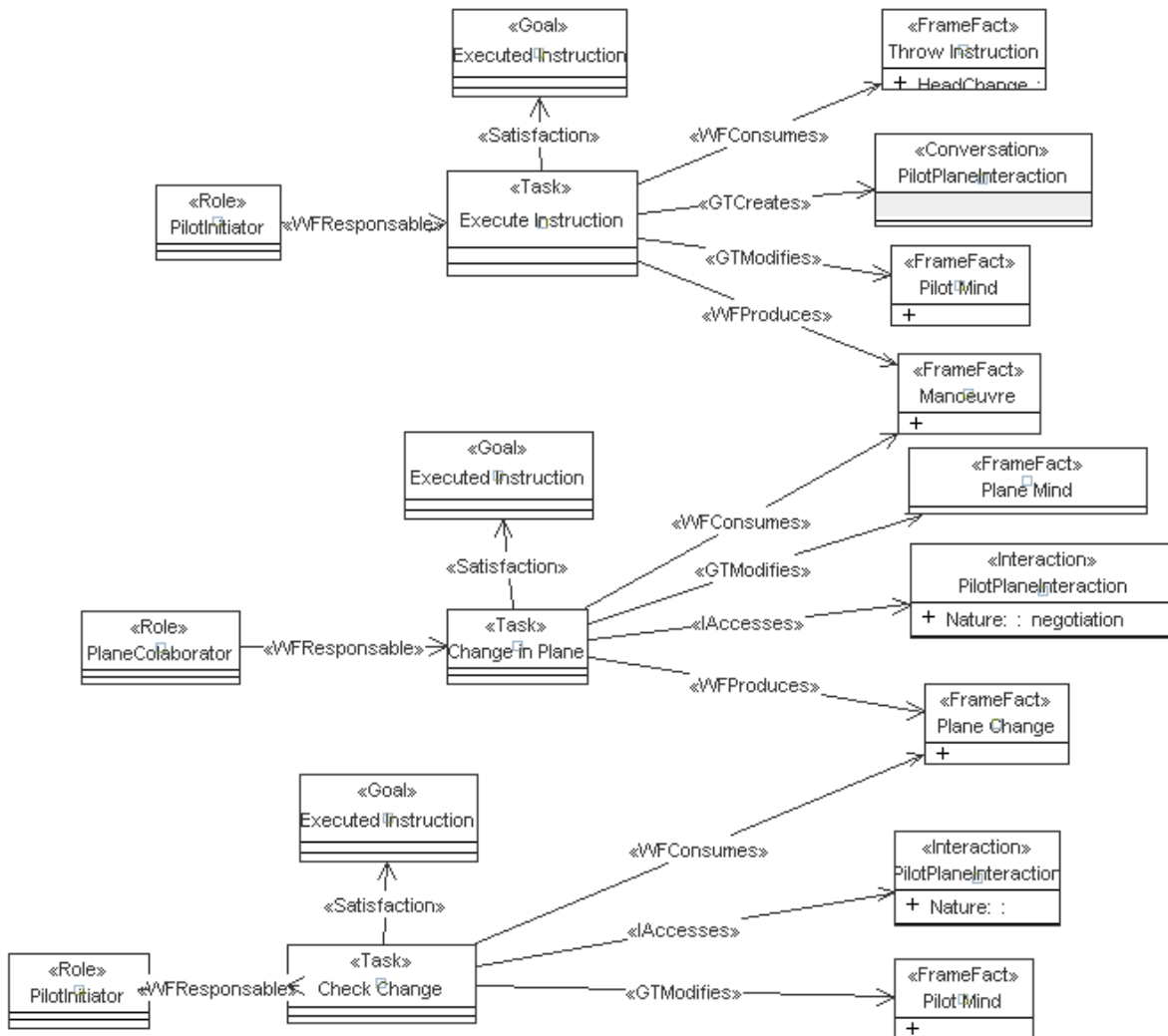


Figura 15: Interacción Piloto-Avión: Ejecución Maniobra.

5.1.4.5. Comprobaciones tras la maniobra

El piloto utiliza la aplicación interna “Leg Checker” para que continuamente se compruebe si se ha completado el tramo en curso. Esta aplicación se inicia cuando se ejecuta la tarea “Check Leg Completed” cada vez que el piloto se dispone a recorrer un tramo nuevo. Este proceso se recoge en la Figura 16. En caso de que el tramo haya sido completado con éxito, la aplicación lanzará un evento “LegCompleted”. El piloto procesa este evento y utiliza la información sobre el plan de vuelo y el tramo que acaba de finalizar para determinar en qué condiciones se encuentra el vuelo. Esto se hace ejecutando la tarea “GoNextLeg” (ver Figura 17). Esta tarea tendrá la finalidad de confirmar que el tramo se ha finalizado y generar un hecho indicando las condiciones en que

terminó. Aquí se pueden encontrar tres situaciones diferentes:

- El tramo que se completó es el último del plan de vuelo. En este caso se ha llegado al destino. Se satisface el objetivo de plan de vuelo completado y se procede a generar el hecho “AllLegsCompleted” que posteriormente iniciará la tarea de parar el avión (“Stop Plane”).
- El tramo completado no es el último del plan de vuelo, pero formaba parte de él. En este caso se generará el hecho “GetNextLeg” que permitirá que se obtenga el siguiente tramo del plan de vuelo.
- El tramo completado fue generado por orden de los controladores para eliminar un conflicto entre aviones. En este caso la tarea generará el hecho “GoNextLegWithConflict” que indicará el tramo que se encontraba en ejecución cuando se abordó el conflicto. Esta información permitirá conocer cuáles eran las condiciones de vuelo previas al conflicto para retomarlas, es decir, construir el siguiente tramo.

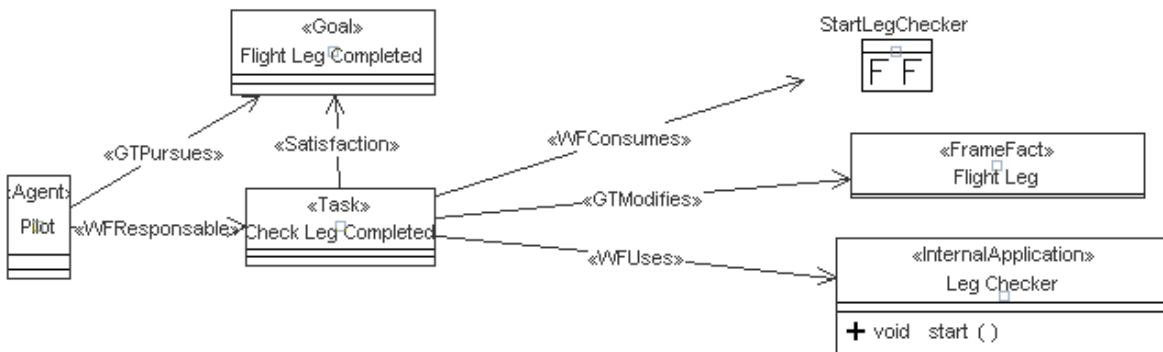


Figura 16: Aplicación que Comprueba la Finalización del Tramo.

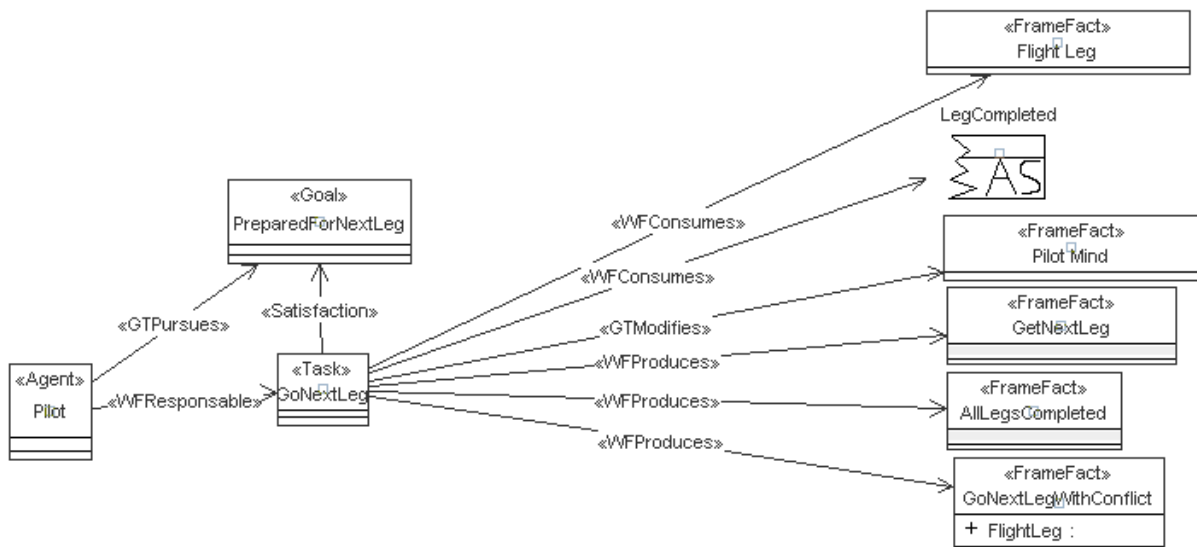


Figura 17: Diagrama para Ir al Siguiente Tramo.

5.1.5. Gestión de conflictos

Como se comentó en la Sección 4.1.4, la resolución de conflictos es una tarea prioritaria para pilotos y controladores, ya que estos conflictos implican que existe un peligro potencial de colisión. La Figura 18 muestra las actividades involucradas en estos aspectos en nuestro trabajo. Estas actividades incluyen la detección de conflictos y la generación de órdenes para resolverlos, la ejecución de las mismas y la monitorización de la resolución.

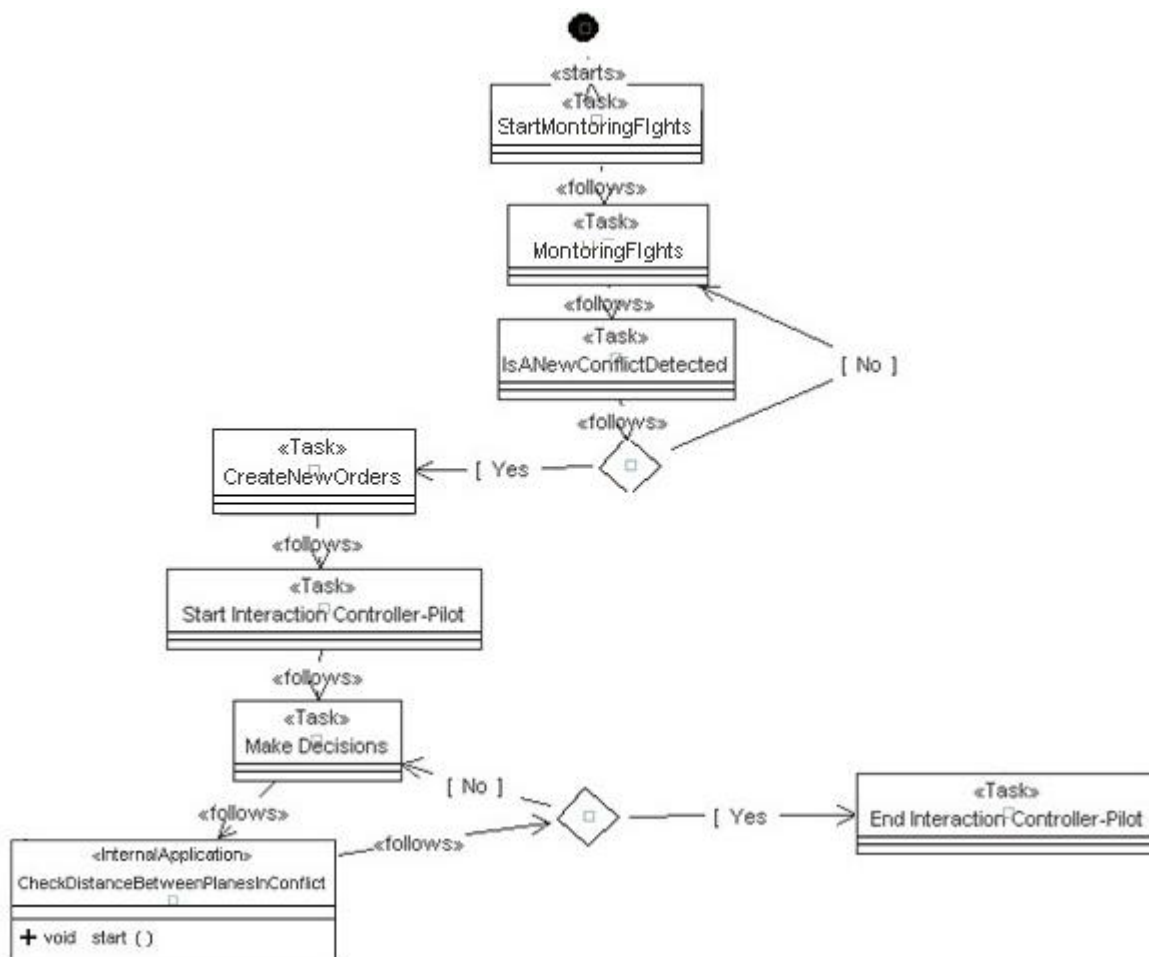


Figura 18: Diagrama de Actividad Evitar Conflicto.

Estas actividades comienzan con los controladores iniciando la monitorización de los vuelos. Se trata de la actividad “StartMonitoringFlights”. Para esta labor, los controladores cuentan con sistemas de apoyo que comprueban las distancias entre los vuelos en su área de control. Estos sistemas son aplicaciones del entorno. Cuando la aplicación detecta un conflicto informa al controlador con un evento. Dichos conflictos se producen cuando no se respeta la separación mínima de seguridad entre aviones. Tras ser avisado de un conflicto, el controlador comprueba si está o no siendo gestionado actualmente (“IsANewConflictDetected”). Si el conflicto ya fue gestionado, entonces el controlador cursó a los pilotos las órdenes para resolverlo y seguirá monitorizando los vuelos para comprobar la situación. Si por el contrario es un nuevo conflicto, será necesario iniciar su resolución.

Para resolver el conflicto el controlador crea la lista de órdenes correspondientes para cada uno de los pilotos involucrados (“CreateNewOrders”), y seguidamente se las comunica mediante interacciones (“Start Interaction Controller-Pilot”). Las órdenes normalmente se corresponden con cambios de altitud, cambios en el rumbo, reducir velocidad o combinaciones de las anteriores. Tras recibir las órdenes, el piloto las procesa como un nuevo tramo ad hoc de su plan de vuelo. Esta encapsulación de las órdenes como tramos especiales pretende reaprovechar las tareas ya desarrolladas para la gestión de tramos que se vieron en las secciones anteriores. Mientras, el controlador sigue monitorizando las distancias con la aplicación “CheckDistanceBetweenPlanesInConflict”, que mide la separación de las aeronaves, por si el conflicto desaparece.

Cuando el piloto termina el tramo con la orden del controlador, comunica a éste que ha finalizado con éxito sus órdenes y retoma su plan de vuelo. Tras la notificación el controlador marca

que las órdenes se han realizado y que la gestión del conflicto ha concluido (“End Interaction Controller-Pilot”). En caso de que prosiga el conflicto, la aplicación “StartMonitoringFlights” disparará una nueva alarma.

Las siguientes secciones explican con mayor detalle algunas de las actividades involucradas en la gestión de conflictos. En concreto la Sección 5.1.5.1 trata la *Detección de conflictos*, la Sección 5.1.5.2 habla de la *Generación y comunicación de órdenes*, mientras que la Sección 5.1.5.3 se ocupa de la *Ejecución de órdenes*.

5.1.5.1. Detección de conflictos

Cuando la aplicación iniciada por la tarea “StartMonitoringFlights” lanza una alarma de conflicto (evento “PlanesInConflict”), el controlador comprueba con la tarea “IsANewConflictDetected” si se trata realmente de un nuevo conflicto o es uno que ya se está abordando. La Figura 19 muestra esta tarea. El controlador accede a su estado mental “ControllerMind” para consultar la lista de todos los conflictos gestionados hasta la fecha. Si se trata de un nuevo conflicto, la tarea genera el hecho “CanStartSendOrder” que indica que hay que iniciar la creación de las órdenes de resolución. Estas serán las órdenes que se envíen a los aviones en conflicto. Esta tarea también tiene la función de iniciar una aplicación interna de comprobación de distancias entre aviones en conflicto “CheckDistanceBetweenPlanesInConflict”. Esta aplicación tendrá por objeto determinar si el riesgo de posibilidad de conflicto entre los aviones ha desaparecido antes de que estos cumplan o completen la orden transmitida por el controlador. En tal caso se procederá como en el diagrama de la Figura 23 y se marcará la orden como finalizada.

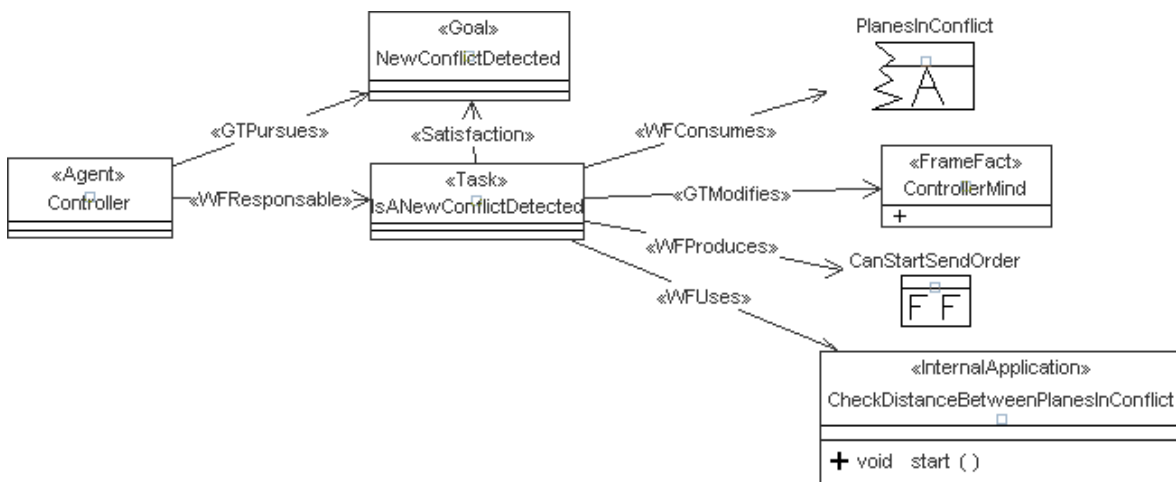


Figura 19: Comprobación de Nuevo Conflicto.

5.1.5.2. Generación y comunicación de órdenes

Una vez que el conflicto se ha detectado y confirmado, se procede a crear las órdenes que se transmitirán a los pilotos de los aviones en conflicto. Esta actividad se muestra en la Figura 20. La tarea “CreateNewOrders” encapsula en el hecho “StartAvoidCollision” la identificación del piloto al que va destinada la orden y un nuevo tramo que recoge las órdenes a realizar. Por tanto, se generará un hecho de este tipo por cada avión en conflicto. Este tramo, como se ha comentado anteriormente, será un tramo adicional ad hoc que los aviones deberán completar antes de seguir con el procedimiento normal del plan de vuelo. Las órdenes se han traducido a nuevos tramos para que los pilotos puedan así seguir, en cierto modo, la estructura de generación de decisiones e instrucciones que llevan a cabo para seguir el plan de vuelo.

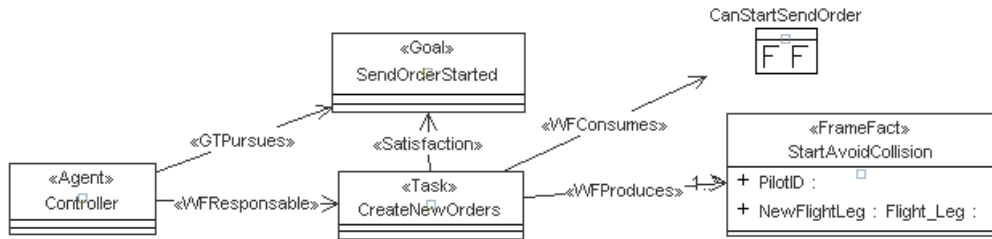


Figura 20: Creación de las Ordenes.

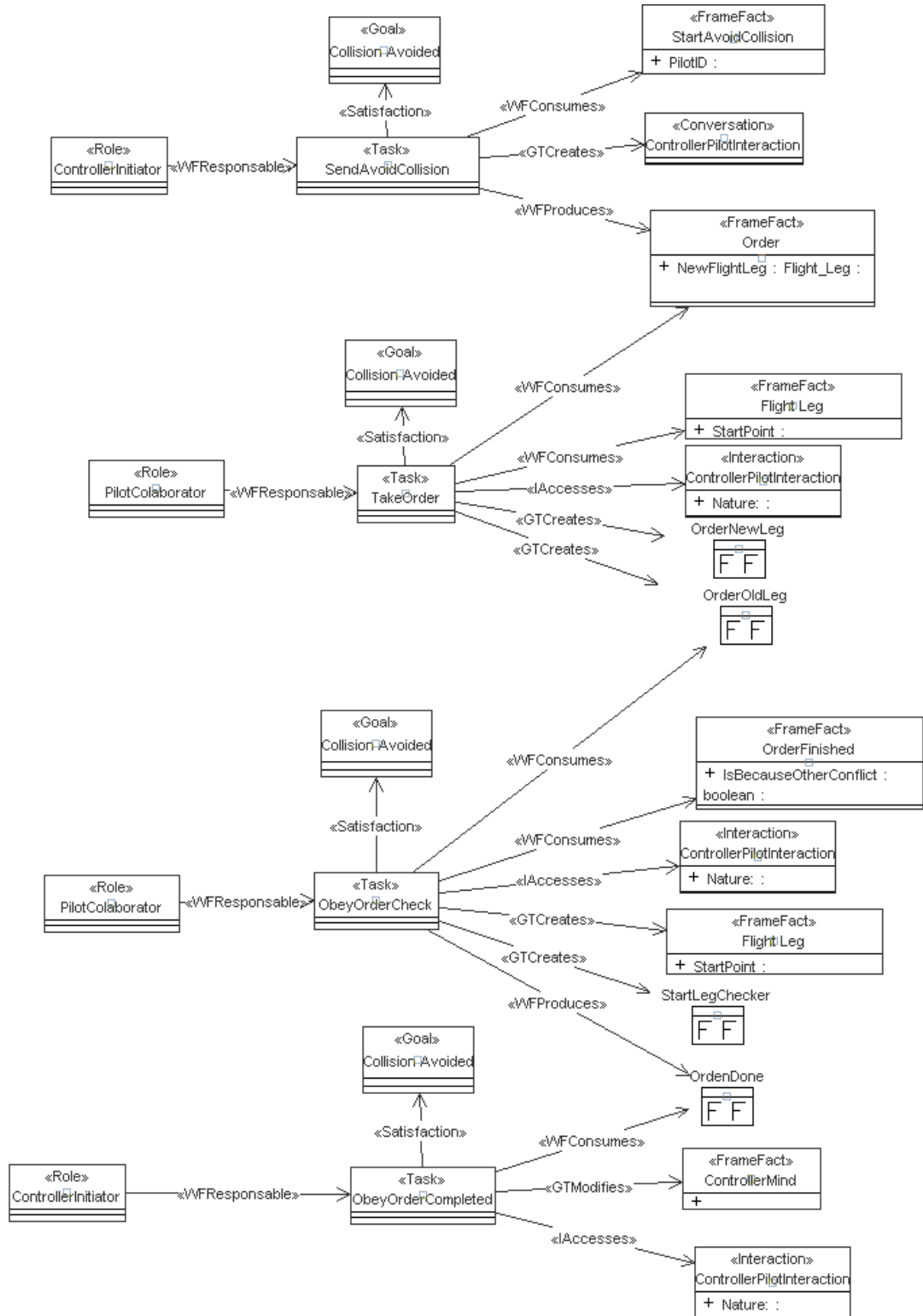


Figura 21: Interacción Controlador-Piloto traspaso de Ordenes.

Para generar las órdenes que resuelven el conflicto, los controladores recurren a cambios de altitud, velocidad y rumbo de las aeronaves. La heurística para generar estas órdenes es muy simple en este momento: generar cambios aleatorios de estos parámetros dentro de los valores permitidos por los tipos de aeronaves (ver Sección 4.1.2) y las normas de vuelo (ver Sección 4.1.4). Con estas modificaciones se trata de recuperar las distancias de seguridad y alejar la posibilidad de colisión.

Una vez generadas las órdenes, los controladores proceden a transmitir las a los pilotos como se muestra en la Figura 21. El controlador crea una nueva interacción cuyo colaborador es el piloto identificado dentro del hecho “StartAvoidCollision”. El controlador genera un hecho que contiene la orden para el piloto que fue producida en “CreateNewsOrders”. El piloto accede a ese hecho en la interacción con la tarea “TakeOrder”. De ese hecho el piloto extrae el tramo ordenado por el controlador y lo encapsula en el hecho “OrderNewLeg”. Este hecho es la base del tramo ad-hoc que ejecutará el piloto para resolver el conflicto.

5.1.5.3. Ejecución de órdenes

Cuando el piloto recibe la orden del controlador suspende la ejecución del tramo actual “Flight Leg”. Éste se preserva en el hecho “OrderOldLeg” para así poder retomarlo cuando se termine de completar la orden del controlador. Además, genera un nuevo tramo “OrderNewLeg” con la orden del controlador. Para ello, el piloto ejecuta la tarea “CreateNewLegForOrder” donde crea como tramo actual el que el controlador le mando en el hecho “OrderNewLeg” (ver Figura 22). Además, el piloto tendrá que iniciar también la aplicación que comprueba la finalización de los tramos mediante el hecho “StartLegChecker”. A partir de entonces, este nuevo tramo se procesa como cualquier otro tramo del plan de vuelo.

Aunque el nuevo tramo se ejecuta como otro cualquiera, las acciones a realizar cuando se termina no son las mismas: el piloto ha de notificárselo al controlador. A fin de comprobar que este tramo ad hoc ha terminado se emplea la tarea “ObeyOrderCheck”. Esta tarea se inicia cuando se considera que el cumplimiento de la orden ha finalizado, es decir, cuando el hecho “OrderFinished” ha sido generando. Su función es comunicar al controlador que las acciones que tenía que realizar el piloto para acatar la orden han finalizado (“OrderDone”). El cumplimiento de la orden se puede considerar completado por alguno de los siguientes tres motivos:

- *El conflicto ha desaparecido.* Es posible que el avión deje de estar en peligro antes de completar la maniobra que se le ha solicitado. Este caso se trata como el anterior, restableciendo el tramo que se estaba ejecutando antes del conflicto.
- *Se ha detectado un nuevo conflicto.* En este caso no se restablece el siguiente tramo “Flight Leg” puesto que éste habrá sido creado por el nuevo conflicto.

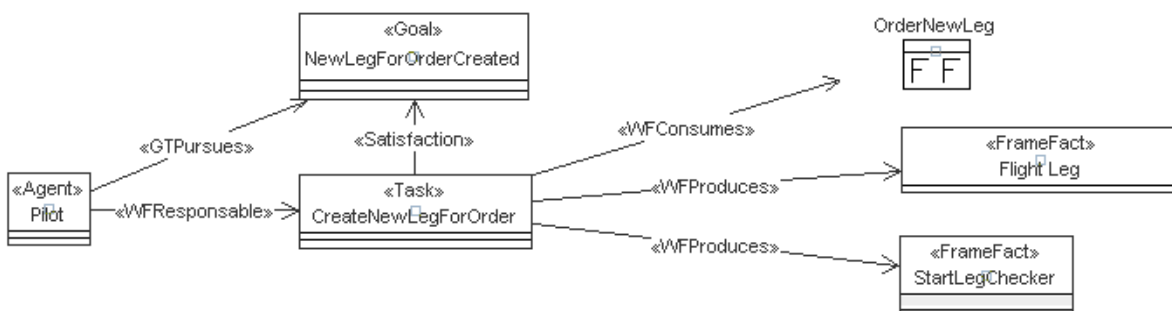


Figura 22: Piloto Obedeciendo una Orden.

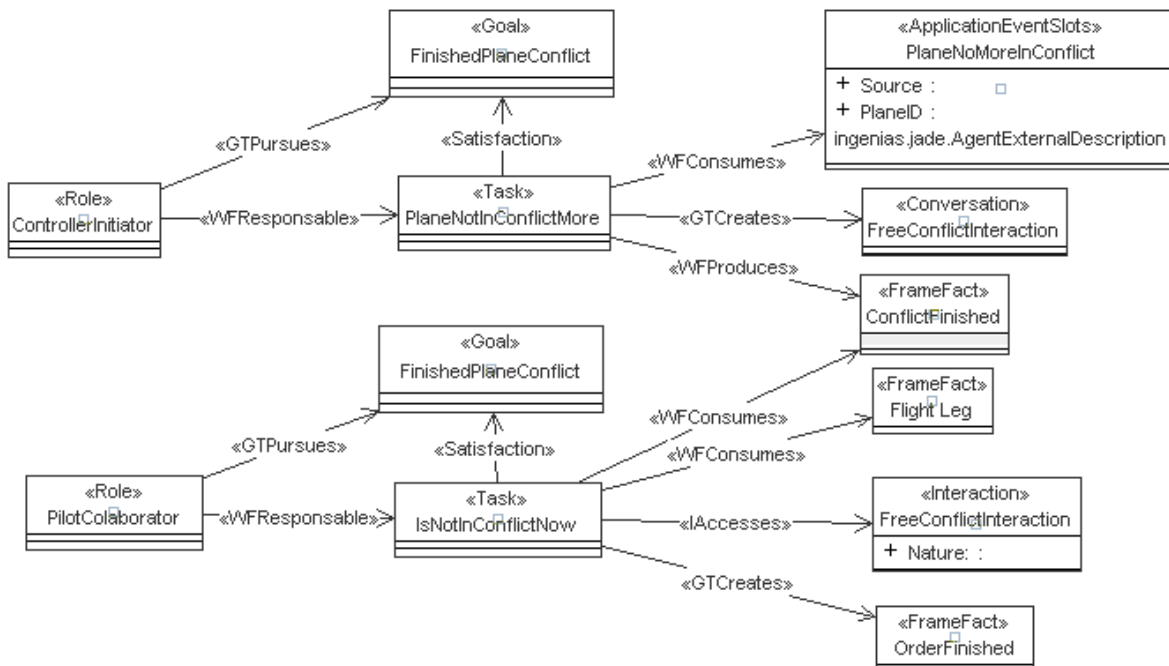


Figura 23: Conflicto Finalizado por Lejanía entre Aviones.

La detección de que un conflicto ha desaparecido antes de que se ejecuten las órdenes asociadas corresponde al flujo de trabajo en la Figura 23. Para detectar estos casos se inició la aplicación “CheckDistanceBetweenPlanesInConflict” de la Figura 18. Esta aplicación lanza un evento cuando detecta que para un determinado avión ya no hay riesgo. Este evento hace que el controlador inicie una nueva interacción con el piloto del avión para comunicarle el suceso con el hecho “ConflictFinished”. Al recibir esta comunicación el piloto crea un hecho interno “OrderFinished” que se interpreta como que esta situación equivale a haber finalizado la orden del controlador. También se consume (elimina) el tramo “Flight Leg” que corresponde a la orden mandada por el controlador. A partir de este momento se procederá como en la Figura 22, realizando todas las tareas para la confirmación de la finalización de las órdenes.

Como se comentó en la parte de la gestión del plan de vuelo, cuando la aeronave completa un tramo es posible que lo haga a la vez que su piloto está gestionando un conflicto con otro avión (Figura 17). En este caso se producía un hecho “GoNextLegWithConflict” en el cual se encuentra el tramo ad hoc que el controlador le ordenó hacer y que contiene las condiciones de vuelo durante el conflicto. La tarea de la Figura 24 nos muestra cómo se gestionará este caso tratando de evitar el conflicto al tiempo que se intenta seguir el plan de vuelo. Esta tarea es muy similar a la de “Flight Plan Monitoring” descrita en la Figura 11. El proceso es como sigue. Después de consumir el hecho “GoNextLegWithConflict”, el piloto accede a su estado mental para obtener el plan de vuelo y saber cuál habría sido su siguiente tramo a cubrir si no se hubiera detectado un riesgo de conflicto. Sin embargo, no puede usar este tramo directamente, porque el conflicto ha alterado su ruta. En su lugar lo que hace es generar un nuevo tramo ad hoc. Este tramo es una mezcla del tramo que debería ser el siguiente en condiciones normales, del que se obtienen el origen y el destino, y el tramo consumido dentro del hecho “GoNextLegWithConflict”, del que se obtienen la altura y velocidad usadas para evitar el conflicto. El tramo que debería ser el siguiente a cubrir según el plan de vuelo se almacena en el hecho “OrderOldLeg”. Si el conflicto desaparece se podrá retomar este tramo con todas sus condiciones. Por último, el piloto producirá un hecho “StartLegCheck” que inicia el proceso que alertará cuando el tramo se haya completado con éxito.

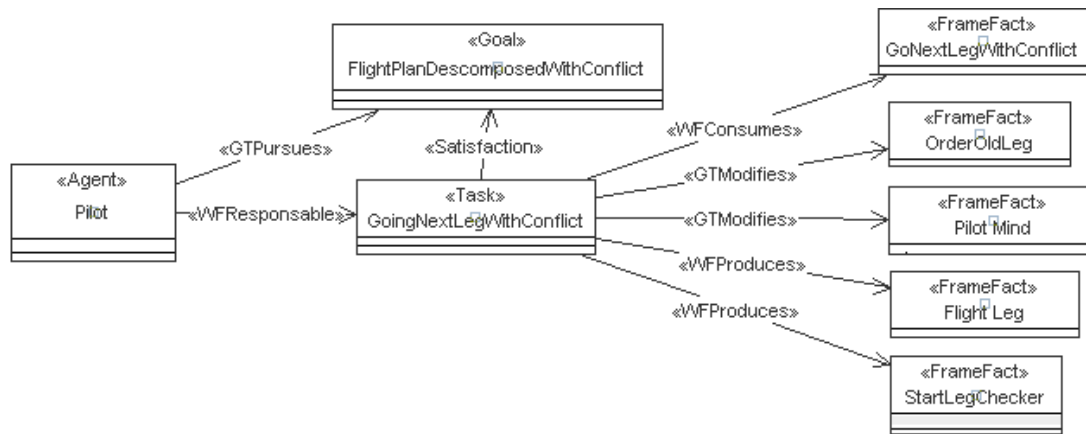


Figura 24: Ir al Siguiente Tramo Con Conflicto.

Cuando se termina la ejecución de las órdenes del controlador, independientemente de la causa, el controlador ejecuta la última tarea de la interacción, “ObeyOrderCompleted”. Ésta elimina el conflicto del listado de conflictos actuales que gestiona dentro de su estado mental.

5.2. Simulación

A partir de las especificaciones de tráfico aéreo de la Sección 5.1, este trabajo ha generado parcialmente la simulación final. Como se indicó en la Sección 4.2, esta aproximación MDE se basa en el uso de la metodología INGENIAS y su herramienta el IDK. El resultado es una simulación desarrollada según un patrón de capas, con una capa de lógica determinada por las especificaciones anteriores (ver Sección 5.2.1), una de visualización (ver Sección 5.2.2) y una capa de control que hace de intermediario entre las dos anteriores (ver Sección 5.2.3).

5.2.1. Módulo de lógica

Es la capa formada por todas las clases generadas a partir del modelo desarrollado en el IDK (ver Sección 5.1). Incluye por tanto una serie de clases que corresponden al soporte genérico del IDK para las primitivas de INGENIAS, tales como objetivos, agentes y tareas, y las clases que corresponden estrictamente a las especificaciones anteriores, que serán normalmente subclases de las genéricas. El módulo de generación de código del IDK no está ligado a una plataforma objetivo concreta, sino que emplea plantillas específicas para cada plataforma objetivo. La distribución estándar del IDK incluye el IAF (*INGENIAS Agent Framework*), que es una plataforma de simulación de la lógica y comunicaciones de los agentes INGENIAS construida sobre Jade [70]. Este trabajo ha empleado dicha plataforma como soporte para su capa de lógica. Por tanto, la capa de lógica presentada incluye las clases genéricas para el IAF y las específicas generadas para la especificación como extensiones de las del IAF.

Es preciso señalar que dentro del código específico para la especificación conviven varios tipos de código. En primer lugar hay código generado directamente a partir de los elementos gráficos de los modelos. Por ejemplo, el IDK genera clases para pilotos y controladores como extensión de la clase “Agent” del IAF. En segundo lugar, hay código incrustado desde las especificaciones. El lenguaje gráfico tiene que buscar un compromiso entre capacidad de abstracción y poder expresivo. Para expresar aquella información que no se puede especificar con primitivas gráficas, el lenguaje de INGENIAS recurre a extractos de código (ver Sección 4.2). Las especificaciones gráficas incluyen la primitiva “Code component”, que contiene extractos de código y se asocia a otros elementos gráficos. Durante la generación de código, el contenido de los “Code component” es incrustado en el código de los elementos gráficos asociados en las especificaciones. Este es por ejemplo el caso de las tareas, cuyos algoritmos se especifican con código. Finalmente, es posible

crear manualmente código que se enlazará con el código generado. Este ha sido por ejemplo el caso de elementos de temporización.

Las aplicaciones, tanto internas como externas, son otro ejemplo de código perteneciente a la capa de lógica. Hay que destacar que algunos de estos procesos, que inician los agentes y son procesos iterativos muy largos, son ejecutados en nuevos hilos del sistema para no interferir en la capacidad de los agentes para intentar satisfacer simultáneamente múltiples objetivos.

5.2.2. Visualización

La visualización de la simulación persigue obtener una representación realista del modelo subyacente y su comportamiento dinámico, que sea útil y familiar para los expertos del dominio. Además, en la fase de desarrollo resulta una herramienta clave para validar y depurar la simulación, tanto desde el punto de vista de los expertos, centrados en los modelos, como de los desarrolladores, centrados en el código. Este trabajo cuenta con dos posibles tipos de visualización: una centrada en la lógica de los agentes y otra en el tráfico aéreo.

La visualización centrada en los agentes es la proporcionada por el IAF. En este tipo de visualización se puede ver para los distintos agentes sus estados mentales (ver Figura 25), así como las interacciones (ver Figura 26) y las tareas que van ejecutando en cada momento. Esta visualización también aporta una serie de logs que recogen información sobre las interacciones y tareas ejecutadas (ver Figura 27).

Por otro lado se ha implementado una visualización gráfica centrada en el tráfico aéreo. Se basa en la herramienta *World Wind* de la NASA [71] para mostrar un mapa del terreno sobre el cual vuelan los aviones.

World Wind es un programa de código abierto que proporciona un globo terráqueo virtual. Superpone imágenes de satélites de la NASA y fotografías aéreas del Estudio Geológico de los EEUU (USGS, *United States Geological Survey*) sobre modelos tridimensionales de la Tierra, y en las últimas versiones también de Marte y la Luna. La aplicación permite superponer información adicional, como topónimos y fronteras, y visualizar imágenes de otras fuentes usando el protocolo WMS (*Open Geospatial Consortium's Web Map Service*). Existen módulos y aplicaciones adicionales para, por ejemplo, medir distancias u obtener datos de posición desde un GPS.

Para poder visualizar las distintas clases de la capa de la lógica con *World Wind*, se han creado una serie de clases que adaptan las entidades del sistema (ej. aviones, rutas y aeropuertos) a clases de la herramienta *World Wind*. Estas clases adaptadoras pueden ser mostradas gráficamente en los distintos mapas.

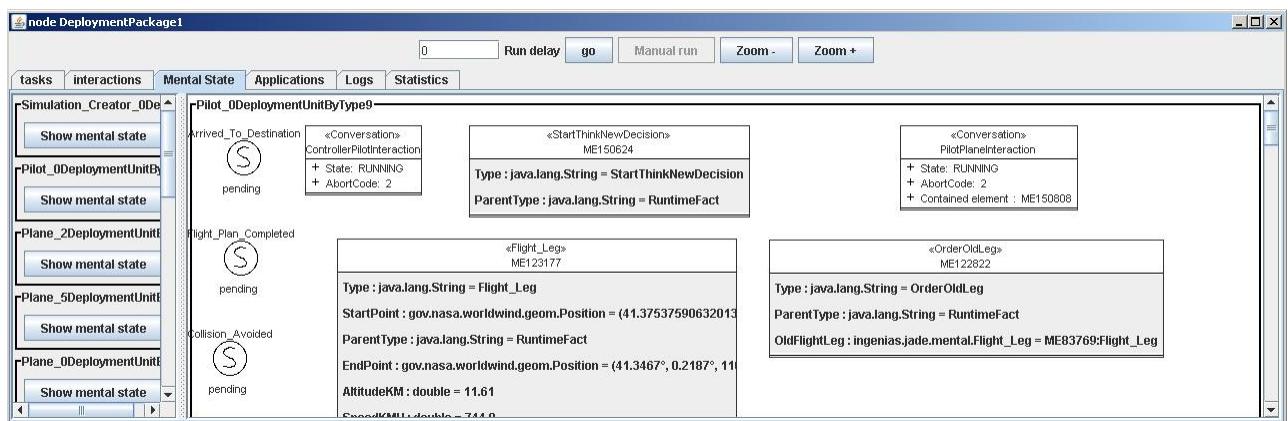


Figura 25: IAF Estado Mental.

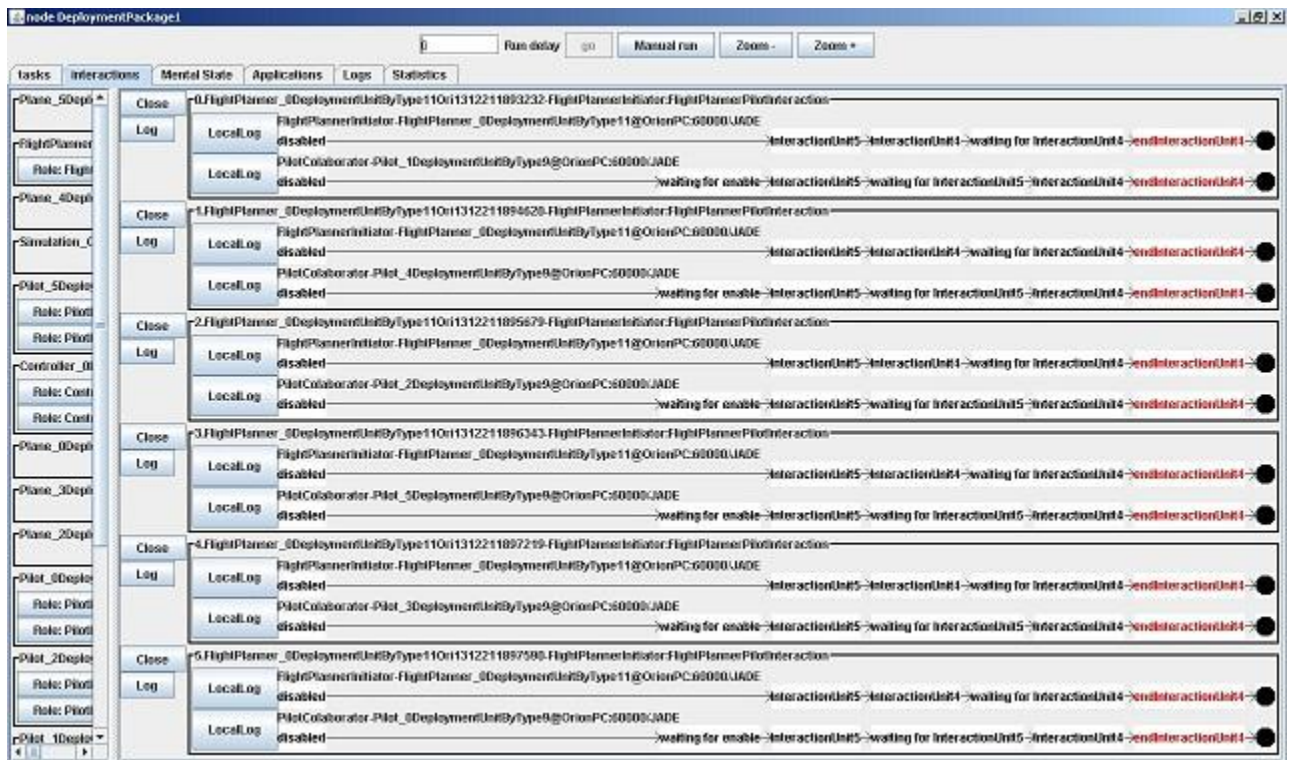


Figura 26: IAF Interacciones.

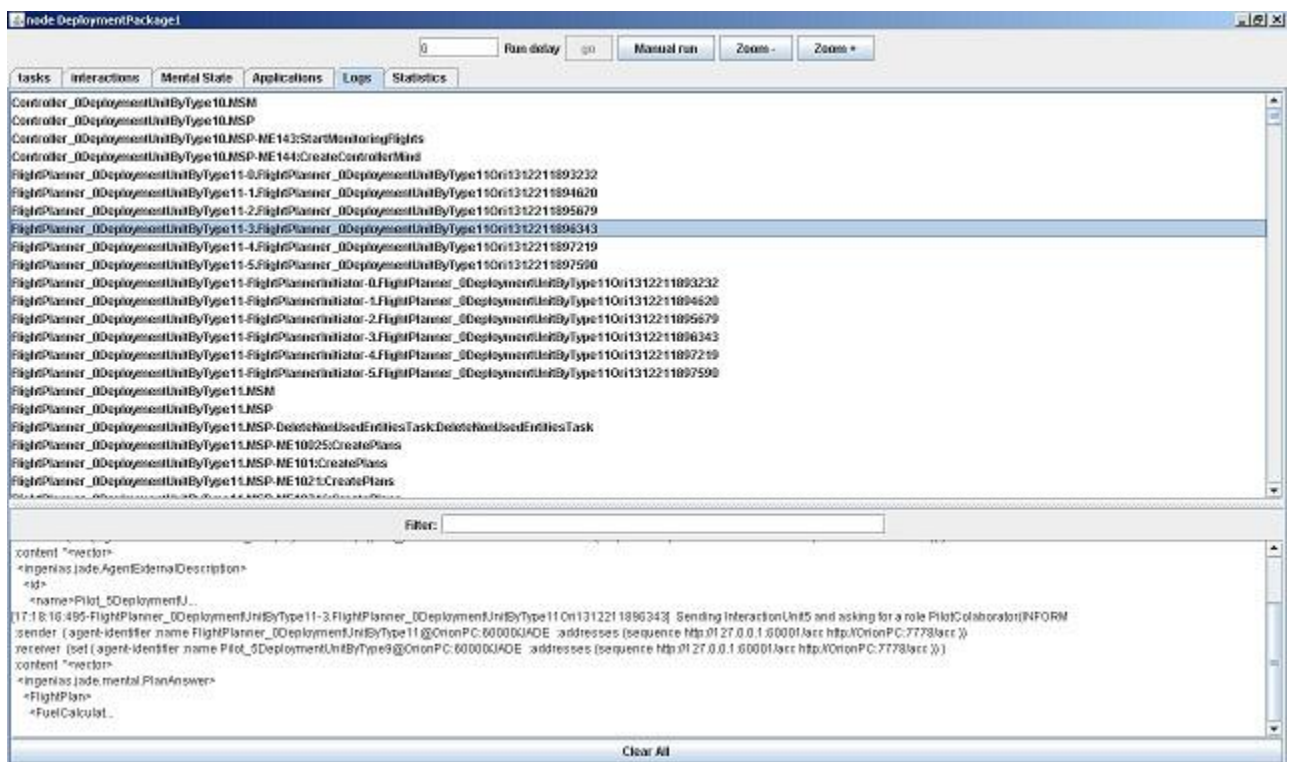


Figura 27: IAF Logs.

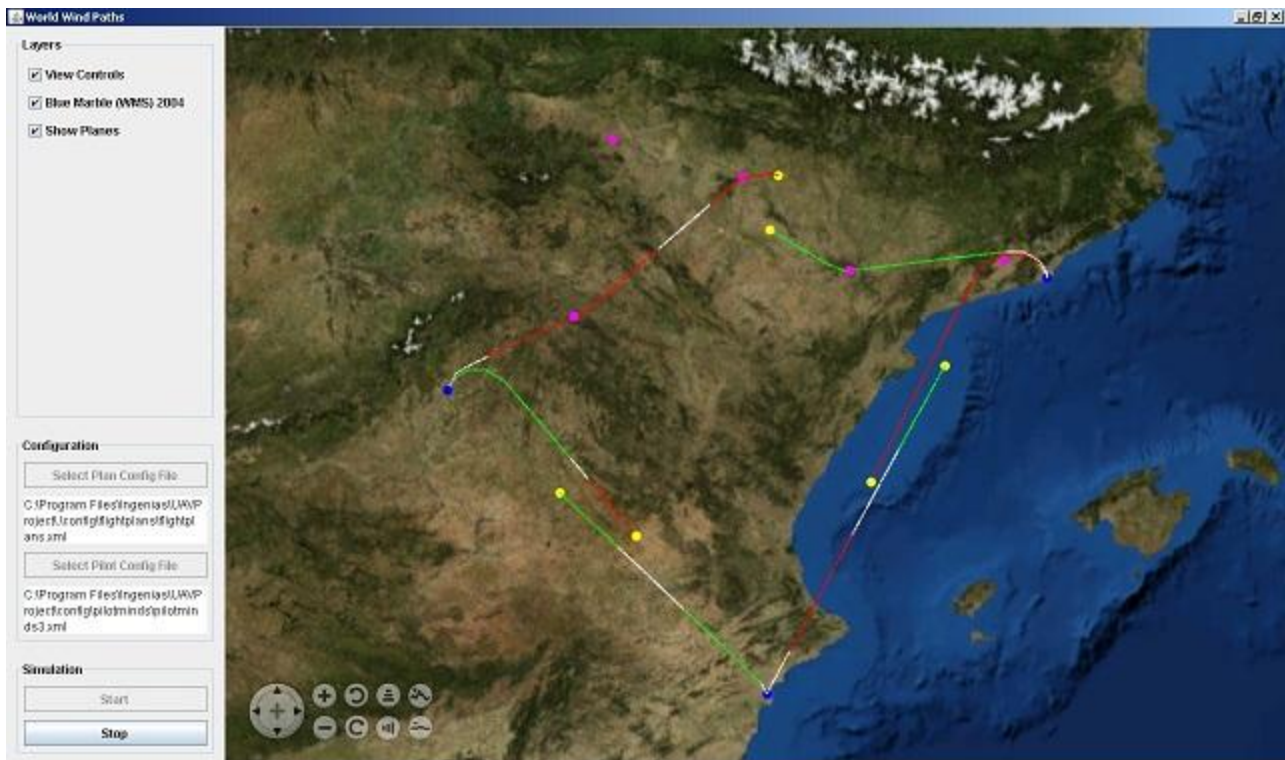


Figura 28. Aplicación de visualización.

La aplicación de visualización resultante desarrollada para este trabajo se puede ver en la Figura 28. Incluye una ventana que contiene en la parte de la izquierda una serie de paneles para configurar las diferentes opciones de la simulación y controlarla, y en la derecha un mapa que visualiza la simulación.

La visualización se organiza en una serie de capas con distinta información. El panel superior izquierdo permite seleccionar cuáles de estas capas se quieren visualizar:

- *View Controls*. Esta capa corresponde a los controles de navegación mostrados dentro del mapa en la esquina inferior izquierda. Dichos controles permiten, entre otras acciones, hacer zoom, rotar el mapa y moverse por él. Algunas de estas acciones también se pueden llevar a cabo directamente con el ratón sobre el mapa.
- *Blue Marble*. Es la capa con el mapa sobre el que se hace la simulación.
- *Show Planes*. Muestra todos los elementos que son objeto de esta simulación. Incluye los aeropuertos, puntos de paso, aviones y rutas.

El segundo panel de la izquierda permite seleccionar los ficheros XML usados para configurar los planes de vuelo que se van a llevar a cabo. Como se comentó en los requisitos (ver Sección 4.1.1), parte de los datos de la simulación son determinados directamente por el usuario a través de ficheros. Por un lado, se suministra información sobre los planes de vuelo, incluyendo los aeropuertos de origen y de destino, los puntos de paso por los que se ha de pasar, e información relativa a cuándo tiene que partir el vuelo (indicada como minutos desde que se inició la simulación). Por otro lado, para cada uno de los pilotos disponibles se especifican, en otro fichero XML, sus valores de estrés, fatiga y experiencia como un valor real entre 0 y 1. Una vez iniciada la simulación no será posible alterar estos datos de configuración.

El tercer panel de la izquierda contiene botones para arrancar y parar la simulación. Estas acciones se pueden realizar cuantas veces se desee en una simulación.

En cuanto al panel de la derecha, usa *World Wind* para mostrar el desarrollo de la simulación. En

la Figura 28 se muestra un mapa con los aeropuertos y puntos de paso, así como los aviones y la ruta que van recorriendo. Los aeropuertos se marcan con puntos de color azul y los puntos de paso en color magenta. Los aviones se pueden mostrar en color verde, amarillo o rojo según su situación. Los aviones se muestran de color verde cuando no están en situación de conflicto y en amarillo si lo están. El color rojo de las aeronaves se reserva para cuando estas entran en alto riesgo de colisión. En cuanto a las rutas, su color inicial será blanco, lo que indicará que el avión correspondiente está volando a la altura establecida como altura estándar de crucero para esa aeronave. Cuando el avión empiece a volar por encima de esta altura de crucero el color de la ruta pasará a ser rojo, mientras que cuando vuele por debajo esta altura será verde.

5.2.3. Controlador

Esta capa se encarga de sincronizar el estado de la capa lógica y el representado por la visualización. Esta tarea se subdivide en varias partes. El controlador accede a la capa de visualización para solicitar que muestre los mapas correspondientes. Ésta es la visualización básica que se muestra incluso cuando no se está simulando. También gestiona que al configurar una simulación y mientras que dure ésta se muestren los aeropuertos y puntos de paso por los que los aviones pasarán. Finalmente, muestra la evolución de los vuelos, incluyendo los aviones y las rutas que siguen.

El diseño de esta capa se basa en agentes. Las facilidades del IAF permiten arrancar los agentes de la capa lógica y un agente “Simulation Creator”. Este agente arranca el entorno para mostrar la simulación. Este entorno está implementado como una aplicación de INGENIAS para que lo pueda manipular el agente. A través de la aplicación se cargan las distintas capas y paneles, donde estarán incluidos los mapas, los puntos sobre los mapas, y los controles que permiten personalizar la visualización. Para no penalizar la ejecución del agente, esta aplicación corre dentro de su propio hilo de ejecución. Tras iniciar estos elementos, el controlador se ocupa de coordinar las capas de la simulación. Para ello cuenta con una lista de los elementos gráficos que visualizan cada una de las entidades lógicas (ej. aviones y rutas). Siempre que en el modelo se actualiza el estado de alguno de estas entidades, el controlador transmite el cambio a los elementos de visualización correspondientes.

6. Casos de estudio

En esta sección se muestran una serie de casos de estudio sobre el sistema descrito en la Sección 5 con el objeto de validarlo. Para ello se analiza cómo se comporta este sistema respecto a distintas situaciones que pueden aparecer en el tráfico aéreo y si lo hace acorde a la realidad. Los casos de uso se han dividido en un caso básico con dos aviones y otro más complejo donde se muestra la interacción de un conjunto de aviones. Ambos casos se estudian con distintas características de comportamiento de los pilotos. En estos casos vamos a acelerar la simulación en un factor de 10, un factor que es totalmente configurable. Este factor multiplica la velocidad de la simulación, lo que permite reducir el tiempo para observar ciertas situaciones. Esto se ha hecho para que las simulaciones no tarden tanto como en tiempo real, donde el vuelo entre Barajas y el Prat usado en los ejemplos tardaría una hora aproximadamente. Es importante notar este hecho porque desde el punto de vista de la visualización, las distancias a las que se produce el conflicto parecen mayores de las que serían en realidad en el siguiente instante de simulación. Los resultados concretos a comprobar en estos casos de estudio son la aparición de posibles conflictos (situaciones con riesgo de accidente) y colisiones, y la gestión de los conflictos.

6.1. Caso básico: dos aviones

En primer lugar se evalúa el caso de estudio más básico. En él se observa el comportamiento de dos aeronaves que se cruzan en un punto mientras vuelan en sentidos contrarios. Dicho caso servirá para tener un ejemplo básico del comportamiento del sistema ante los conflictos. Para ello diseñaremos un despliegue para el IDK (ver Figura 29) que recoge los agentes que participarán en la simulación. La simulación incluye dos pilotos, dos aviones, un planificador de vuelos (que suministra los planes de vuelo a los pilotos), un controlador aéreo que gestiona los posibles conflictos, y un creador de la simulación que se encarga de iniciar la aplicación que muestra la simulación. Para esta configuración básica se consideran dos variantes, rutas sin y con puntos de paso, que se explican en las siguientes secciones.

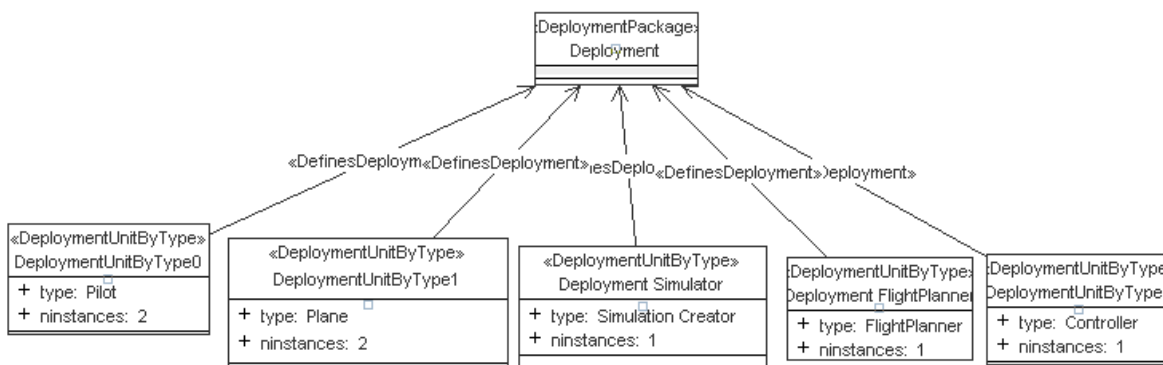


Figura 29: Despliegue dos aviones.

6.1.1. Dos aviones sin puntos de paso

El caso más sencillo se corresponde con aquel en el que los planes de vuelo no tienen especificado ningún punto de paso que tengan que atravesar los aviones durante el trayecto. Para las dos aeronaves, se asigna como aeropuerto de destino el origen de la otra aeronave y la misma hora de despegue. El resultado de esta configuración inicial es que, aproximadamente hacia la mitad de la trayectoria de las aeronaves, el controlador detectará un conflicto entre ellas. Entonces el controlador mandará operaciones de cambio de altura y velocidad a ambas aeronaves. Esto es fácil de observar porque las aeronaves pasan a tener un color amarillo y sus rutas toman el color verde o

rojo dependiendo de si la variación de su altura supone un descenso o aumento con respecto a la altura de crucero. Una vez pasado el riesgo de conflicto, y acorde al diseño del sistema, los aviones volverán a sus respectivas alturas y velocidades de crucero (ver Figura 30).

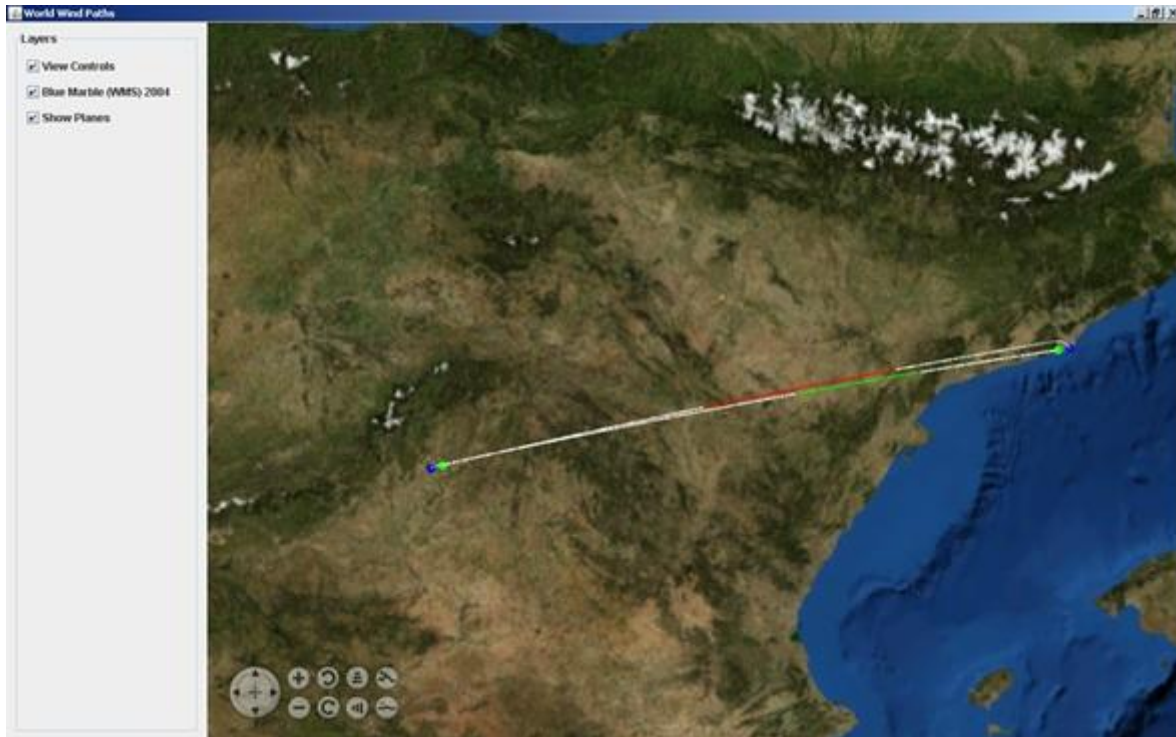


Figura 30: Resolución de conflicto entre dos aviones volando rutas sin puntos de paso especificados.

Para analizar con más profundidad esta situación, se ha ejecutado este caso de estudio con distintos comportamientos de los pilotos. Estos comportamientos están caracterizados por los valores en los atributos (estrés, fatiga y experiencia) del estado de estos agentes. En relación con estos experimentos se observa que los pilotos con gran estrés y fatiga, y con muy poca experiencia u horas de vuelo tardan bastante en reaccionar ante situaciones críticas con lo que el riesgo de colisión entre aviones se incrementa. Ejemplos de esta situación corresponden a las imágenes que se explican a continuación.

La Figura 31 corresponde al caso de pilotos que tienen valores de estrés, fatiga y experiencia del 98%, 98% y 2% respectivamente. En estas condiciones los tiempos de respuesta de los pilotos son elevados. De acuerdo con las especificaciones, cuando el controlador detecta que ambas aeronaves están en radio de conflicto, debe mandar una orden de cambio de altitud/velocidad a sus pilotos. Aunque esta orden se manda a los pilotos inmediatamente, su alto nivel de estrés y fatiga y su baja experiencia en lidiar con situaciones de este tipo retrasa su ejecución. Ello hace que las aeronaves terminen entrando en una zona de alto riesgo de colisión antes de que los pilotos acaten las ordenes (ver Figura 32). Cuando los pilotos ejecutan las órdenes, el peligro se disipa (ver Figura 33). Una vez pasado todo el peligro, los controladores ordenan a los pilotos que vuelvan a sus respectivas alturas/velocidades de crucero (ver Figura 34). A continuación se comentan con mayor detalle algunas de estas acciones.

El tiempo que tardan las aeronaves en ponerse rumbo al destino después del despegue está determinado por los valores de los parámetros de estrés, fatiga y experiencia que tengan los pilotos. Este tiempo se consume con la tarea “ThinkNewDecision” (ver la Figura 12 de la especificación general en la Sección 5.1).

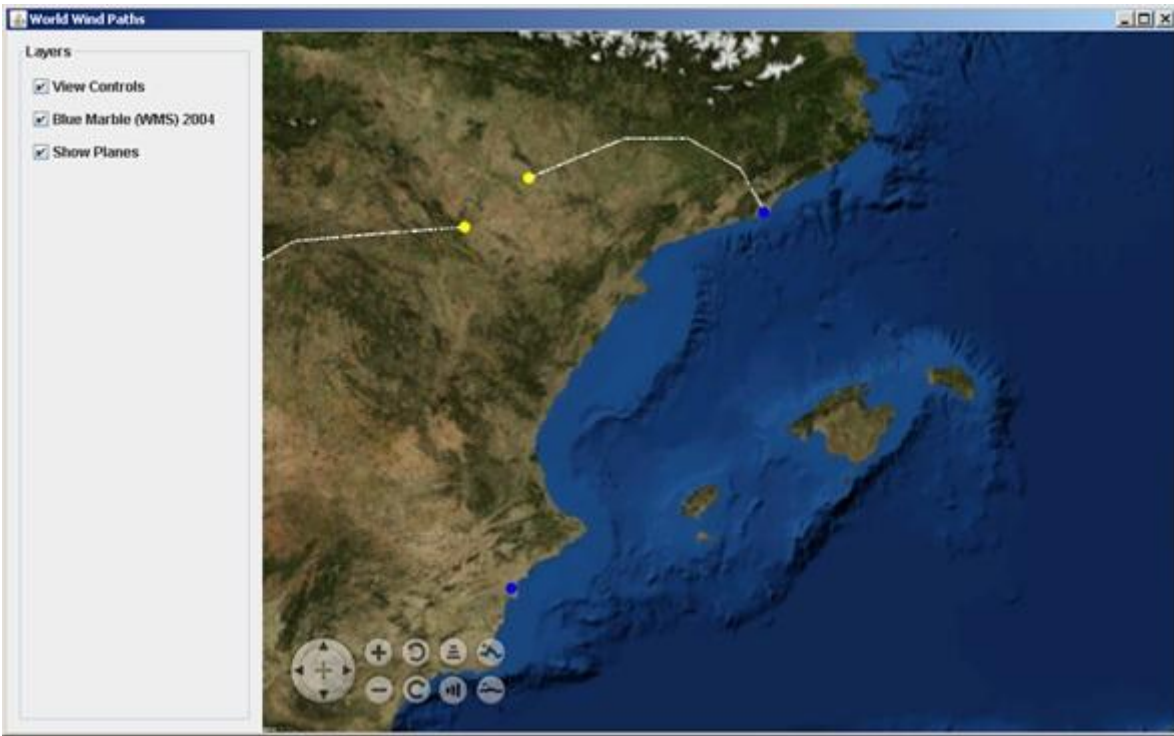


Figura 31: Conflicto entre dos aviones volando rutas sin puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con altos valores de estrés y fatiga, y poca experiencia.

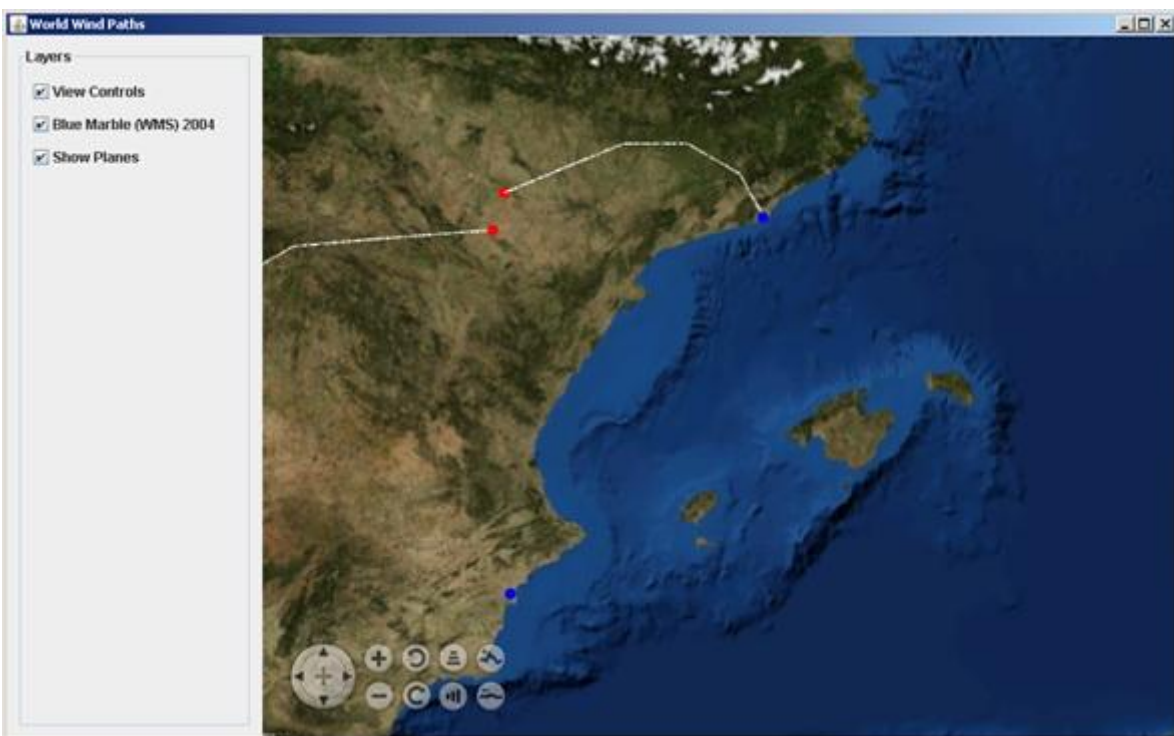


Figura 32: Alto riesgo de conflicto entre dos aviones volando rutas sin puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con altos valores de estrés y fatiga, y poca experiencia.

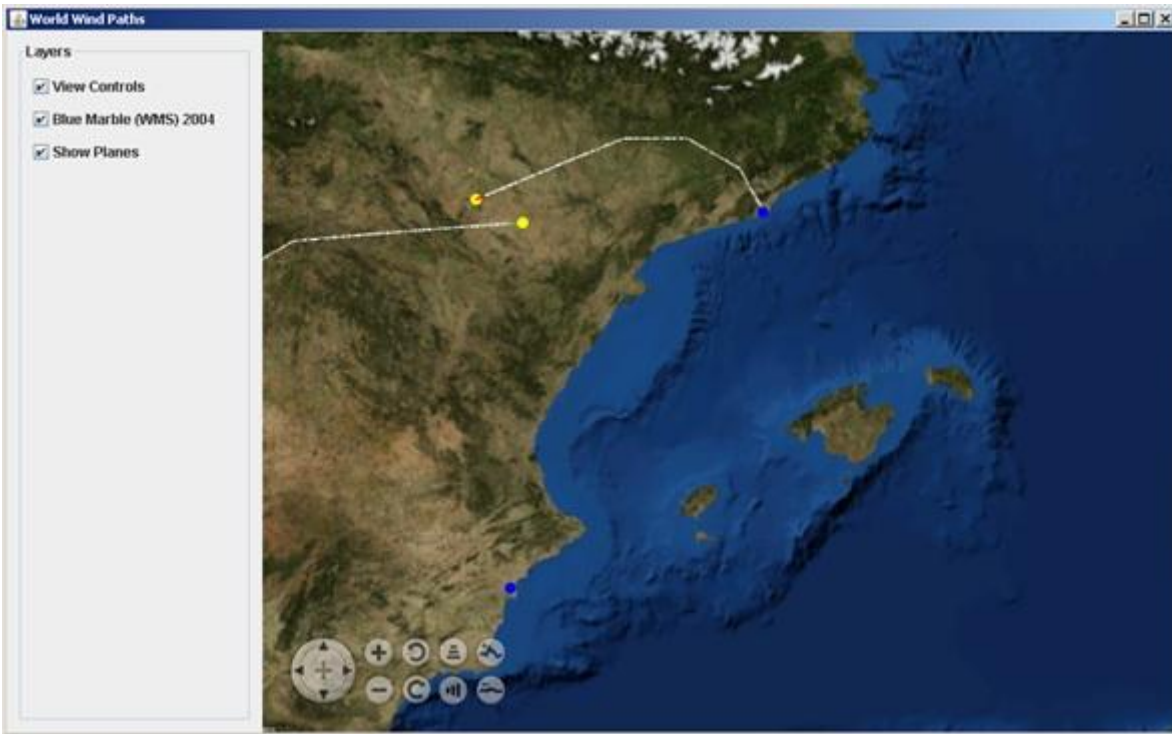


Figura 33: Dos aviones volando rutas sin puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con altos valores de estrés y fatiga, y poca experiencia, cambiando el tramo actual.

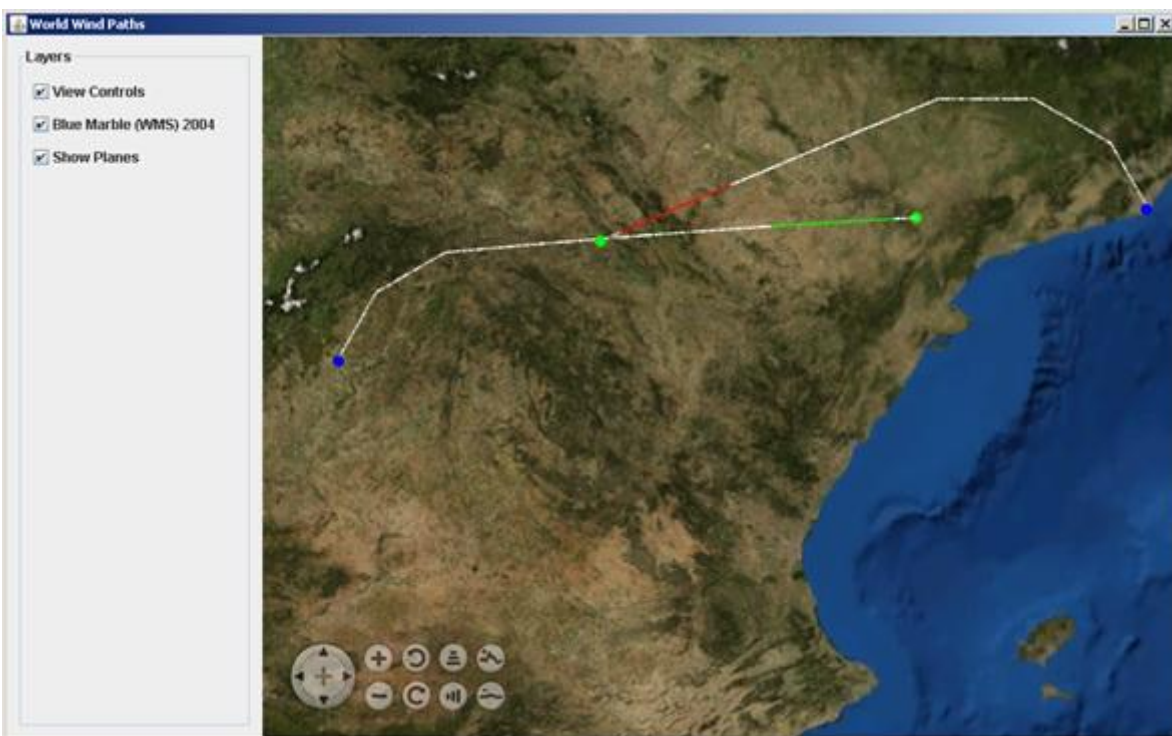


Figura 34: Dos aviones volando rutas sin puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con altos valores de estrés y fatiga, y poca experiencia, finalizando conflicto.

La Figura 31 muestra cuando los aviones entran en el radio de posible conflicto, momento en el que se colorean en amarillo. Esta situación da origen a la ejecución de la tarea “IsANewConflictDetected” donde se detecta un conflicto que no había sido tratado antes (ver la Figura 19 de la especificación). La ejecución de esta tarea da lugar a su vez a que se inicien toda una serie de acciones y tareas para la gestión del correspondiente conflicto (como se explicó en la especificación de la Sección 5.1.5).

Como ya se comentó, el alto tiempo de respuesta de los pilotos demora la ejecución de las órdenes de los controladores, por lo que los aviones continúan con su ruta anterior entrando en una zona de alto riesgo de colisión. La Figura 32 muestra este momento coloreando en rojo los aviones. Seguidamente, la Figura 33 muestra como la orden, que inicio una interacción entre controlador y piloto (ver Figura 21 de las especificaciones) y que hizo que el piloto creara un nuevo tramo ad hoc (ver Figura 22), ha empezado a ser procesada por el piloto que toma algunas decisiones relacionadas con ella. En la imagen puede verse que estas decisiones llevan al avión más al oeste a aumentar su altitud (ruta en rojo), mientras que el situado más al este disminuye su altitud (ruta en verde). Fruto de estas maniobras, el riesgo de colisión disminuye. Esta información se muestra coloreando las aeronaves en amarillo de nuevo.

La Figura 34 recoge el momento en el que la probabilidad de riesgo desaparece por completo. Las acciones a realizar aquí corresponden a la Figura 23 de las especificaciones. Al igual que ocurrió para resolver el conflicto, las condiciones de los pilotos hacen que estos tarden un cierto tiempo en realizar las maniobras para restablecer las condiciones de vuelo que llevaban antes del conflicto. Por ello, no es hasta que los aviones están muy lejos de la zona en que se produjo el conflicto que vuelven a sus alturas y velocidades de crucero.

El siguiente grupo de imágenes (Figura 35 y Figura 36) recoge los resultados en la situación anterior de vuelo (2 aviones cuyas trayectorias son inversas) con pilotos cuyos valores de estrés, fatiga y experiencia de vuelo son medios (valores de estrés, fatiga y experiencia iguales a 50%, 50% y 25% respectivamente). Lo primero que se observa en la simulación es que a los pilotos les lleva menos tiempo ponerse a rumbo del destino. También se puede ver como poco después de detectado el conflicto (ver Figura 35), los pilotos ejecutan las órdenes de los controladores y ponen a volar a sus aeronaves a la altura y velocidad indicadas. Finalmente, en la Figura 36 se ve que llos pilotos emplean menos tiempo que en el caso anterior en restablecer los valores de crucero de sus aeronaves una vez que reciben la orden del controlador de volver a su plan original.

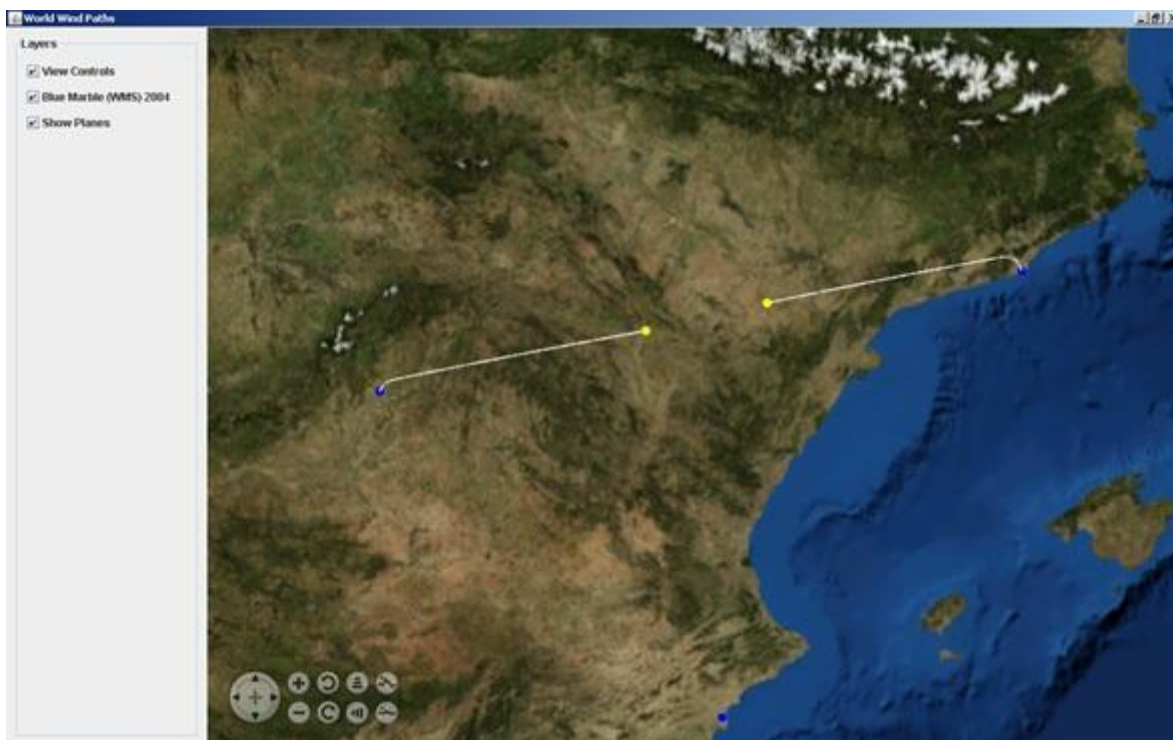


Figura 35: Conflicto entre dos aviones volando rutas sin puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con valores medios de estrés, fatiga y experiencia.

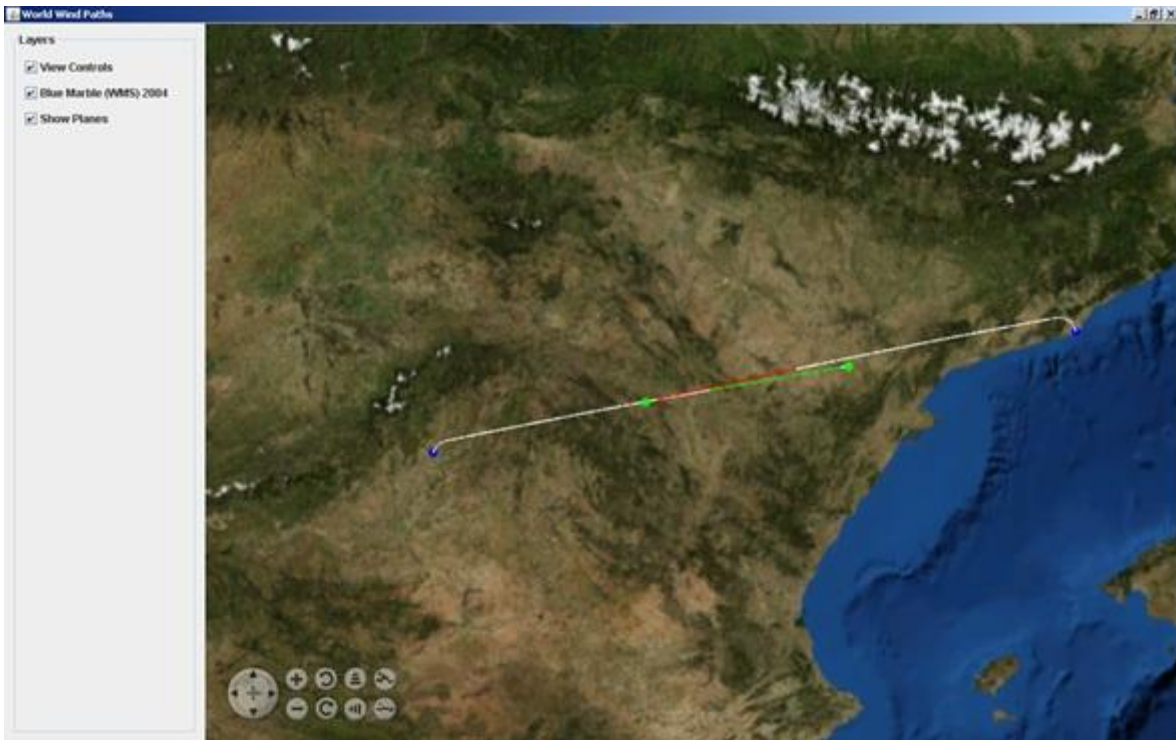


Figura 36: Dos aviones volando rutas sin puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con valores medios de estrés, fatiga y experiencia, finalizando conflicto.

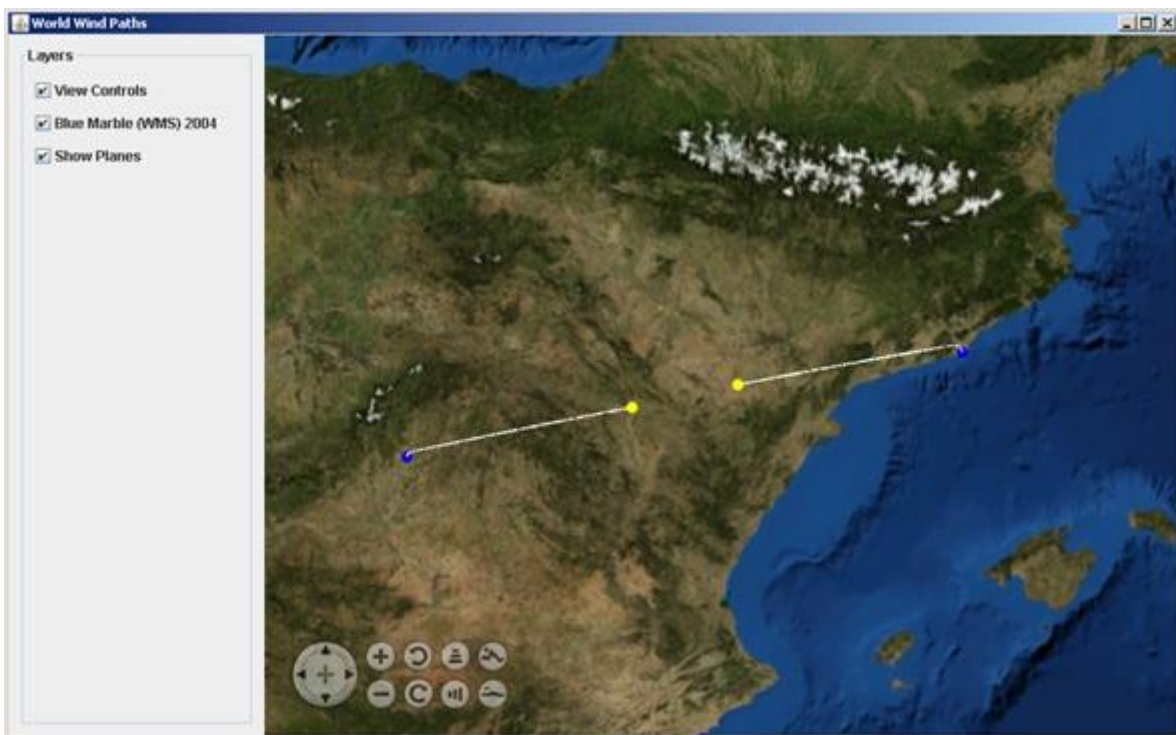


Figura 37: Conflicto entre dos aviones volando rutas sin puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con valores bajos de estrés, fatiga y bastante experiencia.

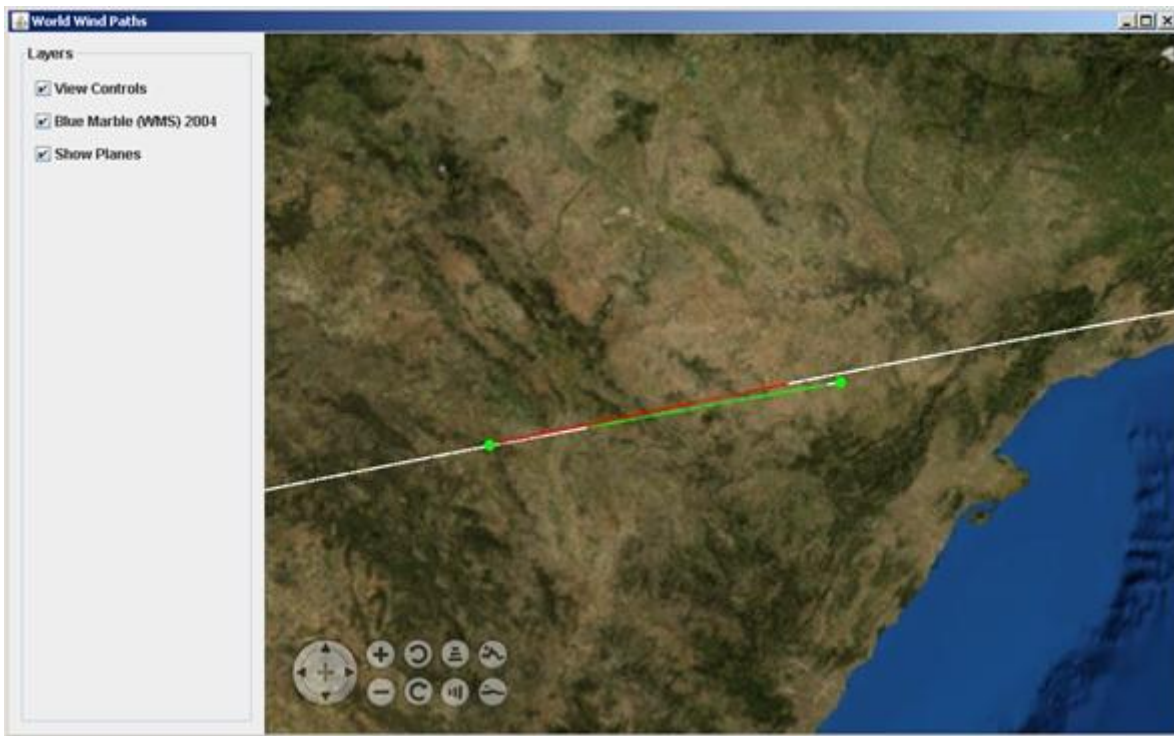


Figura 38: Dos aviones volando rutas sin puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con valores bajos de estrés, fatiga y bastante experiencia, finalizando conflicto.

El último experimento de esta sección corresponde a pilotos con valores bajos de estrés y fatiga (2% y 2%) y alto grado de experiencia (98%). Se puede observar que a los pilotos apenas les lleva tiempo ponerse a rumbo del destino (ver Figura 37), ya que parece que prácticamente despegan orientados hacia su destino. Por otro lado, si se comparan la Figura 37 y la Figura 38, se puede ver que poco después de la detección del conflicto, los pilotos acatan las ordenes y ponen las aeronaves a volar con los nuevos parámetros, siendo nulo el riesgo grave de colisión.

6.1.2. Dos aviones con puntos de paso

Dentro del caso básico con dos aviones, también se considera la situación en la que la ruta está limitada por la especificación de una serie de puntos de paso intermedios. El resto de las condiciones de los experimentos son similares a las usadas en la Sección 6.1.1. Se trata de dos aeronaves que salen de aeropuertos opuestos y tendrán que pasar por una serie de puntos de paso dispuestos de tal manera que ambos aviones se crucen relativamente cerca en algún punto. El igual que en el caso anterior se va a realizar un estudio dependiendo de los valores de comportamiento de los pilotos. Estos experimentos permitirán analizar como los pilotos gestionan el paso por los puntos intermedios en las distintas situaciones.

El caso en que los pilotos tienen gran estrés y fatiga y poca experiencia corresponde a unos valores de estos parámetros de 98%, 98% y 5% respectivamente. Este experimento muestra un hecho interesante: los pilotos tardan tanto en gestionar las órdenes de conflicto que, en ciertas ocasiones, dichas gestiones se solapa con las del paso de los puntos intermedios. Por ejemplo, si se observan la Figura 39 y la Figura 40 puede verse que el avión *Plane2* deja de estar en posible riesgo de conflicto, es decir, recibe la orden de volver a su altitud y velocidad de crucero, antes de llegar a su segundo punto de paso. Sin embargo, el piloto no es capaz de procesar esta orden hasta que ha pasado un tiempo, determinado en la tarea "ThinkNewDecision" (ver Sección 5.1.4.3). Esto hace que el avión llegue a sobrepasar su próximo punto de paso sin haber cambiado aún de altitud.

La Figura 39 refleja el momento exacto en el que los aviones dejan de estar en conflicto y por lo

tanto reciben las órdenes del controlador de volver a sus valores de vuelo de crucero. El avión *Plane1* entró en riesgo antes de rebasar su segundo punto de paso y sale de este riesgo después de haberlo rebasado. En este caso el comportamiento que tiene el piloto es un claro ejemplo de lo descrito en la Figura 24, donde éste tiene que gestionar el paso al siguiente tramo a la vez que su avión se encuentra en situación de riesgo de conflicto. Otro hecho interesante puede observarse en la Figura 40. El piloto de la aeronave *Plane2* recibió la orden de volver a los parámetros de vuelo de crucero antes de que el avión rebasara su segundo punto de paso. Sin embargo, debido a las características de este piloto, no es hasta que sobrepasa este segundo punto de paso cuando el piloto acata esta orden. Es decir, el piloto de la aeronave *Plane2* acaba gestionando el paso del su segundo punto de paso de la misma manera que lo hizo el otro piloto, eso es, ejecutando la tarea “GoingNextLegWithConflict” y realizando las acciones que se describen en la Figura 24 de la Sección 5.1.5.3.



Figura 39: Dos aviones volando rutas con puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con valores altos de estrés, fatiga y poca experiencia, finalizando conflicto.



Figura 40: Dos aviones volando rutas con puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con valores altos de estrés, fatiga y poca experiencia, llegando al destino.



Figura 41: Dos aviones volando rutas con puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con valores bajos de estrés, fatiga y bastante experiencia finalizando conflicto.

Como se ha hecho anteriormente, estudiaremos el mismo caso de prueba alterando los valores de los parámetros característicos de los pilotos. En este caso usaremos los valores de 2%, 2% y 98% para el estrés, fatiga y experiencia respectivamente, indicando que se trata de pilotos con muchas horas de vuelo y que están descansados, por tanto en situación óptima para pilotar. Como se observa

en la Figura 41, estos pilotos tardan menos en gestionar las maniobras y órdenes de los controladores en comparación con el anterior caso de prueba. Aquí no sucederá que las gestiones de distintos tipos de maniobras se superpongan a no ser que sea totalmente inevitable dados los bajos tiempos de respuesta de los pilotos. Por ejemplo, en este caso el piloto del avión *Plane2* sí es capaz de gestionar la orden de restablecer el vuelo a los valores de crucero antes de pasar por su segundo punto de paso. Al igual que sucedía en la Figura 39, el piloto de la aeronave *Plane1* rebasa su segundo punto de paso cuando se encontraba en una situación de riesgo de conflicto. El piloto gestiona la creación del siguiente tramo de la misma forma que en el experimento anterior. Al llegar al fin del tramo se genera el hecho “GoNextLegWithConflict” para posteriormente pasar a realizar la tarea y proceso explicado en la Figura 24 de la Sección 5.1.5.3.

6.2. Caso avanzado: varios aviones

El segundo tipo de caso de estudio corresponde a simulaciones con más aviones, en concreto 6 aviones aunque sería extensible a n siempre que el entorno de ejecución lo soporte. Por tanto se requiere un despliegue con seis aeronaves, seis pilotos, un controlador aéreo, un creador de planes de vuelos y un creador de la simulación. Este despliegue se muestra en la Figura 42.

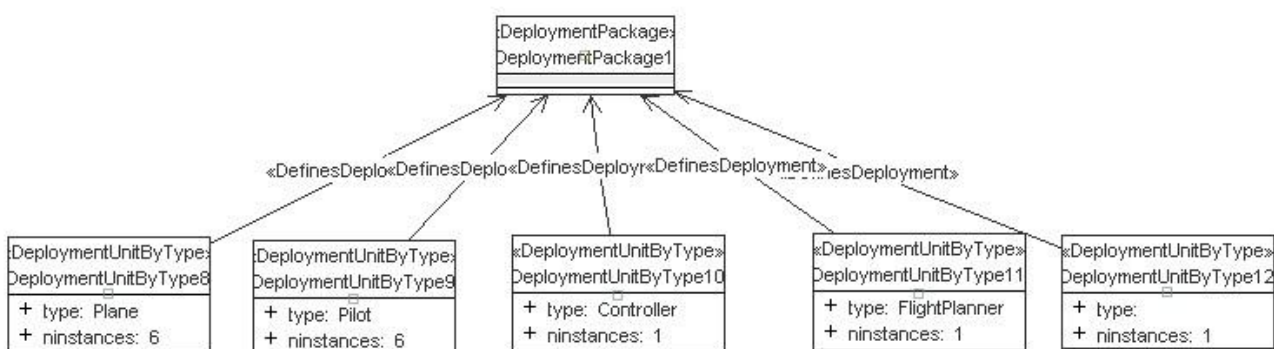


Figura 42: Despliegue seis aviones.

En este caso los vuelos parten de distintos aeropuertos de la Península Ibérica. Las posibles situaciones de conflicto involucran a varios aviones, por lo que es posible que las órdenes destinadas a resolver un conflicto provoquen otro.

6.2.1. Varios aviones sin puntos de paso

En este caso, los vuelos sólo tienen especificados aeropuertos de origen y destino, y no puntos de paso intermedios. Al igual que en los experimentos anteriores, esta situación se analiza con distintos valores de estrés, fatiga y experiencia de los pilotos involucrados.

En primer lugar se considera el caso de pilotos con gran estrés y fatiga y con muy poca experiencia. Ésta es por tanto la situación en la que los tiempos de respuesta de los pilotos son más altos. El resultado de los experimentos es similar al de los experimentos con dos aviones en similares circunstancias (ver Sección 6.1.1). Los pilotos tardan bastante en poner sus aeronaves a rumbo. Además, como en este caso sale más de un avión desde cada aeropuerto con diferencias relativamente cortas de tiempo, hay un cierto periodo en que las aeronaves se encuentran en alto riesgo de colisión con otras que despegan del mismo aeropuerto. Sólo cuando los pilotos corrigen la altura y rumbo de la aeronave se elimina esta situación. Esto puede verse en la Figura 43 donde al principio de cada travesía los aviones se colorean en rojo (peligro alto de colisión) y su altitud no cambia (ruta de color blanco). Por otro lado, también en la Figura 43, se puede observar que de nuevo hay dos aviones (*Plane2* y *Plane3*) que entran en alto riesgo de colisión (marcados en rojo). La Figura 44 recoge el instante en el que este riesgo ya está en curso de eliminación. El riesgo

desaparece cuando la aeronave que vuela hacia el este (*Plane2*) cambia la altitud de su vuelo, pero ello se logra después de que el otro avión haya cruzado su estela.

La imagen de la Figura 43 es también representativa de lo que ocurre cuando estando los aviones en conflicto se detecta un nuevo conflicto. Se puede ver en la imagen que tanto los aviones *Plane1* y *Plane2* por un lado, como los aviones *Plane3* y *Plane4* por otro, salen con conflicto desde el despegue. Después, el avión *Plane2* entra en conflicto con el *Plane3* y el *Plane4*. Esto provoca que los 4 aviones estén en un nuevo conflicto. Para resolver este último conflicto, cada piloto tendrá primero que considerar la anterior orden de conflicto como finalizada. Esto se puede ver en el diagrama de la Figura 21, donde la tarea “ObeyOrderCheck” recibe un hecho del tipo “OrderFinished” con el valor del campo “IsBecauseOtherConflict” igual a “true”. Esto causa que en esta tarea los pilotos no restablezcan el tramo por el que estaban volando antes del conflicto, ya que tienen que abordar el nuevo conflicto que ha surgido.

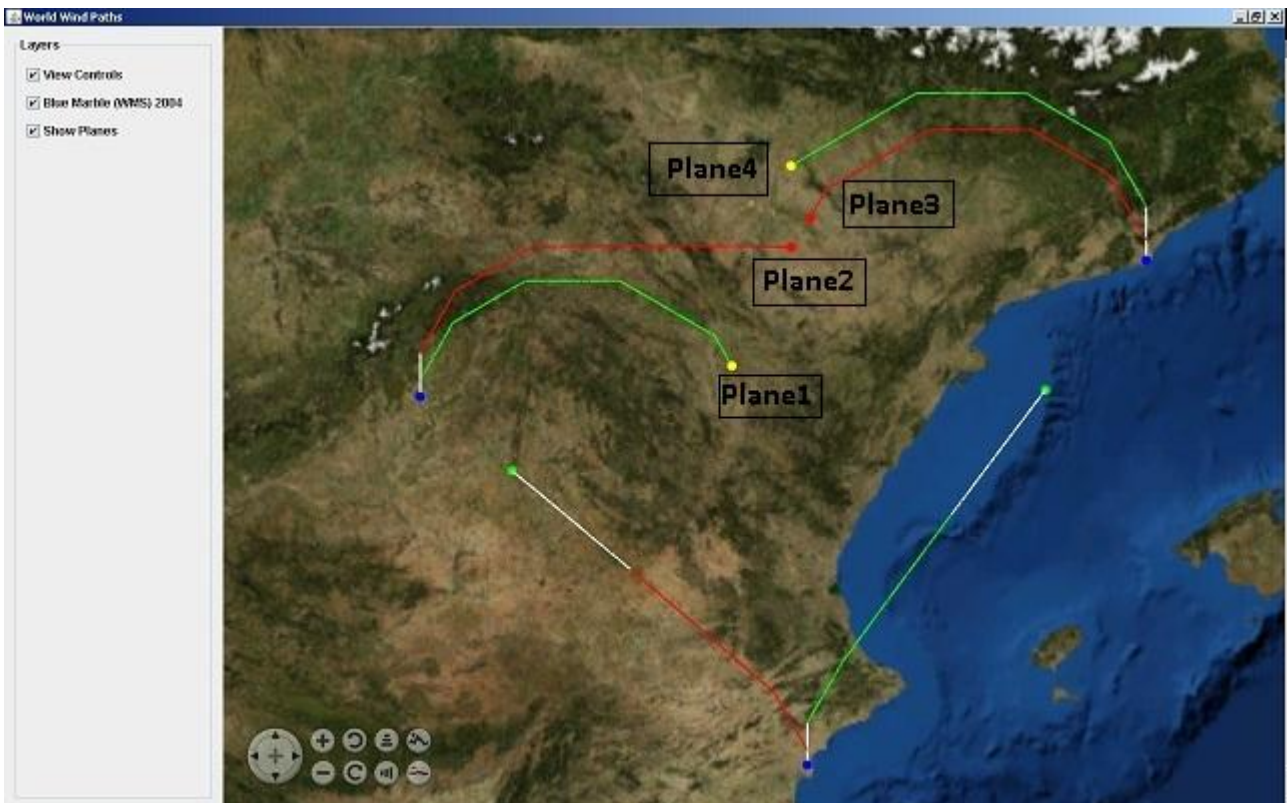


Figura 43: Alto riesgo de conflicto entre varios aviones volando rutas sin puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con altos valores de estrés y fatiga, y poca experiencia.

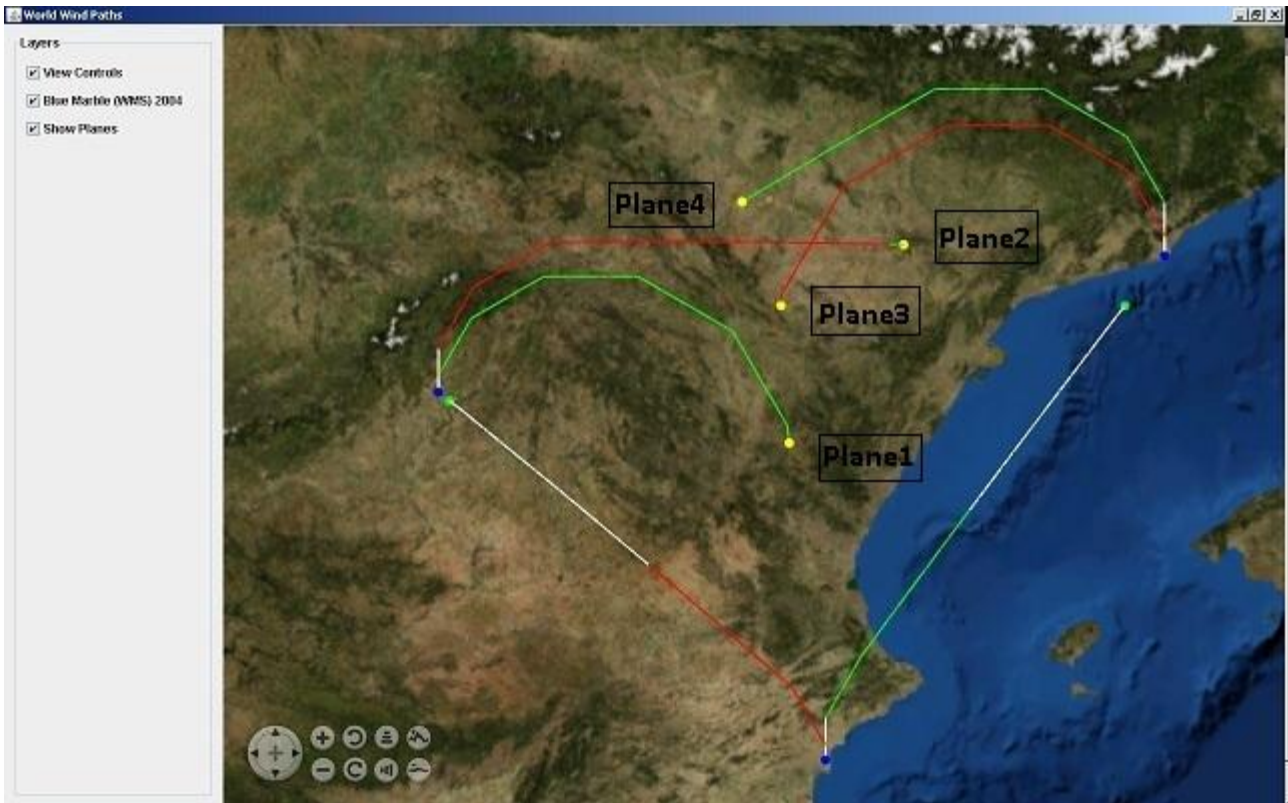


Figura 44: Varios aviones volando rutas sin puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con altos valores de estrés y fatiga, y poca experiencia gestionando conflictos.

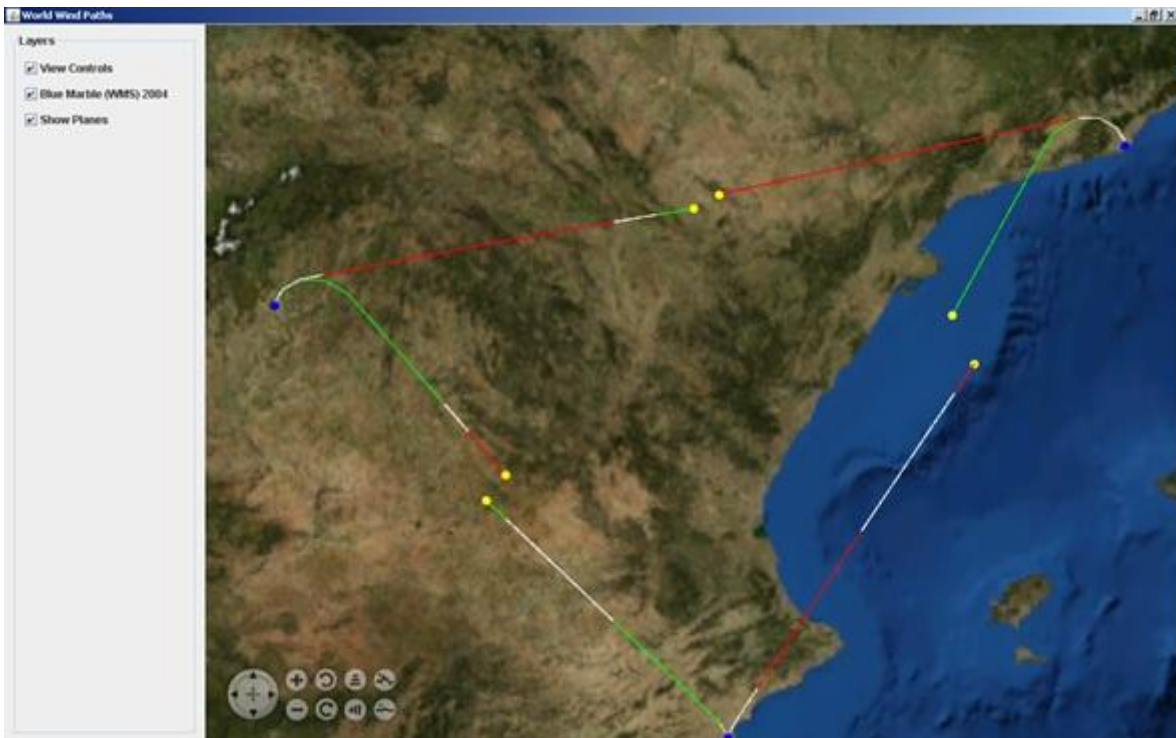


Figura 45: Varios aviones volando rutas sin puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con bajos valores de estrés y fatiga, y bastante experiencia gestionando conflictos.

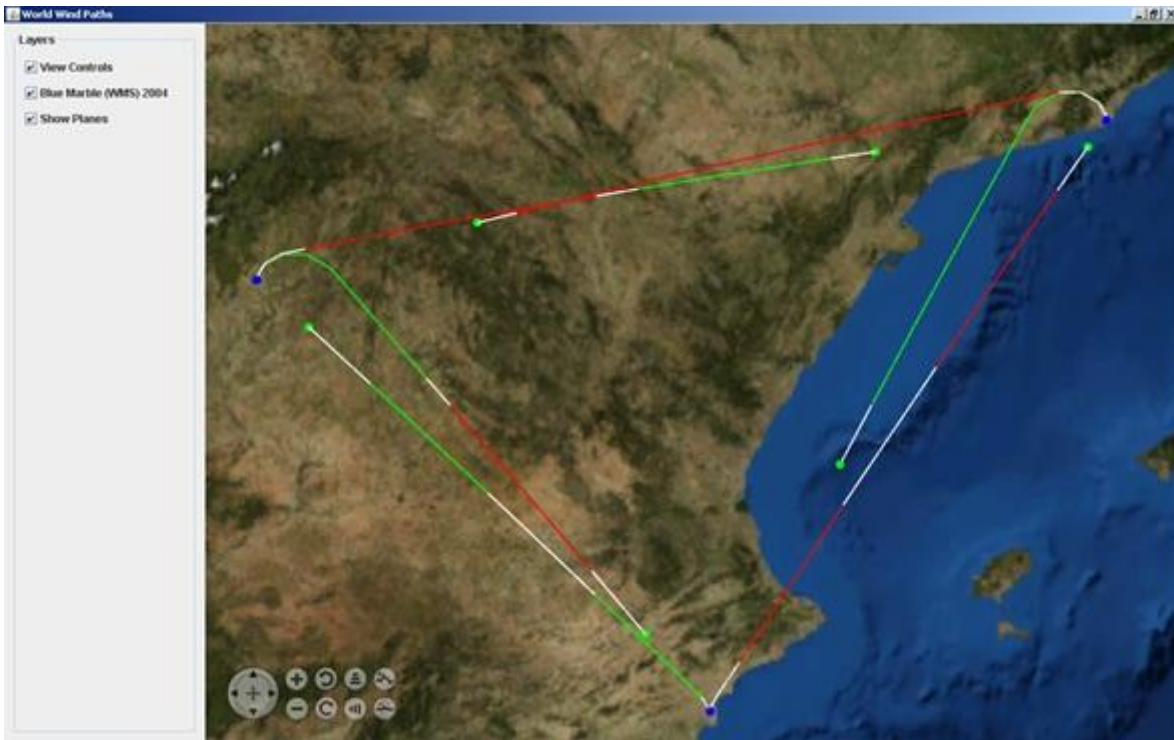


Figura 46: Varios aviones volando rutas sin puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con bajos valores de estrés y fatiga, y bastante experiencia finalizando conflictos.

El segundo caso considerado en este apartado es el de pilotos con poco estrés y fatiga y un alto grado de experiencia, y por tanto con tiempos de respuesta bajos. Las Figura 45 y Figura 46 corresponden a esta situación.

Como puede verse en las figuras, los pilotos tardan relativamente poco en establecer el rumbo correcto hacia su aeropuerto de destino. Ello no evita que justo después del despegue y durante un corto periodo de tiempo no entren en situación de alto riesgo de colisión con otros aviones que salen del mismo aeropuerto con poca diferencia de tiempo. Hay que recordar que todos los aviones salen de los aeropuertos con las mismas condiciones iniciales de altura y velocidad (ver Sección 4.1.1). Los pilotos no tardarán en recibir y acatar la orden de los controladores de cambiar su altura y velocidad reduciendo de este modo dicho riesgo.

La Figura 45 es un ejemplo de como un avión sale de una zona de conflicto durante un breve instante de tiempo y vuelve a entrar en otra zona de riesgo poco después. Es el caso de los aviones que despegan de Barajas y Alicante. Estos aviones tienen un conflicto inicial con otros que salen del mismo aeropuerto. Posteriormente, estos vuelos pasan a estar durante un tiempo libres de conflicto y a volar a su altura de crucero. Estos momentos corresponden a la parte de las trayectorias de color blanco. Esta situación se mantiene poco tiempo porque los aviones se encuentran pronto con otros volando en el mismo rumbo y altura pero sentido contrario. . Ello les obliga a modificar su altura y velocidad de nuevo. La Figura 46 muestra el momento en que después de superar el segundo conflicto, los vuelos se dirigen hacia sus destinos sin que parezca que vayan a entrar en ningún otro conflicto.

6.2.2. Varios aviones con puntos de paso

Por último, se considera un experimento con varios vuelos que incluyen puntos de paso intermedios. En lugar de utilizar grupos de pilotos homogéneos, se emplearán pilotos con distintas características para analizar cómo afectan a los vuelos. Los perfiles de los pilotos considerados son:

- Los pilotos de los aviones *Plane1* y *Plane2* tienen valores de estrés (98%) y fatiga (98%) elevados y poca experiencia (5%).
- Los pilotos de los aviones *Plane2* y *Plane3* tienen valores de estrés (50%) y fatiga (50%) medios, y una experiencia media-baja (25%).
- Los aviones *Plane4* y *Plane5* son considerados UAVs. Esto se representa asignándoles pilotos que no experimentan estrés ni fatiga (valores del 0%) y cuya experiencia es máxima (del 100%). Este último valor se asigna considerando que el UAV tiene un control suficientemente desarrollado. Posiblemente, los UAVs reales tengan un valor menos de esta característica.

La Figura 47 recoge parte de la simulación en estas condiciones. Se deben comentar varios aspectos de la misma. En primer lugar se puede destacar que tanto los aviones *Plane1* como *Plane2*, los cuales parten de sus orígenes antes que el resto de aeronaves, son los que van a llegar más tarde a sus respectivos destinos. Esto se debe a que sus pilotos son los que tienen mayores tiempos de respuesta y por ello son los que tardan más en ponerse en rumbo correcto y alcanzar la velocidad de crucero, así como en llevar a cabo las correcciones producidas por los conflictos. Por ejemplo, la trayectoria del *Plane1* muestra que este vuelo se desvía mucho al ejecutar las maniobras de evasión de conflicto. Esto hace además que dichos vuelos no tengan tiempo en determinadas ocasiones de salir de un conflicto antes de que se les presente un nuevo riesgo de colisión. Este es el caso del *Plane1*. Este avión tiene al principio un riesgo de colisión con la aeronave *Plane2* durante un periodo muy breve de tiempo. Cuando este riesgo desaparece, el avión entra en un nuevo conflicto, en este caso con el *Plane3*, antes de que el piloto haya podido restablecer los valores de crucero.



Figura 47: Varios aviones volando rutas con puntos de paso especificados, tripulados por pilotos con distintos valores de estrés, fatiga y experiencia gestionando conflictos.

6.3. Discusión

El sistema desarrollado ha permitido simular y evaluar los casos de prueba de las Secciones 6.1 y 6.2. La información obtenida en estos estudios permite extraer algunas conclusiones acerca de la propuesta de este trabajo y compararla con otras aproximaciones vistas en el estado del arte (ver

Sección 3).

En primer lugar, los modelos del tráfico aéreo propuestos han permitido reproducir algunos fenómenos observados en la realidad. En particular, ha podido observarse como la densidad del tráfico incrementa las probabilidades de conflicto y como las respuestas de los pilotos se veían afectadas por su estado y características. Sobre la primera observación, resulta razonable que una mayor densidad de tráfico implique que las distancias entre las aeronaves son más próximas a los límites de seguridad. Esta situación ha podido apreciarse en los casos de la Sección 6.2, donde el número de aviones era mayor. Por tanto, en caso de conflicto hay menos tiempo para reaccionar. Sobre la segunda observación, la introducción en los modelos de la tarea “ThinkNewDecision” ha permitido recoger la influencia en el tiempo de reacción de los pilotos de su estado en cuanto a fatiga o estrés y de su nivel de experiencia. De esta forma se ha podido modelar la influencia de estos factores en la resolución de conflictos. Así, en los casos analizados donde los valores de experiencia eran bajos y los de estrés y fatiga altos, el número y proximidad de los riesgos de conflicto aumentaba, hasta tal punto de que en ciertas ocasiones se llegaba cerca de la colisión.

Esta capacidad para representar con realismo situaciones de tráfico aéreo también puede usarse para evaluar situaciones hipotéticas como se señaló en la introducción (ver Sección 1). Por ejemplo, se ha indicado que los UAVs podrían ser modelados como pilotos donde los factores de estrés y fatiga no aparecen (ver Sección 4.1.3). Aquí las simulaciones muestran el efecto positivo de contar con elementos que evalúan situaciones y toman decisiones de forma prácticamente inmediata para la fluidez del tráfico y la reducción del número de conflictos. Estas observaciones apoyan las posibles ventajas de la introducción de UAVs en el espacio aéreo. No obstante, hay que señalar que los modelos aplicados son limitados. Así, en el caso de que sea necesario analizar situaciones más complejas para tomar decisiones, es posible que los pilotos humanos puedan obrar de forma rápida según su experiencia mientras que los UAVs se vean atascados en largas evaluaciones o deban dejarlas incompletas para obrar en tiempo. En este sentido, la Sección 6.2.2 modeló los UAVs como aeronaves cuyos pilotos no tienen fatiga ni estrés y sí una máxima experiencia, por lo que sus tiempo de respuesta son mínimos. Una aproximación más realista requeriría considerar otros factores. Por ejemplo, la organización del conocimiento de vuelo puede hacer que un UAV con mucha experiencia tenga respuestas lentas en ciertas circunstancias donde debe examinar muchas alternativas.

En segundo lugar hay que hacer algún comentario acerca de la flexibilidad proporcionada a la simulación por el MDE y la arquitectura en tres capas, aunque es un aspecto que no se ha discutido en los experimentos anteriores. Una vez desarrollada una primera versión de la simulación con el diseño apropiado, las capas de visualización y control pueden ser reutilizadas en múltiples simulaciones con distinta lógica subyacente. Modificar esta lógica sólo requiere cambiar los modelos de la Sección 5.1 según las nuevas hipótesis. Después se regeneran las clases de la capa lógica y se dispone de la nueva simulación. Por supuesto, este cambio puede requerir un mayor trabajo si se decide cambiar el IAF por otra plataforma sobre la que ejecutar la lógica y no se tienen las plantillas de código para esa plataforma. En ese caso habría que desarrollar dichas plantillas. Abordar este tipo de cambios sobre las herramientas de simulación vistas en el estado del arte sería mucho más complejo. En todos los casos analizados se requeriría desarrollar código usando las librerías disponibles con la correspondiente herramienta. Éste sería el caso de tratar de contemplar las características de los pilotos que se han tenido en cuenta en estas simulaciones.

7. Conclusiones y trabajo futuro

7.1. Conclusiones

Este trabajo ha abordado dos objetivos en relación con las simulaciones de tráfico aéreo. En primer lugar mostrar la viabilidad de las aproximaciones ABM en combinación con MDE para ofrecer un marco flexible y extensible para este tipo de simulaciones. En segundo lugar, ofrecer una versión inicial de los modelos que recojan información sobre el tráfico aéreo de forma que pueda ser usada para especificar simulaciones. La adopción de esta aproximación se ha basado en un análisis del estado del arte. En dicho estudio se ha prestado especial atención a las limitaciones que aparecen en las herramientas actuales, buscado aportar posibles soluciones para abordarlas.

Respecto a los modelos, se ha analizado la importancia de considerar el comportamiento de los humanos que intervienen en el tráfico aéreo, incluyendo por el momento a pilotos, controladores y gestores de planes de vuelo. De acuerdo con los experimentos realizados, trabajar con estos aspectos es fundamental para entender ciertas características del tráfico aéreo. La especificación realizada ha incorporado factores de experiencia, estrés y fatiga para mostrar cómo inciden en la resolución de las situaciones del tráfico. Este modelado también ha permitido incluir de forma simple UAVs modelados como pilotos cuyos estados mentales y reflejos son óptimos y no se deterioran. Aunque se trata de una aproximación simple, ha permitido una primera valoración del impacto positivo que tendría la inclusión de UAVs para mitigar parte de los problemas de gestión del tráfico aéreo.

Trasladar el esfuerzo de modelado a simulaciones no es una tarea trivial. Los modelos cambian para adaptarse a nueva información y necesidades, y las plataformas de simulación están en continua evolución. El desarrollo de aplicaciones en este tipo de contexto es un buen candidato para desarrollos dirigidos por modelos. En particular, el uso de un modelado ABM a alto nivel con metodologías de AOSE para el desarrollo, facilita la transición entre modelos. En todos los niveles se usan agentes, por lo que se facilita el paso de los modelos conceptuales, a los de diseño y finalmente al código. Para demostrar la viabilidad de esta propuesta se ha usado la metodología INGENIAS [21]. Su elección se debe a que se trata de una metodología MDE de AOSE que ya ha sido usada en contexto de ABM y que cuenta con soporte de herramientas. Las facilidades de distribución y despliegue del IAF proporcionan además una cierta escalabilidad en los desarrollos, aunque limitada por el incremento requerido en las comunicaciones entre agentes.

La combinación de estos modelos y método de desarrollo facilita además la integración y adaptación de las herramientas de simulación. El estado del arte ha mostrado que las herramientas de simulación obvian partes relevantes del tráfico aéreo según su foco de estudio: las centradas en la dinámica de un vuelo no suelen contemplar las limitaciones de tráfico impuestas por la presencia de otras aeronaves ni las posibles instrucciones de los controladores; las herramientas de simulación de tráfico aéreo no suelen contemplar la influencia de los factores humanos en el comportamiento de los agentes a la hora de la toma de decisiones. Si esta información estuviese descrita con modelos y transformaciones en el código relevante para las herramientas, se podría contemplar su integración con mayor facilidad, combinando los modelos y añadiendo transformaciones. Ésta constituye una futura línea de investigación. Por otro lado, especificar a nivel de modelos facilita la comunicación y discusión del conocimiento entre los expertos, y por tanto la investigación y evaluación de las propuestas.

En cuanto a la simulación final generada, se ha desarrollado un sistema intuitivo para el usuario, fácil de configurar y con una interfaz en la línea de otras herramientas del dominio. El sistema ha

servido como prueba de concepto de las propiedades de flexibilidad, facilidad de desarrollo y proximidad a los expertos del dominio mencionadas anteriormente.

7.2. Trabajo Futuro

Aunque el trabajo realizado apunta a que esta línea es prometedora para la simulación aérea, tanto como método de desarrollo como por especificación del dominio con los modelos, aún quedan muchos aspectos por mejorar y explorar. Algunos de los contemplados como trabajo futuro son:

- *Lenguajes de modelado más próximos al dominio.* Aunque el uso de agentes permite aproximar los modelos usados a los expertos del dominio, las primitivas empleadas no son aún las propias del tráfico aéreo. En esta línea es interesante explorar la definición de lenguajes específicos de dominio para este tipo de simulaciones.
- *Ampliación de los tipos de agentes.* En el tráfico aéreo intervienen más roles que los presentados en este trabajo. Por ejemplo se puede contemplar distinguir entre los pilotos al capitán, el primer oficial y el segundo oficial.
- *Mejor caracterización de las aeronaves.* Los aviones son sistemas muy complejos cuyo número de características y controles es muy amplio. Algunos de los aspectos no considerados en los modelos presentados son la cantidad de combustible cargada, el consumo en función de la velocidad y el peso, la probabilidad de fallos según la antigüedad de la aeronave o los ángulos necesarios para realizar cambios de rumbo o altitud.
- *Zonas restringidas al vuelo.* En el espacio aéreo real hay zonas que no está permitido sobrevolar. Estas zonas pueden ser zonas permanentemente restringidas, generalmente por razones de seguridad, o temporalmente, por ejemplo debido a incendios o nubes volcánicas.
- *Orografía.* En la simulación actual sólo se han considerado como obstáculos otros aviones. Sin embargo la existencia de elevaciones en el terreno también impone limitaciones al vuelo que deben ser consideradas.
- *Condiciones meteorológicas.* Las condiciones meteorológicas adversas imponen restricciones en la gestión del tráfico aéreo. Producen retrasos en los despegues y aterrizajes, desvían trayectorias y pueden cambiar las condiciones del vuelo. Por ello, un modelo completo debería contemplar los efectos de fenómenos como tormentas, vientos y niebla.
- *Aumento del número de controladores aéreos.* Con sus respectivos procesos de sincronización e interacción para gestionar los conflictos de una misma región o transmitir el control de los aviones de una región a otra.
- *Gestión de los despegues y aterrizaje.* Una de las tareas más complejas de los controladores que trabajan en las torres de control es la gestión de las aproximaciones a los aeropuertos. Es una tarea donde hay que coordinar los aterrizajes y despegues entre sí haciendo uso de las pistas disponibles en el aeropuerto. Se ha de llevar a cabo de manera que se respeten los tiempos y espacios de seguridad y se evite cualquier colisión, pero maximizando el número de vuelos atendidos.
- *Generación automática de los planes de vuelo.* Las compañías aéreas disponen de aplicaciones que se encargan de gestionar y generar automáticamente sus planes de vuelo atendiendo a diversas restricciones y criterios de optimización. Considerar esta planificación en la simulación puede ayudar a detectar conflictos entre las necesidades de las compañías y los gestores de los aeropuertos, así como oportunidades de optimización.

Bibliografía

- [1] Eurocontrol, "A vision for European Aviation," Newdesk Communications Ltd., 2005.
- [2] H. Matsumoto, "International urban systems and air passenger and cargo flows: some calculations," *Journal of Air Transport Management*, vol. 10, no. 4, pp. 239-247.
- [3] B. Iordanova, "Air traffic knowledge management policy," *European Journal of Operational Research*, vol. 146, no. 1, pp. 83-100, 2003.
- [4] J. Roskam, *Airplane Flight Dynamics and Automatic Flight Controls, Design, Analysis and Research Corporation (DARcorporation)*, 1995.
- [5] A. Kazda and R. Caves, *Airport design and operation*, Emerald Group Publishing, 2007.
- [6] C. Tomlin, G. Pappas and S. Sastry, "Conflict Resolution for Air Traffic Management: A Study in Multi-Agent Hybrid Systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 43, no. 4, pp. 509-521, Abril 1998.
- [7] D. Denery, H. Erzberger, T. Davis, S. Green and B. McNally, "Challenges of air traffic management research - Analysis, simulation, and field test," in *1997 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 1997.
- [8] JSBSim, "JSBSim - Open Source Flight Dynamics Software Library," 2010. [Online]. Available: <http://jsbsim.sourceforge.net/>. [Accessed 01 Septiembre 2011].
- [9] FlightGear Flight Simulator, "FlightGear Flight Simulator," 2010. [Online]. Available: <http://www.flightgear.org/>. [Accessed 01 Septiembre 2011].
- [10] OpenEagles, "OpenEagles Simulation Framework," 2011. [Online]. Available: <http://www.openeagles.org/>. [Accessed 1 Septiembre 2011].
- [11] K. Bilimoria, "FACET: Future ATM Concepts Evaluation Tool," in *3rd USA/Europe ATM 2001 R&D Seminar*, Napoli, Italy, 2000.
- [12] S. Wolfe, P. Jarvis, F. Enomoto, M. Sierhuis, B. van Putten and K. Sheth, "A Multi-Agent Simulation of Collaborative Air Traffic Flow Management," in *Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering*, A. Bazzan and F. Klügl, Eds., IGI Global, 2009, pp. 357-381.
- [13] B. Gore, "Man-Machine Integration Design and Analysis System (MIDAS) v5: Augmentations, Motivations, and Directions for Aeronautics Applications," *HMAT 2010: 1st International Workshop on Human Modelling in Assisted Transportation 2010*, 2010.
- [14] A. Law and W. Kelton, *Simulation Modeling and Analysis*, McGraw-Hill, 1991.
- [15] D. Foyle, B. Hooey, M. Byrne, K. Corker, S. Deutsch, C. Lebiere, K. Leiden and C. Wickens, "Human performance models of pilot behaviour," in *The Human Factors and Ergonomics Society 49th Annual Meeting*, Santa Monica, CA, 2005.
- [16] R. Bentley, J. Hughes, D. Randall, T. Rodden, P. Sawyer, D. Shapiro and I. Sommerville, "Ethnographically-informed systems design for air traffic control," in *1992 ACM Conference on Computer-Supported Cooperative Work (CSCW 1992)*, 1992.
- [17] D. Wickens, A. Mavor, R. Parasuraman and J. McGee, *The future of air traffic control: Human operators and automation*, National Academy Press, 1998.
- [18] D. Frankel, *Model Driven Architecture: Applying MDA to Enterprise Computing*, John Wiley & Sons, 2003.
- [19] N. Gilbert and K. Troitzsch, *Simulation for the Social Scientist*, Open University Press, 2005.
- [20] A. Bazzan and F. Klügl, Eds., *Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering*, IGI Global, 2009.

- [21] J. Pavón, J. Gómez-Sanz and R. Fuentes, "The INGENIAS Methodology and Tools," in *Agent-Oriented Methodologies*, B. Henderson-Sellers and P. Giorgini, Eds., IGI Global, 2005, pp. 236-276.
- [22] B. Henderson-Sellers and P. Giorgini, Eds., *Agent-Oriented Methodologies*, IGI Global, 2005.
- [23] S. Hassan, R. Fuentes-Fernández, J. Galán, A. López-Paredes and J. Pavón, "Reducing the Modeling Gap: On the use of Metamodels in Agent-Based Simulation," in *6th Conference of the European Social Simulation Association (ESSA 2009)*, 2009.
- [24] K. Valavanis, *Advances in Unmanned Aerial vehicles - State of the Art and the Road to Autonomy*, Springer, 2007.
- [25] M. DeGarmo and G. Nelson, "Prospective Unmanned Aerial Vehicle Operations in the Future National Airspace System," in *AIAA 4th Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum*, 2004.
- [26] J. Calvo, *Fundamentos de Navegación Aérea*, E. d. I. U. A. d. Madrid, Ed., 2003.
- [27] Aeropuertos Españoles y Navegación Aérea (AENA), "Navegación Aérea: Espacio aéreo," [Online]. Available: <http://www.aena.es/csee/Satellite/navegacion-aerea/es/Page/1043396095606/>. [Accessed 1 September 2011].
- [28] U. F. A. Administration, "Glossary of Terms," 06 08 2009. [Online]. Available: <http://www.fly.faa.gov/FAQ/Acronyms/acronyms.jsp>. [Accessed 1 September 2011].
- [29] Federal Aviation Administration, "Air Traffic Control FAA Order 7110.65T," Washington, DC., Feb. 11, 2010.
- [30] R. Helmreich, A. Merritt and J. Wilhelm, "The evolution of crew resource management training in commercial aviation," *International Journal of Aviation Psychology*, vol. 9, p. 19–32, 1999.
- [31] E. Wiener and N. D.C., *Human Factors in Aviation*, Academic Press, Inc, 1988.
- [32] G. Cooper, M. White and J. Lauber, "Resource Management on the Flightdeck: Proceedings of a NASA/Industry Workshop," Moffett Field, CA, 1980.
- [33] W. Taggart, *Crew resource management: Achieving enhanced flight operations*, Aldershot, UK: *Aviation Psychology in Practice*, 1994, pp. 309-339.
- [34] E. Wiener, B. Kanki and R. Helmreich, Eds., *Cockpit Resource Management*, Academic Press, 1995.
- [35] Federal Aviation Administration, "Crew resource management training," Advisory Circular No AC 123-51B, Washington, DC, 1995.
- [36] A. Mellor, "Design, development and implementation of a CRM program," *Aviation instruction and Training*, pp. 368-384, 1993.
- [37] T. Kern., *Redefining airmanship*, McGraw-Hill, Ed., New York, 1997.
- [38] J. Lauber and H. Foushee, "Guidelines for the development of line oriented flight training," in *NASA Conference Publication 2184*, Moffett Field, CA, 1981.
- [39] T. Chidester, R. Helmreich, S. Gregorich and C. Geis, "Pilot Personality and Crew Coordination: Implications for Training and Selection," vol. 1, 1991, pp. 25-44.
- [40] Eurocontrol, "Eurocontrol specifications for the use of military unmanned aerial vehicles as operational air traffic outside segregated airspace," 2007.
- [41] NASA, "Access 5. HALE ROA Concept of Operations," 2003.
- [42] IABG Dept. Airborne Air Defence, "CARE Innovative Action, Preliminary Study on Integration of Unmanned Aerial Vehicles into Future Air Traffic Management," 2001.
- [43] K. Williams, *A summary of unmanned aircraft accident/incident data: Human factors implications*, F. Office of Aerospace Medicine, Ed., Washington, DC, 2004.
- [44] E. Semsch, M. Jakob, D. Pavlíček and M. Pechoucek, "Autonomous UAV Surveillance in

Complex Urban Environments," in *IAT 2009*, 2009.

- [45] Rasmussen Simulation Technologies Limited, "AVDS - Aviator Visual Design Simulator," 2011. [Online]. Available: http://www.rassimtech.com/index.php?option=com_content&view=article&id=2&Itemid=3. [Accessed 1 Septiembre 2011].
- [46] J. Rolfe and K. Staples, Eds., *Flight simulation*, Cambridge University Press, 1988.
- [47] P. Ehlert and L. Rothkrantz, "The Intelligent Cockpit Environment Project," 2003.
- [48] E. Geneste and D. Barnes, "Aerobot airdata measurement for planetary exploration," in *3rd British Conference on Autonomous Mobile Robots and Autonomous Systems - Towards Intelligent Mobile Robots (TIMR 01)*, Manchester, UK, 2001.
- [49] OpenEagles, "Projects & Applications," [Online]. Available: <http://www.openeagles.org/wiki/doku.php?id=projects:projects>. [Accessed 1 September 2011].
- [50] MathWorks, "Simulink," 2011. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/products/simulink/>. [Accessed 1 Septiembre 2011].
- [51] A. Agogino and K. Tumer, "Distributed agent-based air traffic flow management," in *Sixth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Honolulu, Hawaii, May, 2007.
- [52] D. Sweet, V. Manikonda, J. Aronson, K. Roth and M. Blake, "Fast-Time Simulation System for Analysis of Advanced Air Transportation Concepts," in *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, Monterey, California, 2002.
- [53] M. Tambe, "Agent Architectures for Flexible, Practical Teamwork," in *14th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI 1997) and 9th Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence (IAAI 1997)*, Providence, Rhode Island, July, 1997.
- [54] S. Wolfe, M. Sierhuis and P. Jarvis, "To BDI, or Not to BDI: Design Choices in an Agent-Based Traffic Flow Management Simulation," in *2008 Spring Simulation Multiconference (SpringSim 2008)*, San Diego, CA, USA, 2008.
- [55] Flight Explorer Inc., "Flight Explorer," [Online]. Available: <http://www.flightexplorer.com/>. [Accessed 1 September 2011].
- [56] N. Huff, A. Kamel and K. Nygard, "An Agent Based Framework for Modeling UAVs," in *The 16th International Conference on Computer Applications in Industry and Engineering (CAINE03)*, 2003.
- [57] A. Rao and M. P. Georgeff, "BDI-agents: From Theory to Practice," in *Proceedings of the First International Conference on Multiagent Systems*, San Francisco, 1995.
- [58] J. Duncan and L. Feterle, "The use of personal computer-based aviation training devices to teach aircrew decision-making, teamwork, and resource management," in *Proceedings of IEEE 2000 National Aerospace and Electronics Conference*, Dayton, OH, 2000.
- [59] A. Goktogan, E. Nettleton, M. Ridley and S. Sukkarieh, "Real Time Multi-UAV Simulator," in *IEEE International Conference on Robotics & Automation, Taipe, Taiwan*, 2003.
- [60] T. Cheviron, A. Chriette and F. Plestan, "Generic Nonlinear model of reduced scale UAV," in *IEEE International Conference on Robotics & Automation, Kobe, Japan*, 2009.
- [61] R. Beard and T. McLain, "Multiple UAV cooperative search under collision avoidance and limited range communication constraints," in *42nd IEEE Conference on Decision and Control*, 2003.
- [62] "Directory of Waypoints in Spain," [Online]. Available: <http://www.fallingrain.com/world/SP/waypoints.html>. [Accessed 1 September 2011].

- [63] "Dimensions & key data for A-320," [Online]. Available: <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a320family/a320/specifications/#details>. [Accessed 1 September 2011].
- [64] Airbus S.A.S. Customer Services, "A320 airplane characteristics for airport planning," [Online]. Available: <http://www.airbus.com/support/maintenance-engineering/technical-data/aircraft-characteristics/>. [Accessed 1 September 2011].
- [65] Iberia Líneas Aéreas de España, S.A., "Flota de Iberia en el Grupo Iberia," [Online]. Available: <http://grupo.iberia.es/portal/site/grupoiberia/menuitem.2f3f71d6b9bcb13a485771fbf34e51ca/>. [Accessed 1 September 2011].
- [66] C. Macal and M. North, "Tutorial on agent-based modelling and simulation," vol. 4, Nature Publishing Group, 2010, pp. 151-162.
- [67] J. Soto, A. Vizcaino, J. Portillo and M. Piattini, "Modelling a Knowledge Management System Architecture with INGENIAS Methodology.," in *En Proceedings of the 15th international Conference on Computing*, Washington, DC, 2006.
- [68] C. Macal and M. North, "Tutorial on agent-based modelling and simulation," *Journal of Simulation*, vol. 4, no. 3, pp. 151-162, 2010.
- [69] T. Reenskau, "MVC XEROX PARC 1978-79," [Online]. Available: <http://heim.ifi.uio.no/~trygver/themes/mvc/mvc-index.html>. [Accessed 1 September 2011].
- [70] J. Gómez-Sanz, C. Rodríguez-Fernández and J. Pavón, "Quick Prototyping and Simulation with the INGENIAS Agent Framework," in *Proceedings of the Second Multi-Agent Logics, Languages, and Organisations Federated Workshops*, Turin, Italy, 2009.
- [71] "World Wind Java SDK," [Online]. Available: <http://worldwind.arc.nasa.gov/java/>. [Accessed 1 September 2011].
- [72] D. Garland, J. A. Wise and V. Hopkin, *Handbook of Aviation Human Factors*, L. E. Associates, Ed., 1999.
- [73] K. Campbell, W. Cooper, D. Greenbaum and W. L., "Modeling Distributed Human Decision-Making in Traffic Flow Management Operations," in *3rd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar*, Napoli, Italy, 2000.
- [74] J. Pavón, J. Gómez-Sanz and R. Fuentes, *Model Driven Development of Multi-Agent Systems*, vol. 4066, A. Rensink and J. Warmer, Eds., Springer, Heidelberg, 2006, pp. 284-298.
- [75] J. A. Botia, J. C. Gonzalez, J. Gomez and J. Pavon, "The Ingenias Project: Methods and Tool For Developing Multiagent Systems," 2008, pp. 529-534.
- [76] J. Gómez-Sanz, R. Fuentes, J. Pavón and I. García-Magariño, "INGENIAS development kit: a visual multi-agent system development environment," in *The 7th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2008) (Demos)*, 2008.
- [77] A. Agogino and K. Tumer, "Improving air traffic management through agent suggestions," in *AAMAS '09 Proceedings of The 8th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems - Volume 2*, 2009.
- [78] R. E. Weibel and J. R. Hansman, "Safety Considerations for Unmanned Aerial Vehicles in the National Airspace System," 2005.

Glosario

ABM	<i>Agent-Based Modelling</i>
ACC	<i>Area Control Center</i>
ACES	<i>Airspace Concept Evaluation System</i>
AIAA	<i>American Institute of Aeronautics and Astronautics</i>
Airway	<i>Pasillo aéreo</i>
AOSE	<i>Agent-Oriented Software Engineering</i>
ATM	<i>Air Traffic Management</i>
ATS	<i>Air Traffic Service</i>
AVDS	<i>Aviator Visual Design Simulator</i>
BDI	<i>Belief-Desire-Intention</i>
CRM	<i>Crew Resource Management</i>
DHS	<i>Department of Homeland Security, EEUU</i>
DIS	<i>Distributed Interactive Simulation</i>
DoD	<i>Department of Defense, EEUU</i>
Eurocontrol	<i>European Organisation for the Safety of Air Navigation</i>
FAA	<i>Federal Aviation Administration, EEUU</i>
FACET	<i>Future ATM Concepts Evaluation Tool</i>
FIR	<i>Flight Information Region</i>
GDP	<i>Ground Delay Program</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HF	<i>Human Factor</i>
HLA	<i>High-Level Architecture</i>
HTML	<i>HyperText Markup Language</i>
IAF	<i>INGENIAS Agent Framework</i>
IDK	<i>INGENIAS Development Kit</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFR	<i>Instrument Flight Rules</i>
IMPACT	<i>Intelligent agent-based Model for Policy Analysis of Collaborative Traffic flow management</i>
LOFT	<i>Line-Oriented Flight Training</i>
MDA	<i>Model-Driven Architecture</i>
MDE	<i>Model-Driven Engineering</i>
MIDAS	<i>Man-machine Integrated Design and Analysis System</i>
MVC	<i>Model-View-Controller</i>

NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration, EEUU</i>
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional
RDR	<i>Radio Detection and Ranging, radar</i>
STEAM	<i>a Shell for TEAMwork</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
UIR	<i>Upper Information Region</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VFR	<i>Visual Flight Rules</i>
Waypoint	Punto de paso
WMS	<i>Web Map Service, Open Geospatial Consortium</i>

Apéndice A: Tabla de identificadores de puntos de paso en la Península Ibérica

ID	WAYPOINT
0	ABRIX
1	ADUBI
2	AGADO
3	ANTON
4	BABOV
5	BADRU
6	BAKUP
7	BANIL
8	BARBO
9	BASSO
10	BERUX
11	BIPET
12	BISBA
13	BLASO
14	BOLKA
15	BRA
16	BRIKE
17	BROTO
18	CASIM
19	CEGAM
20	DADIV
21	DIPOL
22	DIRMU
23	DIXIS
24	DOLES
25	EDIGO
26	EDUMO
27	ETIBA
28	GALAT
29	GASBA
30	GOMER
31	GORDO
32	GUNET
33	HIDRA
34	KALMA
35	KAROL
36	KOPAS
37	KUMAN
38	KUREG

ID	WAYPOINT
39	LARPA
40	LARYS
41	LATRO
42	LAVAL
43	LEPES
44	LIPOR
45	LOBAR
46	LOTOS
47	LURAN
48	MECKI
49	MELON
50	MINVI
51	MITUM
52	MUDOS
53	NELAS
54	NETOS
55	NINOS
56	NORED
57	NUBLO
58	OSTUR
59	OXACA
60	PARKA
61	PASAS
62	PERDU
63	PESAS
64	PETEK
65	PIPOR
66	PITAX
67	PODUX
68	POPUL
69	PORLI
70	RAKOD
71	RAMON
72	REMGI
73	RETEN
74	RE VAT
75	RIDAV
76	RIPEL
77	RODAP

ID	WAYPOINT
78	ROSTA
79	RUBEO
80	SADUR
81	SALAS
82	SARAY
83	SEGRE
84	SELVA
85	SEROX
86	SOLAX
87	SORAS
88	SOVAR
89	SULID
90	SUMMO
91	SURCO
92	TEDRI
93	TENPA
94	USOTI
95	VASTO
96	VASUM
97	VOLTO
98	WALLY
99	XERES
100	ZANKO
101	ZARKO
102	ZORBA