

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

DEPARTAMENTO DE SEÑALES Y COMUNICACIONES

Programa de Doctorado

Tecnologías de las Telecomunicaciones



TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS Y MODELADO DE OPERACIONES BASADAS
EN TRAYECTORIA DEL TRÁFICO AÉREO DE LLEGADA
EN ÁREAS TERMINALES MEDIANTE SISTEMAS
MULTIAGENTE**

JOSÉ MIGUEL CANINO RODRÍGUEZ

Las Palmas de Gran Canaria, Mayo 2010

**D. PEDRO QUINTANA MORALES SECRETARIO DEL
DEPARTAMENTO DE SEÑALES Y COMUNICACIONES DE LA
UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA,**

CERTIFICA,

Que el Consejo de Doctores del Departamento en su sesión de fecha veinte de Abril de dos mil diez tomó el acuerdo de dar el consentimiento para su tramitación, a la tesis doctoral titulada “ANÁLISIS Y MODELADO DE OPERACIONES BASADAS EN TRAYECTORIA DEL TRÁFICO AÉREO DE LLEGADA EN ÁREAS TERMINALES MEDIANTE SISTEMAS MULTIAGENTE” presentada por el doctorando D. José Miguel Canino Rodríguez y dirigida por los doctores D. Juan Besada Portas, D. Jesús García Herrero y D. Luís Gómez Déniz.

Y para que así conste, y a efectos de lo previsto en el Artículo 73.2 del Reglamento de Estudios de Doctorado de esta Universidad, firmo la presente en Las Palmas de Gran Canaria, a tres de Mayo de dos mil diez

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

DEPARTAMENTO DE SEÑALES Y COMUNICACIONES

Programa de Doctorado

Tecnologías de las Telecomunicaciones



Tesis Doctoral

**ANÁLISIS Y MODELADO DE OPERACIONES BASADAS EN
TRAYECTORIA DEL TRÁFICO AÉREO DE LLEGADA EN ÁREAS
TERMINALES MEDIANTE SISTEMAS MULTIAGENTE**

Autor: D. JOSÉ MIGUEL CANINO RODRÍGUEZ

Directores:

Dr. D. JUAN BESADA PORTAS

Dr. D. JESÚS GARCÍA HERRERO

Dr. D. LUÍS GÓMEZ DÉNIZ

El Director,

El Codirector,

El Codirector,

El Doctorando,

Las Palmas de Gran Canaria, a 13 de Mayo de 2010

A mi padre

Agradecimientos

El trabajo recogido en este documento es resultado de la aportación de muchas personas a las que me gustaría expresar mi agradecimiento.

En primer lugar, quiero agradecer a los directores de esta Tesis, los profesores Luis Gómez Déniz, Jesús García Herrero y Juan Besada Portas su apoyo durante la realización de la misma.

A Luis Gómez, del que he aprendido mucho, he de agradecerle el tiempo que dedicó a corregir y descifrar sobre todo aquellos primeros artículos farragosos y desorganizados.

A Jesús García y Juan Besada no puedo dejar de agradecerles, además de sus constantes muestras de ánimo, las largas horas de exposiciones y conversaciones en las que, con paciencia infinita, han escuchado mis ideas tan apasionadas como desordenadas y han aportado luz para dar consistencia y coherencia a este trabajo. En esta tarea las apreciaciones del profesor Jesús García sobre los agentes fueron decisivas. Igualmente lo fueron las aportaciones del profesor Juan Besada respecto a las operaciones basadas en trayectoria.

En todos estos años, el apoyo de todo el Grupo de Procesado de Datos y Simulación de la Universidad Politécnica de Madrid ha sido fundamental y sin ellos esta Tesis nunca habría resultado. Del grupo quiero destacar, además de su compromiso y capacidad de trabajo, la calidad humana de sus miembros.

Por ello mi agradecimiento a su director el Dr. José Ramón Casar Corredera, no sólo por abrirme las puertas al Grupo, sino también por su generosa acogida durante estos años. También a todos los demás profesores e investigadores del grupo. A los doctores Gonzalo de Vela y Javier Portillo, a la doctora Ana Bernardos y a Paula Tarrío, así como a otros miembros que también han formado parte del mismo. Entre ellos quisiera mencionar especialmente a Nieves Cristóbal, Ana Bermejo y Andrés Soto.

En este trabajo también ha sido importante la ayuda recibida del grupo de Grupo de Inteligencia Artificial Aplicada de la Universidad Carlos III de Madrid. En particular agradezco a Federico Castanedo su asesoramiento y consejos respecto a la implementación de agentes.

Mi reconocimiento también a Salvador Durá y a Desireé Brito por sus contribuciones

a esta Tesis a través de sus respectivos proyectos de fin de carrera.

Por último, quisiera mencionar el apoyo de mi familia y amigos. Ellos han tenido que soportar casi como un mantra mis continuas excusas de falta de tiempo para compartirlo con ellos. Sin duda la parte más adversa de esta Tesis ha sido renunciar a su compañía. Aún así he sentido su aliento en todo momento. A todos ellos mi sincero agradecimiento. También a los que ya no están.

De manera especial quiero agradecer a Pepi su continuo apoyo durante todo este tiempo. A ella le he quitado no sólo gran parte de nuestro tiempo sino también del suyo para la revisión de los borradores de este documento. De alguna manera, esta Tesis también es suya.

Resumen

Los sistemas y procedimientos que dan soporte al tráfico aéreo actual se han visto cuestionados en las últimas décadas debido a dos factores fundamentales:

- El constante aumento del tráfico aéreo que empieza a desbordar la capacidad de los sistemas actuales.
- La introducción de nuevas tecnologías que mejoran las prestaciones de los vigentes sistemas de Comunicación, Navegación, Vigilancia y Gestión del Tráfico Aéreo y facilitan el tratamiento de la información que éstos proporcionan.

Precisamente, estas nuevas tecnologías han contribuido a que en los últimos años se haya producido una revisión de los esquemas sobre los que se basan los actuales procedimientos para la navegación aérea y el control del tráfico aéreo. Por esta razón, el soporte procedimental del tráfico aéreo actual se encuentra en un periodo de transformación a tres niveles básicos:

- Un primer nivel encargado de definir nuevos escenarios y conceptos operacionales a partir de las posibilidades que ofrecen los nuevos sistemas técnicos. A través de los conceptos operacionales se especifican los roles y los procedimientos de actuación de cada uno de los actores que intervienen en las operaciones de tráfico aéreo: tripulaciones, proveedores de servicios de tráfico aéreo, operadores de las compañías aéreas, etc.
- Un segundo nivel de transformación se refiere al desarrollo de nuevos subsistemas técnicos para llevar a cabo las tareas procedimentales anteriores. Consisten, principalmente, en sistemas de aviónica para la gestión y el control de la navegación de la aeronave y en sistemas de tierra para la gestión y el control del tráfico aéreo.
- En el tercer nivel encuentran cabida los algoritmos y modelos matemáticos que dan soporte a las funcionalidades de los subsistemas anteriores.

La elevada interdependencia entre estos tres niveles implica que, con frecuencia, el diseño y la evaluación preliminar de procedimientos, sistemas y soporte matemático subyacente

no siempre se pueda llevar a cabo de forma independiente. Por eso es necesario desarrollar modelos conceptuales que representen estos nuevos escenarios de tráfico aéreo y que consideren dichas interdependencias. La arquitectura de estos modelos debe ser lo suficientemente modular de manera que sea posible incorporar nuevos procedimientos, sistemas y modelos matemáticos a medida que éstos sean diseñados. También debe ser directamente trasladable a un modelo ejecutable para la simulación analítica destinada a la validación operacional de los elementos anteriores.

Los futuros escenarios de tráfico aéreo se caracterizarán principalmente por una mayor automatización e integración aire-tierra de las operaciones de navegación y control del tráfico aéreo. Con ello se pretende lograr, entre otros objetivos, una mayor autonomía de las aeronaves para seleccionar sus trayectorias óptimas de vuelo. Esta autonomía está a su vez limitada por los objetivos globales del sistema consistente en lograr un flujo de tráfico aéreo seguro y eficiente. Por tanto, *estos escenarios pueden considerarse como sistemas dinámicos complejos de carácter distribuido y constituidos por un conjunto de entidades autónomas*. De esta forma, los modelos conceptuales que los describan deberán especificar los roles y las mutuas interacciones de las entidades que lo componen así como el comportamiento interno de cada una de éstas. En este contexto, la teoría de los sistemas multiagente constituye un paradigma apropiado para modelar el funcionamiento de tales sistemas.

En esta Tesis se propone un modelo conceptual que describe el comportamiento de escenarios de tráfico aéreo y que se ha desarrollado a partir de un análisis orientado a agentes de las propuestas más recientes sobre conceptos operacionales para el futuro. Estos conceptos operacionales plantean:

- Operaciones de tráfico aéreo basadas en trayectorias cuatridimensionales (4D) definidas por la posición tridimensional de la aeronave y el tiempo asociado a dicha posición. Estas trayectorias deben compatibilizar las preferencias de las aeronaves con la eficiencia y seguridad del flujo de tráfico aéreo.
- La accesibilidad y distribución de los datos actualizados sobre recursos y condiciones del espacio aéreo entre todas las entidades que participan en las operaciones de vuelo.
- Una reasignación más distribuida de los roles de las aeronaves y de los servicios de control de tráfico aéreo para lograr sus respectivos objetivos frente al actual esquema de responsabilidades caracterizado por centralizar las funciones de vigilancia y control de tráfico exclusivamente en los sistemas de tierra.

Para este análisis, se ha seleccionado un escenario de operaciones de tráfico aéreo de llegada en Área Terminal. La elección de este escenario está motivada por el hecho de que las operaciones de llegada son particularmente críticas debido a la alta variabilidad de

las condiciones operacionales de los flujos de tráfico de aeronaves que convergen mientras descienden hasta el aeropuerto de llegada. Por tanto los resultados de este análisis pueden extenderse a otras fases del vuelo.

El modelo conceptual propuesto describe las operaciones de tráfico a través de las interacciones y del comportamiento interno de las entidades que constituyen un sistema multiagente. Las interacciones están expresadas en términos de acciones de coordinación entre agentes intencionalmente autónomos que cooperan para incrementar su conocimiento particular del entorno y para lograr sus respectivos objetivos. El comportamiento de los agentes está representado por los procesos internos que llevan a cabo para lograr sus objetivos particulares.

Como parte fundamental de este modelo, se propone un esquema de gestión de procedimientos de navegación y de control de tráfico así como una arquitectura funcional de los sistemas de aire y de tierra requeridos para llevarlos a cabo. Los procedimientos forman parte de las interacciones entre agentes y contienen el conjunto de tareas destinadas a la planificación, ejecución y modificación de las trayectorias de las aeronaves dentro de un determinado intervalo espacio-temporal así como las condiciones operacionales bajo las cuales se desarrollan. Los procesos internos asociados a la ejecución de estas tareas inspiran el diseño interno de los agentes y con ello los sistemas que se precisan para ejecutarlas.

La metodología empleada en el análisis y diseño del modelo propuesto está basada en la metodología *Prometheus* de desarrollo de sistemas multiagente. La idoneidad que presenta esta metodología para resolver nuestro problema se debe, entre otras razones, a que:

- proporciona un alto grado de detalle de las orientaciones prácticas que ofrece para la especificación inicial del sistema a modelar.
- da lugar a modelos organizados en varios niveles de abstracción y en los que se relacionan de manera natural su comportamiento dinámico con sus componentes estructurales.
- la modularidad de la arquitectura interna de los agentes alrededor del concepto de capacidad proporciona una correspondencia directa entre las capacidades de agente y los sistemas funcionales de aeronaves y de tierra para gestionar sus respectivos procedimientos.

Las características anteriores facilitan la incorporación de nuevos procedimientos y funcionalidades de subsistemas con sus correspondientes modelos subyacentes así como su traslado a un modelo ejecutable.

Abstract

Systems and procedures to support the current air traffic are evolving in recent decades due to two main factors:

- The continuous increase of air traffic that begins to exceed the capacity of existing systems.
- The introduction of new technologies which improve the performance of the Communication, Navigation, Surveillance and Air Traffic Management Systems.

From that, three levels of improvement can be identified:

- A first level proposes new scenarios and operational concepts taking into account the possibilities provided by new technical systems. It is necessary to identify and even in some cases, to redefine the standard assigned roles -which have been almost inalterable for the last decades- for crews, air traffic services providers, airlines and so on.
- The second level consists of developing the subsystems to perform the new procedural tasks to be designed, such as avionics systems for managing the aircraft navigation as well as ground systems for air traffic control.
- The third level includes algorithms and mathematical models to provide the required functionalities of previous subsystems.

All the mentioned factors show a high degree of interdependence, which often makes impossible to outline a preliminary design of procedures, support systems and underlying models in an independent manner. Hence, as a first action, it is necessary to develop conceptual models of air traffic scenarios to provide a highly detailed description of these interdependencies.

It is clear that, these models and procedures must be designed following a modular architecture able to easily add new specific models and new functionalities. Besides, it is desired that a prototype executable model can be obtained in order to accomplish with the validation of the proposal.

Future air traffic scenarios will be characterized by an increase of automated and integrated air-ground operations. From that, a greater aircraft autonomy to select a optimal flight path will be achieved. The aircraft is only restricted by the global goals of the air traffic system that must provide safe and efficient air traffic flows. Therefore, these scenarios can be considered as a complex distributed and dynamic scenario constituted by several autonomous entities.

Thus, the conceptual models of these scenarios must specify roles and mutual interactions of the related entities and of the internal behaviour of them. In this context, the multi-agent systems theory seems an appropriate paradigm to design such system.

In this thesis we propose a conceptual model that describes the behaviour of above air traffic scenarios. It has been developed from an agent-oriented analysis of the most recent proposals about operational concepts for the future air traffic. These operational concepts arise:

- Four dimensional trajectory based operations defined by the aircraft position and time. These trajectories must suit the preferences of the aircraft while preserving the efficiency and safety of surrounding air traffic flow.
- Accessibility and distribution of updated data among all entities involved in flight operations.
- A more distributed reallocation of the roles of aircraft and services of air traffic control to achieve their respective goals against the current scheme of responsibilities characterized by a ground-centralized monitoring and air traffic separation activities.

In this analysis, we focused on air traffic operations at the arrival terminal area. The choice of this scenario is motivated by the fact that the operations of arrival are particularly critical due to the high variability of operational conditions of the aircraft traffic flows converging while descending/approaching to the airport. However, the results of this analysis can be extended -attending to the peculiarities- to other phases of flight.

The proposed conceptual model describes the traffic operations through the interactions and the internal behaviour of the entities that ensemble a multi-agent system.

The interactions are expressed in terms of coordination between autonomous agents that intentionally cooperate to increase their particular knowledge of the environment and to attain their respective goals. The agent behaviour is represented by its internal processes to achieve its particular objectives. As a relevant part of this model, we propose a scheme for managing navigation and air traffic control procedures as well as a functional architecture of air and ground systems required to accomplish these procedures.

In our design, air traffic procedures are embedded as interactions between agents. They contain the set of tasks for planning, implementing and updating the aircraft trajectories

within a specific space-time interval and a set of operational conditions. The internal processes associated with executing these tasks inspire the internal design of agents and the systems needed to implement them.

The methodology used in the analysis and design of the proposed model is based on the Prometheus methodology for developing multi-agent systems. The methodology suits well for solving our problem due to:

- the highly detailed guidelines for the initial system specification,
- it results in models organized in several levels of abstraction, accounting naturally for the interdependence between the dynamic behavior of their structural components,
- the modularity of the agent's internal architecture around the concept of capability provides a direct correspondence between capabilities and functionalities of airborne and ground systems.

The achieved model also allows a latter incorporation of new procedures and functionalities of subsystems and their corresponding underlying models. Besides, the conceptual model provides a basis for executable models for analytical simulation in order to carry out the evaluation and the operational validation of the above procedures and systems.

Estructura del documento

Los contenidos presentados en esta Tesis están estructurados en seis capítulos.

En el *capítulo 1* se describe el estado actual de las investigaciones orientadas al desarrollo de nuevos conceptos operacionales y sistemas para el tráfico aéreo del futuro. A partir de esta descripción se identifican los aspectos críticos que requieren una solución a través del desarrollo de modelos conceptuales para la simulación analítica. Posteriormente se consideran las soluciones que ofrece el estado actual de la teoría de los sistemas multi-agente a los problemas del modelado de sistemas distribuidos compuestos por entidades autónomas y se presentan las aportaciones más significativas de esta teoría a los problemas del tráfico aéreo. En este contexto se establece, finalmente, el ámbito y los objetivos de esta Tesis.

En el *capítulo 2* se analizan los modelos matemáticos y algoritmos que sustentan las funcionalidades de los sistemas de aviónica y de tierra requeridos en las operaciones basadas en trayectoria y que, por tanto, forman parte del modelo a desarrollar. Este análisis tiene una doble finalidad:

1. Identificar los datos utilizados y/o generados por los modelos anteriores en los procesos de generación y tratamiento de trayectorias 4D.
2. Identificar aquellos modelos y sistemas que aún no han sido suficientemente desarrollados y proponer diseños alternativos. En particular se propone un modelo para los sistemas de guiado y control de trayectorias 4D.

Posteriormente en los *capítulos 3, 4 y 5* se presentan las distintas perspectivas del modelo conceptual propuesto en esta Tesis para describir las operaciones de tráfico aéreo de llegada. Este modelo es considerado como un sistema multiagente constituido por las distintas entidades proactivas que participan en dicho escenario de operaciones.

En el *capítulo 3* se establecen las especificaciones de este sistema multiagente y se diseña su arquitectura. Las especificaciones se expresan a través de un conjunto de objetivos que se definen mediante un proceso de refinado iterativo que, a su vez, se basa en la propuesta de un conjunto organizado de diversos escenarios de casos de uso. Estos escenarios se han desarrollado a partir de las pautas generales recogidas en los conceptos

operacionales DAG-TM y TBO descritos en el *capítulo 1*. También se identifican en este capítulo 3 las funcionalidades requeridas por el sistema para lograr los objetivos anteriores. La especificación de dichas funcionalidades (es decir, datos de entrada y salida así como procesos internos) está basada en el análisis y propuestas sobre los modelos matemáticos y algoritmos llevado a cabo en el *capítulo 2*. Finalmente, se propone un diseño de arquitectura del sistema en el que se identifican los agentes implicados en las operaciones de tráfico aéreo y sus correspondientes interacciones.

Posteriormente en el *capítulo 4* se diseñan los protocolos que describen las principales interacciones entre agentes aeronaves y ATC en los escenarios de tráfico de llegada. Estos protocolos recogen la negociación aire-tierra de trayectorias 4D de llegada y la negociación aire-aire de trayectorias asignadas previamente a las aeronaves. A partir de los protocolos anteriores se detallan los procesos internos llevados a cabo por los agentes durante su ejecución. Los protocolos y sus procesos asociados ofrecen así una adecuada descripción de los procedimientos de navegación y de control de tráfico aéreo.

En el *capítulo 5* se desarrolla el diseño interno de los agentes críticos del modelo: el agente aeronave y el agente control de tráfico aéreo. El diseño de los agentes describe su comportamiento dinámico (a través de los procesos derivados de los protocolos de interacción entre agentes) y su estructura interna (a través de una arquitectura de capacidades). La arquitectura interna de los agentes constituye un modelo detallado de la arquitectura funcional de los sistemas de aviónica y de ATC para operaciones TBO. Asimismo los elementos que forman parte del diseño de los agentes constituyen aquella parte del modelo conceptual que es trasladable a un modelo ejecutable para la simulación y la validación de conceptos operacionales y sistemas.

Finalmente en el *capítulo 6* se recogen las conclusiones generales de esta Tesis y las principales líneas futuras de investigación abiertas a partir de la misma.

Índice

Resumen	IV
Abstrac	VII
Estructura del documento	XI
Índices	XV
Acrónimos	XXVII
1. Introducción y motivación	1
1.1. El sistema de gestión de tránsito aéreo: presente y futuro	2
1.1.1. El actual sistema de gestión del tránsito aéreo	2
1.1.2. Soporte técnico para el tráfico aéreo	6
1.1.2.1. Limitaciones de los sistemas convencionales	7
1.1.2.2. Sistemas CNS/ATM: ventajas y potencialidades	8
1.1.3. Conceptos operacionales basados en el soporte CNS/ATM	11
1.1.3.1. Antecedentes: hacia la automatización del ATC en Áreas Terminales	11
1.1.3.2. Los nuevos conceptos operacionales	13
1.1.4. Subsistemas para los nuevos conceptos operacionales	19
1.1.5. Modelos y algoritmos matemáticos	21
1.1.5.1. Modelos para la predicción de trayectoria	22
1.1.5.2. Algoritmos para la detección y resolución de conflictos . . .	23
1.1.5.3. Algoritmos para la planificación de secuencias de llegada de aeronave	24
1.1.5.4. Modelos de guiado y control 4D	25
1.1.6. Programas y proyectos I+D	25
1.1.7. Aspectos no resueltos: el desarrollo de procedimientos	27

ÍNDICE

1.2. Diseño de procedimientos y subsistemas: modelado basado en sistemas multiagente	27
1.2.1. Agentes y sistemas multiagente	29
1.2.2. Interacción y coordinación entre agentes	31
1.2.2.1. Mecanismos de coordinación	33
1.2.2.2. Toma de decisiones de coordinación	34
1.2.3. Mecanismos para alcanzar acuerdos: la negociación	36
1.2.3.1. Negociación basada en la Teoría de Juegos	38
1.2.3.2. Negociación basada en la argumentación	41
1.2.3.3. Protocolos de negociación	42
1.2.4. Comunicación y lenguajes de comunicación	43
1.2.5. Arquitectura interna de los agentes	45
1.2.6. Metodologías y herramientas para el análisis y diseño de SMA . . .	46
1.2.6.1. Metodología INGENIAS	48
1.2.6.2. Metodología Prometheus	49
1.2.6.3. Herramientas para la implementación de SMA	52
1.3. Aplicaciones de las técnicas orientadas a agentes al análisis y modelado del futuro ATM	54
1.3.1. Análisis de esquemas de negociación en escenarios de tráfico aéreo .	55
1.3.2. Sistemas para operaciones autónomas en cabina.	59
1.3.3. Sistemas de simulación para el análisis de conceptos avanzados de tráfico aéreo	60
1.3.4. Análisis de las aplicaciones desarrolladas: limitaciones actuales . . .	62
1.4. Ámbito y objetivos de esta Tesis	63
2. Modelos y algoritmos matemáticos para operaciones basadas en trayectoria: análisis y nuevas propuestas	67
2.1. Modelos para la predicción de trayectoria	68
2.1.1. Modelo dinámico de aeronave	69
2.1.2. Modelo de atmósfera	71
2.1.3. Modelo de rendimiento de aeronave	73
2.1.4. Intenciones de aeronave	74
2.1.4.1. Ruta del plan de vuelo	76
2.1.4.2. Velocidades operacionales	76
2.1.5. Sistema de control de vuelo	78
2.1.5.1. Estados discretos para la transformación del modelo de intenciones	79
2.1.5.2. Estados discretos para fijar el vector de control	83

2.1.5.3.	Cálculo del vector de control	85
2.2.	Síntesis de trayectoria bajo restricciones	88
2.2.1.	Métricas para evaluar el coste de trayectorias	90
2.2.2.	Síntesis de trayectorias óptimas	91
2.2.2.1.	Cálculo de sendas de vuelo óptimas sujetas a restricciones espaciales	93
2.2.2.2.	Cálculo de trayectorias sujetas a restricciones temporales	94
2.3.	Algoritmos para la detección de conflictos	96
2.3.1.	Clasificación	96
2.3.2.	Detección de conflictos entre trayectorias 4D	97
2.4.	Algoritmos para la resolución de conflictos	98
2.4.1.	Clasificación	99
2.4.2.	Gestión de conflictos entre múltiples aeronaves	100
2.4.3.	Generación automática de soluciones para conflictos entre trayecto- rias 4D	103
2.5.	Algoritmos para la secuenciación de llegadas de aeronaves	105
2.6.	Propuesta de modelo para guiado y control 4D	107
2.6.1.	Arquitectura general	109
2.6.2.	Guiado longitudinal	112
2.6.2.1.	Corrección de desviación longitudinal mediante cambios de velocidad	113
2.6.2.2.	Corrección de la desviación longitudinal mediante desviación lateral	114
2.6.3.	Guiado vertical	116
2.6.3.1.	Corrección de desviación vertical mediante desviación la- teral	117
2.6.4.	Ejemplo	118
2.7.	Interoperabilidad de sistemas y datos de trayectoria	122
2.7.1.	Datos de trayectoria	122
2.7.2.	Lenguaje de alto nivel	123
2.8.	Conclusiones	124

**3. Modelado orientado a agentes del escenario de tráfico de llegada: especi-
ficaciones y arquitectura del sistema** **127**

3.1.	Especificación del sistema	130
3.1.1.	Requisitos	130
3.1.2.	Escenarios	132
3.1.2.1.	Escenario gestión de aeronave	134

4.2.1.	Escenario operacional	200
4.2.1.1.	Parámetros asociados al objeto de la negociación	202
4.2.2.	Roles de aeronaves y reglas de encuentro	203
4.2.3.	Protocolo de comunicaciones	205
4.2.4.	Procesos	206
4.2.5.	Ejemplo	210
4.3.	Diseño de procedimientos a partir de protocolos y procesos: estado de procedimientos	213
4.4.	Conclusiones	215
5.	Modelado de los agentes críticos: agente Aeronave y agente ATC	219
5.1.	Agente Aeronave	221
5.1.1.	Arquitectura	221
5.1.2.	Descripción de las capacidades	224
5.1.2.1.	Gestión de información de entorno de aeronave	224
5.1.2.2.	Gestión de alarmas de sistemas de aeronaves	225
5.1.2.3.	Detección y resolución de conflictos a bordo	225
5.1.2.4.	Gestión de contingencias a bordo	228
5.1.2.5.	Gestión de procedimientos de navegación	229
5.1.2.6.	Seguimiento de Trayectorias	233
5.2.	Agente ATC	234
5.2.1.	Arquitectura	234
5.2.2.	Descripción de las capacidades	236
5.2.2.1.	Gestión de información de entorno ATC	236
5.2.2.2.	Detección y resolución de conflictos de tráfico	238
5.2.2.3.	Monitorización de tráfico	239
5.2.2.4.	Gestión de contingencias de tráfico	239
5.2.2.5.	Gestión de procedimientos ATC	240
5.3.	Arquitectura de agentes y arquitectura funcional de los sistemas de cabina y de ATC para operaciones TBO	243
5.3.1.	Arquitectura funcional de los sistemas de aviónica	244
5.3.2.	Arquitectura funcional de los sistemas de ATC	245
5.4.	Pautas para la obtención de un modelo ejecutable	248
5.4.1.	Implementación en plataforma JACK	250
5.4.2.	Implementación en plataforma JADE	251
5.5.	Conclusiones	253

ÍNDICE

6. Conclusiones generales y líneas futuras de investigación	255
6.1. Conclusiones generales	255
6.2. Líneas futuras de investigación	260
A. Verificación de integridad y consistencia del modelo	263
A.1. Integridad y consistencia de las especificaciones	263
A.2. Integridad y consistencia de la arquitectura	264
A.3. Integridad y consistencia del diseño de los agentes	266
B. Pautas para la implementación en plataforma JACK	269
Bibliografía	278

Índice de figuras

1.1.	Flujo de información entre el ATFM y el ATC	3
1.2.	AFTM y ATC	5
1.3.	Flujo de información durante el proceso de Control de Tráfico Aéreo	6
1.4.	Cronograma de implantación del Sistema CNS/ATM	8
1.5.	Secuencia de las etapas del proceso DAG-TM CE-11	17
1.6.	Prototipo de pantalla CDTI	21
1.7.	Interacciones en un sistema multiagente	32
1.8.	Elementos conceptuales de un agente negociador clásico	41
1.9.	Elementos conceptuales de un agente argumentador	42
1.10.	Etapas de la metodología Prometheus	50
1.11.	Ámbito de la Tesis dentro del marco metodológico para la implementación de futuros conceptos operacionales	65
2.1.	Entradas y elementos de un sintetizador de trayectoria	69
2.2.	Fuerzas que actúan sobre la aeronave	70
2.3.	Ruta del plan de vuelo	77
2.4.	Sistema de control de vuelo	79
2.5.	Máquina de estados finitos para el modo <i>FL</i>	80
2.6.	Máquina de estados finitos para el modo <i>SM</i>	81
2.7.	Geometría del viraje de aeronave en presencia de viento para maniobra <i>fly-past</i>	82
2.8.	Maquina de estados finitos para la variable <i>WI</i>	82
2.9.	Máquina de estados finitos para definir el modo de aceleración	83
2.10.	Máquina de estados finitos para el modo <i>AM</i>	84
2.11.	Máquina de estados finitos para la fase de descenso	85
2.12.	Geometría para el cálculo de la desviación de ruta y de rumbo	86
2.13.	Coste operacional en función del tiempo óptimo de llegada	91
2.14.	Síntesis de trayectorias preferentes de usuario	92
2.15.	Generación de <i>N</i> trayectorias óptimas libres de conflicto	92

ÍNDICE DE FIGURAS

2.16. Optimización basada en expansión de espacio aéreo estructurado (izquierda) y basada en intervalo de tiempo (derecho) [Hu et al. 2004]	93
2.17. Esquema propuesto para la síntesis de trayectorias 4D bajo restricciones temporales	95
2.18. Diagrama de flujo de algoritmo de resolución	104
2.19. Tolerancias en el seguimiento de trayectorias 4D	108
2.20. Sistema dinámico con capacidad de control 4D	108
2.21. Arquitectura general del modelo de control 4D	111
2.22. Cálculo de la desviación longitudinal	112
2.23. Estado discreto para el control de la velocidad	113
2.24. Esquema para el cálculo de la nueva TAS_f	113
2.25. Desviación lateral para corrección longitudinal	115
2.26. Múltiple desviación lateral para corrección longitudinal	116
2.27. Máquina de estados finitos para el estado $dhTrack$	116
2.28. Desviación lateral para corrección vertical	118
2.29. Perfil de descenso	120
2.30. Error longitudinal y vertical para componentes de viento frontal y de cola	121
2.31. Perfil de velocidades para: (a) trayectoria prevista con viento nulo, (b) trayectoria real con componente frontal de 40 <i>kts</i>	121
3.1. Fases de la metodología Prometheus	128
3.2. Entidades del sistema de tráfico aéreo	130
3.3. Parámetros del entorno operacional	131
3.4. Escenarios	135
3.5. Objetivos de las Aeronaves	142
3.6. Objetivos del Control de Tráfico Aéreo	144
3.7. Objetivos del Control de Operaciones de Compañía	145
3.8. Objetivos del Proveedor de Recursos de Espacio Aéreo	146
3.9. Objetivos del Proveedor de Servicios de Información Meteorológica	147
3.10. Diagrama de funcionalidades asociadas a las aeronaves	151
3.11. Notación empleada en el diagrama de arquitectura del sistema	157
3.12. Arquitectura del sistema	161
4.1. Carta <i>Arrival RNAV</i>	170
4.2. Escenario operacional	170
4.3. Sub-regiones del área de acuerdos	172
4.4. Protocolo de comunicación aire-tierra	175
4.5. Notación empleada en la especificación de procesos	178

4.6. Diagrama de procesos y estados del agente ATC	180
4.7. Evaluación de solicitudes de aeronaves	182
4.8. Evaluación de propuestas de aeronaves	182
4.9. Evaluación de las trayectorias aceptadas y rechazadas por las aeronaves . .	183
4.10. Diagrama general de procesos en al agente Aeronave	185
4.11. Evaluación de propuesta de ATC (I)	186
4.12. Evaluación de propuesta de ATC (II)	186
4.13. Tiempos medios de negociación de para $i_{a,i} \in [0.1,0.9]$	191
4.14. Tiempo de negociación medio en función de los índices de aceptación de los evaluadores del ATC	192
4.15. Tiempo de negociación medio en función de los índices de aceptación de los evaluadores de aeronave.	193
4.16. Tiempo medio de negociación frente a índices de aceptación de ATC y de aeronaves ($i_{a,0} = i_{a,2}$ y $i_{a,1} = i_{a,3}$)	194
4.17. Tiempos máximos de negociación: $i_{a,0} = i_{a,1}$; $i_{a,2} = i_{a,3}$	194
4.18. Tiempo medio de negociación en función del índice de fallos	195
4.19. Flujo acumulado de mensajes para $i_{a0} = i_{a2} = 0.05$, $i_{a1} = 0.2$, $i_{a3} = 0.9$. .	197
4.20. Flujo acumulado de mensajes para $i_{a0} = 0.7$, $i_{a2} = 0.6$, $i_{a1} = 0.95$, $i_{a3} = 0.9$. .	198
4.21. Histogramas de los puntos de salida de negociación correspondientes a los casos representados en la figura 4.19 (izquierda) y figura 4.20 (derecha). . .	198
4.22. Flujo instantáneo de mensajes de aeronaves y de ATC correspondiente a las figuras 4.19 (izquierda) y 4.20 (derecha)	199
4.23. Rutas de llegada y grupos de negociación	201
4.24. Convergencia de tráfico aéreo	201
4.25. Identificación de <i>respondedores</i> iniciales	204
4.26. Protocolo de comunicación aire-aire	205
4.27. Diagrama de procesos del agente aeronave en negociaciones aire-aire. . . .	207
4.28. Escenario de convergencia de aeronaves	210
4.29. Estados de procedimiento	214
5.1. Notación empleada para representar los elementos diagrama de agente . . .	220
5.2. Capacidades del agente aeronave	222
5.3. Capacidad gestión de información de entorno	225
5.4. Capacidad detección y resolución de conflictos	226
5.5. Capacidades: (a) Detección de conflicto y (b) Solución inicial a conflicto .	227
5.6. Capacidad gestión de contingencias a bordo	229
5.7. Capacidad gestión de procedimientos de navegación	231
5.8. Capacidad planificación de vuelo	232

ÍNDICE DE FIGURAS

5.9. Capacidad ejecución de acciones de procedimiento	232
5.10. Capacidad planificación siguiente procedimiento	232
5.11. Capacidad replanificación actual procedimiento	233
5.12. Capacidad seguimiento de trayectoria	234
5.13. Capacidades del agente ATC	235
5.14. Capacidad gestión de información de Área Terminal	238
5.15. Capacidad detección y resolución de conflictos de tráfico	239
5.16. Capacidad monitorización tráfico	240
5.17. Capacidad gestión de procedimientos ATC	242
5.18. Capacidad ejecución procedimiento ATC	243
5.19. Capacidad separación estratégica	243
5.20. Arquitectura funcional de los sistemas de cabina para TBO	246
5.21. Arquitectura funcional de los sistemas de ATC para TBO	248
5.22. Comportamientos JADE	252
5.23. Arquitectura de comportamientos JADE del agente aeronave	252

Índice de tablas

1.1. Elementos conceptuales de la propuesta DAG-TM	16
1.2. Lenguajes de comunicación para ABN y no-ABN	44
1.3. Etapas de modelado INGENIAS	49
2.1. Especificación de velocidades del modelo de intenciones para una determi- nada fase del vuelo	77
2.2. Velocidades CAS/Mach para reactores y turbohélice en la fase de descenso	78
2.3. Ajuste del factor de reparto de energía	88
4.1. Puntos de salida del protocolo de negociación	177
4.2. Tiempos de negociación y puntos de salida del protocolo para diferentes valores de los índices de aceptación	191
4.3. Puntos de salida del protocolo e índices de aceptación	192
4.4. Datos de aeronaves	211

ÍNDICE DE TABLAS

Acrónimos

ABAS Aircraft Based Augmentation System

ACAS Airborne Collision Avoidance System

ADS Automatic Dependent Surveillance System

ADS-B ADS-Broadcast

ADS-C ADS-Contract

AFTN Aeronautical Fixed Telecommunication Network

AIDL Aircraft Intent Description Languaje

AOC Airline Operator Center

AP/AT Auto-Pilot/Auto-Throthle

APM Aircraft Performance Model

ASAS Airborne Separation Assurance System

ATC Air Traffic Control

ATFM Air Traffic Flow Management

ATM Air Traffic Management

ATSP Air Traffic Service Provider

BADA Base of Aircraft DAta

BDI Belief, Desire, Intention

CAS Calibrated Air Speed

CDA Continuos Descent Arrival/Approach

ACRÓNIMOS

CDTI Cockpit Display of Traffic Information

CE Concept Element

CNS/ATM Communication, Navigation, Surveillance/Air Traffic Management

CTAS Center-TRACON Automation System

DAG-TM Distributed Air-Ground Traffic Management

DRC Detección y Resolución de Conflictos

ETA Estimated Time of Arrival

FIPA-ACL Foundation of Intelligent Physical Agents - Agent Communication Language

FMS Flight Management System

GBAS Ground Based Augmentation System

GPWS Ground Proximity Warning System

HITL Human-In-The-Loop

IFR Instrumental Flight Rules

ILS Instrumental Landing System

INS Inertial Navigation System

JADE Java Agent Development Environment

KQML Knowledge Query and Manipulation Language

MLS Microwave Landing System

ND Navigation Display

NextGen Next Generation Air Transportation System

PDT Prometheus Design Tool

PHARE Program for Harmonised ATM Research in Europe

PMM Point Mass Model

PRS Procedural Reasoning System

RNAV aRea NAVigation

RTA Required Time of Arrival

RTCA Radio Technical Commission for Aeronautics

SBAS Satellite Based Augmentation System

SESAR Single European Sky ATM Research

SMA Sistema Multi-Agente

STA Scheduled Time of Arrival

TAS True Air Speed

TCAS Traffic Collision Avoidance System

TIS-B Traffic Information Service-Broadcast

TOD Top Of Descent

TPU Trayectoria Preferente de Usuario

TRACON Terminal Radar Approach Control

WAM Wide Area Multilateration

ACRÓNIMOS

Capítulo 1

Introducción y motivación

El sistema de *Gestión de Tránsito Aéreo (Air Traffic Management o ATM)*, está constituido por el conjunto de recursos técnicos y humanos encargados de llevar a cabo actividades cooperativas “*encaminadas a planificar y operar el flujo de tráfico de aeronaves, de forma que se garantice la seguridad, orden y fluidez de todos los vuelos al mismo tiempo que se consigue, que en cualquier punto del espacio aéreo la totalidad del tráfico aéreo sea compatible con la capacidad del sistema de Control de Tráfico Aéreo*” [OACI 2007].

La capacidad limitada del actual sistema ATM para hacer frente a las futuras demandas de tráfico aéreo, junto con las posibilidades que ofrecen las nuevas tecnologías, han motivado un replanteamiento conceptual del soporte procedimental y técnico de dicho sistema que se ha iniciado a mediados de los años 90 y que previsiblemente alcanzará plena operatividad a partir del año 2020 [ICAO 2007, OACI 2005].

La principal dificultad para implantar un nuevo sistema ATM se debe a que éste combina componentes humanos y técnicos esenciales, de modo que no es trivial por razones de seguridad compatibilizar dos concepciones diferentes de ATM mientras se produce la referida transición. Por otra parte, existe una elevada interdependencia entre procedimientos de operación, subsistemas para la operación y modelos matemáticos que los soportan. De ahí que no siempre es factible el desarrollo e implantación puntual y aislada de cualquiera de los elementos que forman parte del sistema ATM [Quon 2006].

Por todo ello, las autoridades encargadas de potenciar las investigaciones que den soporte a la transformación del futuro ATM siguen una metodología convencionalmente extendida que contempla varias fases [RTO 2001]. Una de estas fases consiste en el diseño de modelos que describan los aspectos dinámicos del comportamiento del sistema ATM a partir de una especificación genérica de los requisitos exigibles a éste. Estos modelos están destinados a servir de soporte para la simulación analítica (tanto de eventos discretos como continua) sobre la cual evaluar nuevos procedimientos, funcionalidades y modelos matemáticos para dicho ATM. Dentro de estos modelos son particularmente

críticos aquellos que representan escenarios de operaciones de vuelo en los que existe una alta variabilidad de las condiciones del entorno. Este es el caso de las operaciones de llegada de aeronaves en áreas terminales caracterizadas por los cambios de velocidad de las aeronaves a medida que descienden y convergen hacia la pista de aterrizaje.

Un escenario de tráfico aéreo como el descrito anteriormente se manifiesta como un sistema distribuido complejo cuyo comportamiento es resultado de la conducta combinada de diversas entidades autónomas (aeronaves, controles de tráfico aéreo, compañías aéreas, etc.) que coexisten en un determinado entorno. En este escenario, cada aeronave dispondrá de medios adecuados para predecir e informar a las demás entidades sobre sus trayectorias de vuelo óptimas desde el punto de vista del coste operacional. A su vez, los objetivos individuales de cada aeronave están condicionadas por los objetivos globales del sistema de tráfico, el cual debe garantizar la eficiencia y seguridad del tráfico.

El escenario descrito anteriormente puede ser analizado y modelado adecuadamente a través de las metodologías y herramientas que ofrece la *teoría de los sistemas multiagente*. Este capítulo tiene por objeto poner de manifiesto la idoneidad de este nuevo paradigma de la inteligencia artificial para modelar los referidos escenarios.

Para ello se presenta en primer lugar un estudio del estado del arte de las propuestas sobre nuevos conceptos operacionales, sistemas funcionales y modelos matemáticos para las operaciones de tráfico del futuro. Posteriormente se describen los principales conceptos de la teoría de los sistemas multiagente aplicables al diseño propuesto en esta Tesis y se presentan las aplicaciones más recientes de dicha teoría en el ámbito del tráfico aéreo. A partir del análisis anterior, este capítulo finaliza con la definición del ámbito de investigación del esta Tesis y los objetivos de la misma.

1.1. El sistema de gestión de tránsito aéreo: presente y futuro

1.1.1. El actual sistema de gestión del tránsito aéreo

Las actividades desarrolladas por el sistema de tráfico aéreo actual están esquematizadas en la figura 1.1. Estas actividades se clasifican en función del horizonte temporal en el que se llevan a cabo en dos categorías [OACI 2007] : (i) Actividades de *planificación del flujo de tráfico aéreo* previas al vuelo y (ii) Actividades de *control del tráfico aéreo* realizadas durante la operación del vuelo.

Las actividades de planificación de flujo de tráfico aéreo las lleva a cabo el *sistema de gestión de afluencia de tránsito aéreo (Air Traffic Flow Management o ATFM)*¹. Este

¹El sistema ATFM Europeo recibe el nombre de CFMU (Central Flow Management Unit).

1.1. El sistema de gestión de tránsito aéreo: presente y futuro

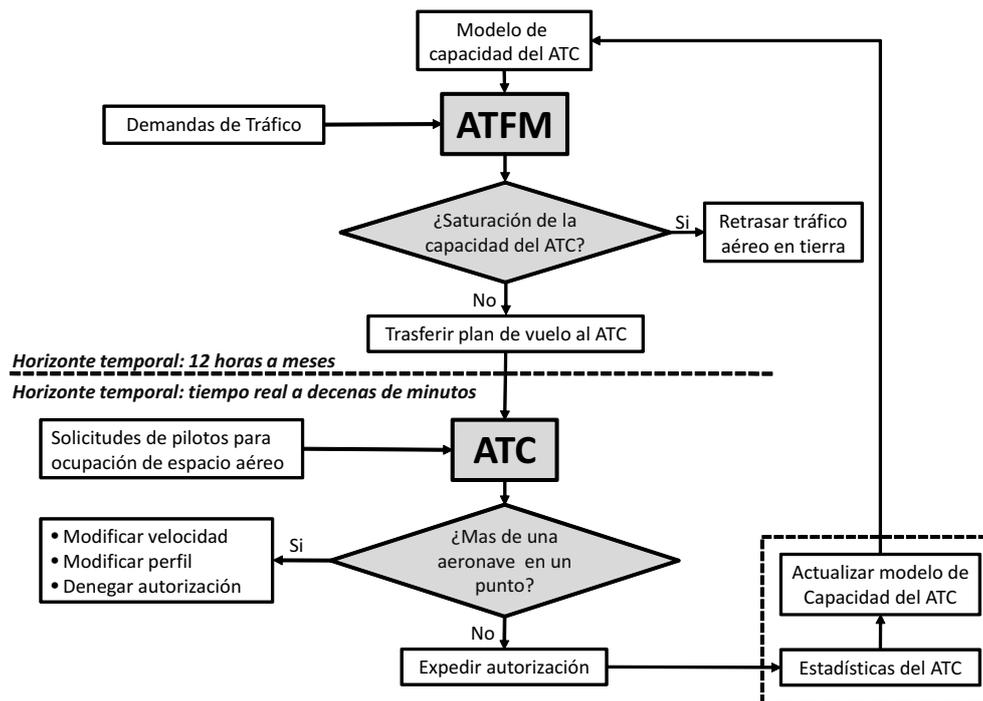


Figura 1.1: Flujo de información entre el ATFM y el ATC

servicio planifica la demanda de tráfico aéreo adecuándolo a las capacidades de la densidad de flujo de tráfico admisible en cada una de las diferentes regiones de espacio aéreo que sobrevolará cada aeronave. Sus actividades se inician desde varios meses antes de que los usuarios (compañías aéreas, tráfico aéreo militar y tráfico aéreo general) tengan previsto realizar sus respectivos vuelos. En caso de que no se sobrepasen las capacidades, el vuelo será autorizado para la fecha y hora solicitadas.

El servicio de *control del tráfico aéreo* (*Air Traffic Control* o *ATC*) se encarga de proporcionar fluidez y seguridad al tráfico aéreo suministrando la adecuada separación de las aeronaves en vuelo con respecto a otras aeronaves u obstáculos. Su actividad comienza instantes antes del inicio del vuelo cuando el ATC recibe solicitudes de los tripulantes para realizar el vuelo autorizado previamente. Durante la ejecución del vuelo el ATC tiene la responsabilidad de evitar que las trayectorias de las aeronaves entren en conflicto. Para ello transmitirá instrucciones a las aeronaves para que éstas modifiquen convenientemente la velocidad y/o el perfil de vuelo. También podrá denegar la autorización de aquellas solicitudes realizadas por las aeronaves que condicionen la eficiencia o seguridad del tráfico.

Por otro lado, durante la ejecución de los vuelos el ATFM se limita a recoger nuevos datos en tiempo real de la evolución del tráfico. Con los datos proporcionados por el ATC, el ATFM elabora estadísticas para planificar el flujo e imponer, si fuera necesario, restricciones temporales a los nuevos planes de vuelo presentados. Una vez realizada la planificación, los datos con los vuelos previstos son distribuidos entre las respectivas de-

1. Introducción y motivación

pendencias ATC. Además, los vuelos ya ejecutados constituyen un historial a partir del cual elaborar estadísticas para actualizar el modelo de capacidad del ATC utilizado en las tareas de planificación del ATFM².

Para llevar a cabo las tareas de control ATC, el espacio aéreo se divide en un conjunto de regiones que se encuentran organizadas en dos niveles. En un primer nivel, el espacio aéreo es dividido en distintas zonas en las que se garantiza el suministro de control de tráfico aéreo [OACI 2003]: zona de aeropuerto, áreas terminales y áreas de ruta de baja y alta altitud en las que se garantiza el servicio de control de tráfico. En un segundo nivel, y para facilitar en la práctica dicho servicio de control de tráfico aéreo, cada una de las áreas anteriores se subdivide en regiones de volumen más reducido denominados sectores ATC. Las tareas de control de tráfico en cada sector están asignadas a una pareja de controladores aéreos cuyo cometido consiste en: (i) *planificar estratégicamente* el tráfico en vuelo dirigiéndolo a lo largo de rutas preestablecidas para lograr la fluidez requerida en el sector y/o sectores adyacentes, (ii) *monitorizar* la evolución de dicho tráfico estableciendo *acciones tácticas* específicas para mantener las correspondientes distancias de seguridad entre aeronaves y entre éstas y otros obstáculos.

Tanto las acciones estratégicas como tácticas de los controladores requieren una comunicación permanente tierra-aire (para la coordinación ATC-aeronave) y tierra-tierra (para la coordinación entre sectores ATC adyacentes) [OACI 2006].

En la figura 1.2 se representan las responsabilidades asignadas a las distintas dependencias que prestan servicios ATC en función de las fases del vuelo. Para simplificar este esquema se han omitido las tareas de control de tráfico en las fases de despegue y aterrizaje de aeronaves así como su rodadura en tierra. Las dependencias ATC de salida se encargan del control del tráfico durante el ascenso inicial del vuelo. Posteriormente en ruta el vuelo es controlado por distintas dependencias ATC, hasta que la aeronave alcanza el área terminal de llegada donde es controlado por el ATC de llegadas. Cada una de las dependencias citadas pueden estar a su vez sectorizadas en los términos descritos anteriormente.

Centrándonos en el ATC de llegadas, cabe señalar que su responsabilidad principal consiste en lograr un uso óptimo de la capacidad de pista y adecuarlo al descenso, también óptimo, de las aeronaves (básicamente evitando esperas durante dicho descenso)

²La capacidad de cada área o sector viene determinada como el número máximo de aeronaves que pueden ser atendidas en dicha zona en un periodo determinado y bajo unas condiciones dadas. Dichas condiciones están determinadas principalmente por los recursos técnicos y humanos disponibles para llevar a cabo las funciones de monitorización y control. En [Janic 2000] se describen diversos modelos matemáticos para determinar la capacidad particular de cada una de las partes del espacio aéreo controlado (áreas terminales, rutas a nivel de segmento y de sector). Algunos de estos modelos incorporan métricas que consideran el factor humano (por ejemplo la carga de trabajo de los controladores) para medir la capacidad del espacio aéreo.

[OACI 2003]. Como ya se ha comentado, se trata de una de las tareas más críticas del tráfico aéreo debido a sus características específicas, en la que distintos tipos de aeronaves descienden para converger a la vez que disminuyen sus respectivas velocidades. La falta de herramientas que proporcionen información precisa de la previsible evolución espacio temporal de la posición de las aeronaves dificultan las tareas de planificación o control estratégico de llegadas obligando a los controladores a realizar frecuentes acciones tácticas en las que solicitan a las aeronaves que modifiquen sus parámetros de navegación. Esta alta componente de control táctico, frente al deseable control estratégico, hace particularmente complejo el desarrollo de herramientas de ayuda en la toma de decisión y para la automatización de este tipo de tareas.

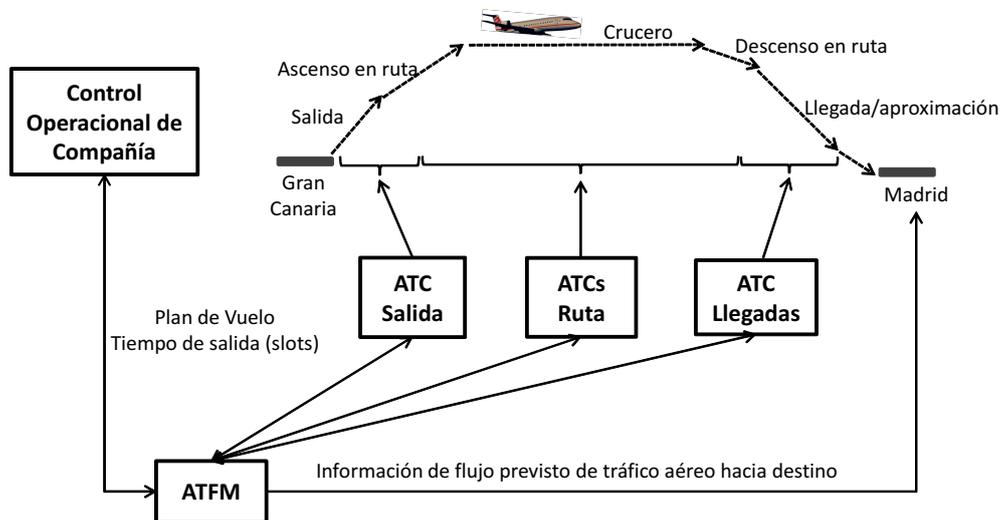


Figura 1.2: AFTM y ATC

La complejidad del sistema de control de tráfico aéreo actual se pone de manifiesto en la figura 1.3, donde se muestran distintas dependencias ATC sectorizadas [OACI 2003]. Comenzando por la parte inferior de la figura se representa la dependencia ATC de torre (TWR) encargada fundamentalmente de las operaciones de despegue y aterrizaje. A su vez, las dependencias ATC de salidas y llegadas (principalmente el control de Aproximación o APP), así como las de ruta (Centros de Control de Área o ACC) también se muestran sectorizadas. Entre todos estos agentes se produce el siguiente flujo de información [OACI 2006, OACI 2006a]: (i) transferencia de datos de planes de vuelo previsto desde el ATFM a las dependencias ATC, (ii) información desde ATC a ATFM sobre datos de planes actualizados, (iii) mensajes de coordinación y transferencia de tráfico entre sectores y/o dependencias ATC, (iv) datos del flujo de tráfico aéreo proporcionado mediante datos radar, (v) comunicaciones aire-tierra con la dependencia ATC responsable del área o sector en la cual se encuentre la aeronave en cada instante.

1. Introducción y motivación

Como se aprecia, en cada uno de los nodos de flujo de información se llevan a cabo procesos de toma de decisión en los que intervienen de manera directa los pilotos y controladores. Estas decisiones y las acciones derivadas de las mismas se realizan de acuerdo a un conjunto de reglas predefinidas y a los datos disponibles en cada instante sobre las condiciones de vuelo y del tráfico aéreo.

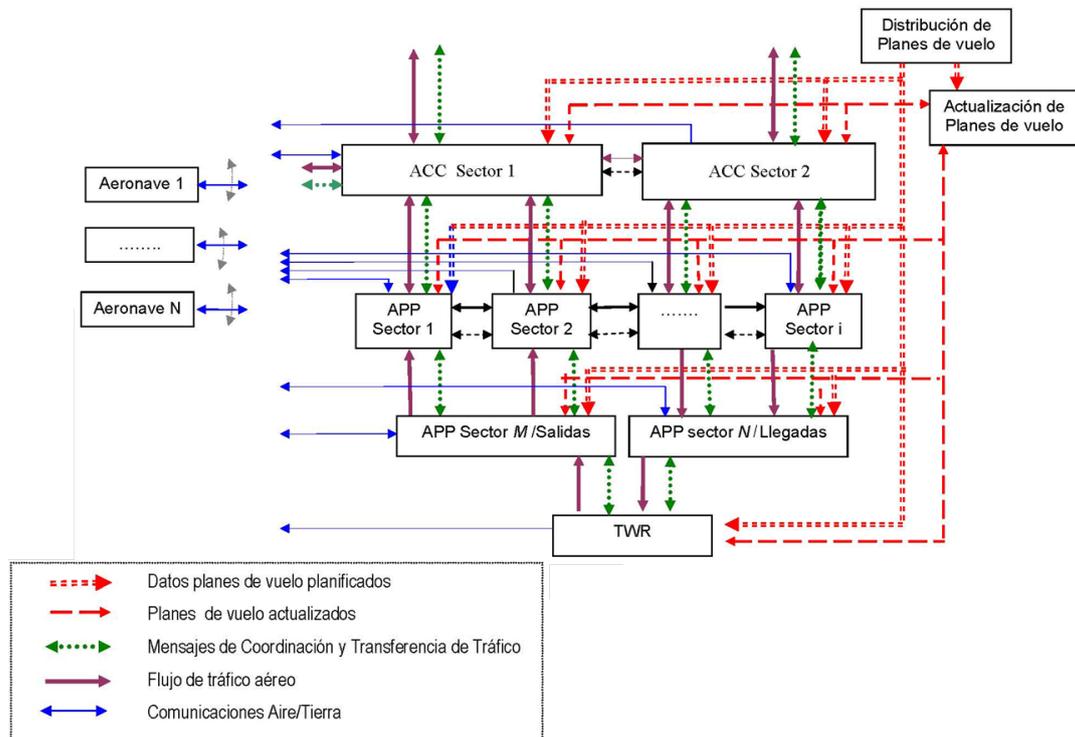


Figura 1.3: Flujo de información durante el proceso de Control de Tráfico Aéreo

1.1.2. Soporte técnico para el tráfico aéreo

El conjunto de sistemas que dan soporte técnico a las operaciones de vuelo son los siguientes [OACI 2006]: (i) el *sistema de comunicación* que posibilita el intercambio de información aire-tierra (A/T) y tierra-tierra (T/T), (ii) el *sistema de navegación* utilizado fundamentalmente por la tripulación para el guiado de la aeronave a lo largo de las rutas autorizadas por los servicios ATC, (iii) el *sistema de vigilancia* empleado principalmente por el ATC para la monitorización y control de los distintos tráficos aéreos.

Los tres sistemas anteriores son usados de acuerdo a una serie de procedimientos estandarizados, tanto por los tripulantes de las aeronaves para el guiado de la misma desde el aeropuerto de origen al de destino (procedimientos de navegación) como por el personal de las dependencias ATC (procedimientos ATC) para dirigir las aeronaves en el espacio aéreo, manteniéndolas separadas unas de otras.

Sin embargo, los sistemas técnicos que tradicionalmente se han venido utilizando se muestran ineficientes a la hora de soportar la creciente demanda de tráfico aéreo. En este sentido la incorporación de las nuevas tecnologías de la información ofrecen potenciales soluciones a este problema. Por esta razón, a partir de la pasada década, los sistemas convencionales han iniciado una progresiva transformación hacia unas herramientas más integradas de Comunicación, Navegación, Vigilancia y Gestión del Tráfico Aéreo o Sistemas CNS/ATM (Communication, Navigation, Surveillance and Air Traffic Management) [De Mata 2002]. No obstante, y en tanto se produzca su completa implantación, estimada a partir de 2015, los sistemas CNS/ATM coexistirán con los sistemas convencionales [ICAO 2007].

1.1.2.1. Limitaciones de los sistemas convencionales

Los sistemas de comunicación para los servicios ATC actuales van desde los sistemas de comunicaciones orales mediante enlaces VHF/HF o telefónicos (estos últimos para comunicaciones en tierra entre dependencias de control) hasta los sistemas de transmisión de datos o red fija de telecomunicaciones aeronáuticas (AFTN) encargada de transmitir los datos de los planes de vuelo a las distintas estaciones ATC afectadas. La principal limitación de este sistema se refiere al carácter oral de las comunicaciones aire-tierra. Los sistemas de comunicaciones orales presentan dos dificultades principales. En primer lugar, conducen a la saturación de los canales de las comunicaciones aire-tierra en áreas de alta densidad de tráfico tales como las áreas terminales, con la consiguiente reducción de la capacidad del ATC. En segundo lugar, los sistemas basados en voz limitan la automatización de tareas y de procesos basados en dicha información tanto a nivel de aeronave como a nivel de ATC.

El sistema de navegación se apoya fuertemente en una red de radioayudas terrestres³. La desventaja principal de la navegación basada en radiayudas consiste en que da lugar a una red de rutas aéreas poco flexible que, salvo algunas excepciones (rutas RNAV⁴), obligan a las aeronaves a sobrevolar los segmentos que unen dos radioayudas consecutivas. Esto, además de restringir la capacidad de tráfico aéreo, supone unos costes adicionales a las compañías aéreas que podrían evitarse si fuera posible el establecimiento de rutas directas entre origen y destino.

Los sistemas de vigilancia actual se basan en una red de sistemas radar primarios y/o secundarios. De acuerdo a la información proporcionada por el radar, los controladores aéreos llevan a cabo el control de la separación entre las aeronaves, tomando las deci-

³También se utilizan sistemas de navegación inerciales y basados en satélites. Sin embargo, por razones técnicas (precisión, disponibilidad e integridad de la señal) y de responsabilidad civil, los sistemas de navegación actuales basados en satélites son utilizados únicamente como sistemas complementarios.

⁴RNAV: aRea NAVigation (Navegación de Área)

1. Introducción y motivación

siones oportunas y comunicándolas a la tripulación a través del enlace de comunicaciones aire-tierra. Los sistemas de vigilancia basados en sistemas radar tienen, entre otros inconvenientes, el de su limitada cobertura. Allí donde no exista o no sea posible (por ejemplo en áreas oceánicas extensas) disponer de los sistemas radar, la vigilancia se ha venido realizando habitualmente mediante informes de posición periódicos que debe proporcionar la tripulación de la aeronave mediante comunicaciones orales (HF o VHF). La vigilancia basada únicamente en informes de posición supone el tener que aumentar los márgenes de separación de los diferentes tráficos para garantizar la seguridad.

Además de los sistemas de vigilancia convencionales anteriores, cabe mencionar otros sistemas de vigilancia instalados en aeronaves para facilitar las tareas de navegación que tiene asignada la tripulación. Entre estos sistemas cabe citar el TCAS o ACAS (Traffic /Airbone Collision Avoidance System), el GPWS (Ground Proximity Warning System) y el radar meteorológico [Moir y Seabridge 2003].

1.1.2.2. Sistemas CNS/ATM: ventajas y potencialidades

Para solventar las deficiencias de los sistemas anteriores, la OACI ha establecido un conjunto de prestaciones exigibles a los futuros sistemas CNS/ATM así como un plan de coordinación de actividades para su progresiva implantación mundial [ICAO 2007]. Las prestaciones de los sistemas CNS/ATM deberán:

1. Proporcionar cobertura mundial de comunicaciones y navegación.
2. Mejorar la flexibilidad y organización del tráfico aéreo.
3. Aumentar los niveles de seguridad y disminuir los costes.

El calendario previsto para implantación de dichos sistemas se muestra en la figura 1.4.

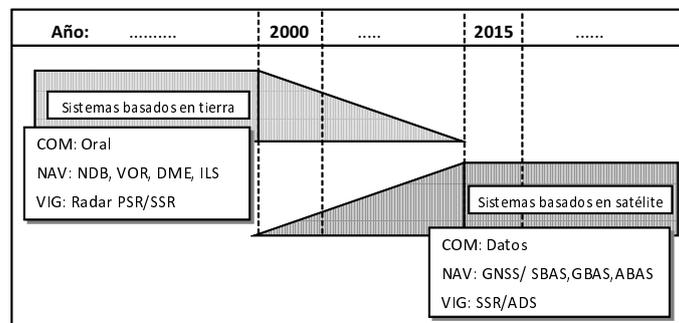


Figura 1.4: Cronograma de implantación del Sistema CNS/ATM

Las características principales de estos nuevos sistemas son tres:

1. Comunicaciones digitales de datos.
2. Sistema de navegación basado en satélites
3. Vigilancia dependiente automática.

El sistema de comunicaciones digitales de datos sustituirá la mayoría de las comunicaciones orales. También se incorporará un nuevo Sistema Móvil de Comunicaciones Aeronáuticas por Satélite (SMAS). Igualmente se utilizará el actual Radar Modo-S como enlace de datos T/A. Las comunicaciones orales sólo se reservarán para las comunicaciones urgentes y no rutinarias.

Las comunicaciones de datos facilitarán su tratamiento informático. Así, las instrucciones en ruta (altura, velocidad, etc.) o para la aproximación a la pista de aterrizaje, serán recibidas en pantallas específicas a bordo; los datos de navegación podrán ser transmitidos en tiempo real a las dependencias ATC y estos mismos datos, junto con otros parámetros de funcionamiento de la aeronave, se podrán transmitir, también en tiempo real, a los departamentos de operaciones de las respectivas compañías aéreas.

El nuevo sistema de navegación se basará en la implantación del Sistema Mundial de Navegación por Satélite (GNSS) como elemento básico de los sistemas CNS/ATM. Dichos sistemas de navegación deberían dar respuesta a aspectos aún no resueltos, tales como parámetros adecuados de precisión, disponibilidad, integridad de la señal, así como una cobertura adecuada en cuanto a responsabilidad civil. Para satisfacer las exigencias de la aviación civil, se introducirán en dichos sistemas una serie de prestaciones complementarias (*aumentaciones*) en los satélites (Sistema de Aumentación Basado en Satélites o SBAS), en tierra (GBAS) o en la propia aeronave (ABAS). Las aumentaciones anteriores son el resultado de las tecnologías de navegación multisensor que fusionan la señal de satélites de navegación con señales de otros sistemas satelitales, sistemas de tierra o con otros sensores a bordo (por ejemplo INS⁵, altímetro, etc.).

En este sentido, los nuevos avances en sistemas de navegación aérea por satélite comienzan a hacer viable el establecimiento de *Rutas de Vuelo Preferentes de Usuario* seleccionadas por las tripulaciones de las aeronaves. Esto llevará aparejada la *necesidad de adaptar los actuales procedimientos de navegación de área (RNAV) para todas las fases del vuelo*. También se podrán realizar aproximaciones de múltiples trayectorias (MLS⁶, GPS diferencial, etc...) que sustituyan a las actuales aproximaciones ILS⁷.

⁵Inertial Navigation System

⁶MLS: Microwave Landing System

⁷ILS: Instrumental Landing System

1. Introducción y motivación

El Sistema de Vigilancia Dependiente Automática (*Automatic Dependent Surveillance System o ADS*)⁸ permite que la aeronave transmita automáticamente los datos extraídos de sus sistemas de navegación (identificación de la aeronave, posición en cuatro dimensiones, posición futura de acuerdo a los datos introducidos en el sistema de gestión de vuelo, etc.). Estos datos podrán ser enviados por satélite de modo que el ADS complementará al SSR y a los sistemas de multilateralización de área amplia (WAM⁹) ofreciendo capacidad de vigilancia en zonas que no puedan ser cubiertas por las estaciones radar terrestre. De esta forma las dependencias ATC, independientemente de su ubicación física respecto al tráfico, disponen no sólo de información del *vector de estado* de cada aeronave (es decir, posición y velocidad instantánea), sino también de información sobre *intenciones de la aeronave* (ruta prevista, tiempo estimado para todos o algunos puntos de la ruta, etc.).

Según el modo de transmisión de la información, se distinguirán dos tipos de vigilancia ADS: ADS-C (*Contract*) y ADS-B (*Broadcast*).

La información ADS-C se enviará a cada estación terrena a través de contratos establecidos entre aeronave y estación. Se pueden mantener varios contratos independientes con distintas estaciones terrenas. Estos contratos pueden ser periódicos, bajo demanda, por un evento concreto y de emergencia [De Mata 2002].

La información ADS-B contiene datos radiodifundidos periódicamente por la propia aeronave de modo que pueden ser recibidos tanto por estaciones terrestres como por otras aeronaves circundantes que estén equipadas con los correspondientes receptores. La recepción ADS-B en la aeronave llevará aparejada la implantación de sistemas adecuados para la visualización y tratamiento de dicha información a bordo (*Cockpit Display of Traffic Information o CDTI*) [Wing et al. 2002].

El sistema ADS permite que la información disponible para el ATC sea también accesible en el mismo formato a otros usuarios del sistema ATM tales como las compañías aéreas.

Todas estas nuevas capacidades del sistema de vigilancia plantean, a su vez, nuevos retos en la organización y en la asignación de roles entre los distintos actores del sistema de tráfico aéreo. Como ejemplo de reasignación de roles, se podría citar la eventualidad de que en determinadas fases del vuelo, el ATC delegue en la tripulación la responsabilidad de la separación respecto a otras aeronaves.

⁸A largo plazo, se aplicará el uso extensivo del ADS, apoyada o sustituida en algunos casos por la vigilancia radar en modo S.

⁹WAM: Wide Area Multilateration

1.1.3. Conceptos operacionales basados en el soporte CNS/ATM

La implantación de los sistemas CNS/ATM no sólo contribuirá a solventar las deficiencias del soporte técnico actual, sino que el análisis de sus potencialidades ha conducido al planteamiento de conceptos operacionales que sugieren nuevas fórmulas de organización y desarrollo de las operaciones de tráfico aéreo.

El término *concepto operacional* se refiere a una descripción genérica de los roles asignados a los actores implicados en las operaciones de tráfico así como de los distintos escenarios de interacción entre éstos. Las descripciones sobre un determinado concepto operacional sirven para inspirar líneas I+D destinadas a diseñar procedimientos que recojan las reglas de actuación de dichos actores. Por ejemplo, los *procedimientos de control de tráfico aéreo* contienen las tareas asignadas al controlador ATC para la separación de las aeronaves. Del mismo modo los *procedimientos de navegación* recogen las tareas asignadas a la tripulación para llevar a cabo la navegación segura de la aeronave. Estos procedimientos de control ATC y/o navegación deben definirse para cada fase del vuelo y/o circunstancia operacional (por ejemplo, procedimientos normales de salida, de ruta, de llegada y aproximación, procedimiento descenso de emergencia, etc.).

Estrechamente ligados al diseño de estos procedimientos se encuentra el diseño de los subsistemas utilizados por los usuarios del sistema (principalmente pilotos y controladores) para llevar a cabo las tareas incluidas en éstos.

1.1.3.1. Antecedentes: hacia la automatización del ATC en Áreas Terminales

Los antecedentes de los nuevos conceptos operacionales se pueden establecer en los intentos llevados a cabo en los últimos años por automatizar parte de las tareas del control ATC mediante el incremento de las acciones de control estratégico frente a las de control táctico.

La prevalencia del control táctico sobre el estratégico da lugar a un ATC poco eficiente debido a que los controladores no siempre pueden conocer el impacto de sus acciones sobre el flujo de tráfico de su sector. El resultado de todo ello es una congestión en la carga de trabajo y en el flujo de comunicaciones orales que limita el número de aeronaves que pueden ser gestionadas con seguridad en un sector en un instante dado. Sin embargo, para lograr un incremento del control estratégico es necesario conocer con mayor precisión la previsible trayectoria cuatridimensional (posición y tiempo o *trayectoria 4D*) de las aeronaves.

Con la introducción de mejoras computacionales en los sistemas de tierra y de las aeronaves partir de la década de los 90, se desarrollaron diversos modelos de predicción de trayectorias 4D y con ellos nuevas herramientas de ayuda para la toma de decisiones del ATC. Entre estos sistemas cabe citar los siguientes: OASIS implementado en el ae-

1. Introducción y motivación

ropuerto de *Sidney* [Ljungberg y Lucas 1992], COMPAS (desarrollado por el Centro de Investigación Alemán DLR) [Schubert 1990], y MAESTRO (desarrollado por el centro de Investigación CENA de las Autoridades de Aviación Civil Francesas) [García 1990].

Por otra parte, los actuales modelos de predicción de trayectoria 4D usados en los modernos sistemas de gestión de vuelo (*Flight Management System* o *FMS*) también presentan una notable precisión, debido fundamentalmente a que éstos utilizan información actualizada de las características de la aeronave (peso actual, configuración de vuelo, programación de velocidades, etc.).

Paralelamente a estos avances se han llevado a cabo determinadas iniciativas para lograr una mayor integración entre los datos de los sistemas de tierra y los datos FMS. Entre estas iniciativas destacan los trabajos para desarrollar el sistema CTAS en Estados Unidos y el programa de investigación PHARE en Europa [NASA 2009, van Gool y Schröter 1999].

El sistema CTAS (Center-TRACON¹⁰ Automation System) es una colección de herramientas software que permiten calcular, integrar, evaluar y visualizar la información de las trayectorias previstas y reales de las aeronaves para asistir al controlador de tráfico aéreo en las operaciones de llegadas en áreas terminales [Erzberger 1995, NASA 2009].

Para desarrollar y evaluar la infraestructura CTAS, se han efectuado diversos ensayos simulados y vuelos de prueba consistentes en operaciones de vuelo de llegada en los que se mantiene un intercambio de datos entre los FMS de cada aeronave y el sistema CTAS [Callantine et al. 2001]. Los datos procedentes de los FMS contienen información de la ruta prevista por la aeronave. Esta información alimenta a los subsistemas del CTAS, siendo además visualizada por los controladores junto con la información radar. De esta forma se ha logrado un incremento de la automatización de las tareas de coordinación y sincronización entre controlador y pilotos.

El programa PHARE (*Program for Harmonised ATM Research in Europe*) fue el primer programa de investigación de un ATM armonizado liderado por EUROCONTROL, desarrollado entre 1989 y 1999. Éste incluyó simulaciones y vuelos de pruebas con aeronaves experimentales. Las propuestas del programa PHARE también se basan en la predicción de trayectorias. Sin embargo, mientras el sistema CTAS ha centrado su actividad en los sistemas de tierra, PHARE se centró en el desarrollo de prototipos de sistemas a bordo con capacidad para realizar predicción de trayectorias 4D, negociación de dichas trayectorias con los sistemas ATC de tierra y el guiado y control de la aeronave a lo largo de dichas trayectorias. De esta forma se diseñaron nuevos prototipos experimentales de FMS para llevar a cabo predicciones, guiado y control de trayectorias 4D, teniendo en cuenta múltiples restricciones laterales, de altitud y de tiempo. El programa finalizó

¹⁰El término TRACON, del inglés Terminal Radar Approach Control, es utilizado en Estados Unidos para definir a las zonas de control terminal asistidas por radar. Tienen un radio aproximado de 30-40 millas náuticas y una altitud vertical de 17.000 pies sobre el terreno.

con algunas simulaciones HITL¹¹ que demostraron que el guiado a lo largo de trayectorias 4D era técnicamente posible. Sin embargo, el impacto de tales conceptos en los roles del piloto y el controlador así como los aspectos relativos al diseño de sistemas interfaz persona-máquina aptos para la ejecución de sus respectivas tareas no fueron abordados [van Gool y Schröter 1999].

1.1.3.2. Los nuevos conceptos operacionales

Los resultados obtenidos durante el desarrollo del sistema CTAS y el programa PHARE, entre otros, pusieron de manifiesto las posibilidades de realizar un control estratégico basado en la predicción 4D. Estos resultados, junto a las potenciales capacidades de los sistemas CNS/ATM plantean nuevos retos sobre el control de tráfico basado en trayectorias 4D.

Una de las cuestiones que se plantean refiere al hecho de que las previsiones de trayectoria 4D calculada por los sistemas de tierra no necesariamente coinciden con el perfil óptimo calculado por cada aeronave. Ello se debe a que no todos los parámetros de las características de las aeronaves contenidos en las bases de datos del ATC (por ejemplo el peso) corresponden con los de la situación real de ésta. Tampoco el controlador dispone de datos del modelo de función de utilidad empleada por la aeronave para determinar su trayectoria óptima de vuelo, ni de los parámetros de optimización de cada compañía (que por razones comerciales podrían ser preservados por ésta). Por ejemplo, los costes de compañía debidos a una ruta con un elevado número de puntos con restricciones de tiempo de llegada podrían ser superiores a los que supone realizar una determinada espera en vuelo.

En definitiva, la optimización de la función de utilidad de los sistemas de tierra proporcionan una medida de utilidad global que no siempre garantiza la máxima utilidad de todos los agentes.

Los métodos de optimización distribuida pueden evitar los inconvenientes anteriores permitiendo que cada optimizador resuelva un problema simple con la consiguiente reducción de la complejidad del mismo¹². En este contexto la resolución de problemas de optimización distribuida representados por desigualdades cuasivariacionales, no tienen soluciones en forma cerrada y necesitan por ello esquemas iterativos. Es en este punto donde la negociación permite a los agentes implicados en el tráfico aéreo generar opciones y evaluar las propuestas que mejor se adaptan a sus preferencias sobre una función de utilidad multi-atributo y un esquema de árbol de decisión. Afortunadamente, también los

¹¹Simulación Human-In-The-Loop (HITL) o simulaciones en tiempo real que incluyen la intervención del elemento humano.

¹²La complejidad de un problema de optimización centralizado de n aeronaves cuando se incorpora una nueva aeronave al proceso es proporcional a n^2 (puesto que el número posible de interacciones pasaría de $n(n-1)/2$ a $(n+1)n/2$) mientras que en una optimización distribuida el número de interacciones se incrementaría en una unidad (es decir, cada aeronave se enfrenta a un incremento lineal de la complejidad).

1. Introducción y motivación

nuevos CNS/ATM facilitan estos procesos de negociación en la medida en que permiten que todas las entidades implicadas en las operaciones de vuelo (tripulaciones, controladores aéreos, compañías, planificadores aéreos, etc.) puedan compartir en tiempo real la información relativa a la trayectoria y a las restricciones que les afecten.

Este planteamiento es el que subyace detrás de las distintas propuestas sobre nuevos conceptos operacionales que se describen a continuación.

Vuelo Libre

El concepto operacional de *Vuelo Libre (Free Flight)* ha sido definido por la RTCA¹³ como “...una operación de vuelo segura y eficiente que opera bajo las reglas de vuelo instrumental (IFR) en la que los operadores tienen la libertad para seleccionar sus sendas y velocidades en tiempo real. Las restricciones de tráfico aéreo están sólo impuestas para asegurar la separación, para impedir exceder la capacidad del aeropuerto, para prevenir vuelos no autorizados en determinadas regiones o para mantener la seguridad del vuelo” [RTCA 1995].

Este concepto innovador propone modificar el actual sistema de control y comando centralizado en el ATC, para convertirlo en un sistema distribuido que permita a los pilotos, siempre que sea práctico, elegir sus propias rutas formulando planes de vuelo que sigan la ruta más eficiente y económica. En esencia, cualquier actividad destinada a eliminar restricciones en las trayectorias preferentes de usuario representa un movimiento hacia el concepto *vuelo libre*. Por este motivo, en la literatura de referencia el concepto de vuelo libre también se denomina vuelo basado en *Trayectorias Preferentes de Usuario (TPU)*.

El *vuelo libre* es, por tanto, un concepto de principios que define escenarios posibles pero no especifica cómo implementarlos. Así, por ejemplo el despliegue de este concepto requiere desarrollar métodos y procedimientos específicos para detectar y resolver con la suficiente antelación posibles violaciones de la separación entre aeronaves¹⁴. En un intento por aportar mayor concreción a los escenarios operacionales de *vuelo libre* han surgido dos nuevos conceptos que se describen a continuación: el de *Gestión Distribuida Aire Tierra de Tráfico* y el de *Operaciones Basadas en Trayectorias 4D*.

¹³Radio Technical Commission for Aeronautics.

¹⁴La distancia de seguridad se basa en la definición de dos zonas de espacio aéreo alrededor de cada aeronave en vuelo. Estas dos zonas son denominadas *zona protegida* y *zona de alerta* respectivamente. Sus dimensiones dependen de la velocidad y de las características del equipamiento de comunicaciones, navegación y vigilancia de las aeronaves. La zona protegida es la más cercana a la aeronave y no debe intersectarse con la zona protegida de otra aeronave. La zona de alerta se extiende más allá de la zona protegida y las aeronaves pueden maniobrar libremente siempre y cuando las zonas de alerta no contacten entre sí.

Gestión Distribuida Aire Tierra de Tráfico

El concepto de Gestión Distribuida Aire Tierra del Tráfico (*Distributed Air-Ground Traffic Management o DAG-TM*) parte del supuesto de que tanto la tripulación, como el control de operaciones de líneas aéreas y ATC comparten esencialmente el mismo tipo de datos, por lo que es factible potenciar la flexibilidad y eficiencia del sistema de tráfico aéreo sin afectar a la seguridad del mismo [NASA 1999, Ballin et al. 2002]. Por esta razón, el concepto DAG-TM propone una revisión y reasignación de los actuales roles de los agentes implicados en el tráfico aéreo. En contraste con el presente sistema de gestión de tráfico aéreo que se apoya en un sistema ATC centralizado en tierra, el DAG-TM concibe el escenario de gestión de tráfico aéreo de *Vuelo Libre* como un sistema de control descentralizado/distribuido constituido por una triada de agentes: la aeronave, el proveedor de servicios de tráfico aéreo (*Air Traffic Service Provider o ATSP*) y el control de operaciones de la compañía (*Airline Operator Center o AOC*).

El control de operaciones de la compañía se caracteriza por ser el que planifica la operación de cada vuelo basándose en los costes de la operación, que a su vez se traducen básicamente en un compromiso de las variables consumo-tiempo. La aeronave realiza la operación de vuelo tratando de minimizar los costes establecidos por la compañía en un entorno de vuelo que condiciona el rendimiento de la propia aeronave. El ATSP proporciona servicios de ATC y de información sobre las condiciones meteorológicas y la infraestructura de rutas o de aeródromo de destino. También gestiona peticiones procedentes de AOCs.

El concepto DAG-TM estructura las distintas actividades relacionadas con las operaciones de vuelo en un entorno de *Vuelo Libre* y las agrupa en quince unidades de análisis denominadas *elementos conceptuales (Concept Elements o CE)*. Cada elemento conceptual (ver tabla 1.1) es, por lo tanto, un escenario de operación posible y su análisis proporciona pautas para la implementación de futuros procedimientos.

No todos los elementos conceptuales anteriores han sido analizados con la misma profundidad en el proyecto DAG-TM. En particular, dentro de los elementos CE-8 al CE-13 que se refieren a las operaciones de llegada en áreas terminales, es el elemento CE-11 el que ha sido descrito con mayor detalle. En síntesis, el elemento CE-11 define [Sorensen 2000]: (i) una arquitectura general del espacio que considera áreas y pasillos de entrada para la convergencia del flujo de tráfico en descenso y aproximación, (ii) un diseño funcional del escenario que describe el tipo de información que comparten los agentes y el equipamiento requerido para ello, (iii) un protocolo marco (representado en la figura 1.5) de la secuencia de actuaciones que deberán llevar a cabo las aeronaves y ATSP durante el proceso de convergencia y secuenciación en el área terminal.

El elemento CE-11 ha sido utilizado en esta Tesis como escenario de referencia, a partir

1. Introducción y motivación

del cual obtener un modelo detallado de las interacciones de los agentes principales (aeronaves y ATC) que contenga protocolos de negociación aire-tierra y aire-aire específicos. Obviamente, en dicho diseño se han tenido en cuenta aspectos contenidos en los demás escenarios referidos al Área Terminal.

Como se puede apreciar, en las indicaciones del diagrama de la figura 1.5, el elemento conceptual CE-11 también propone la posibilidad de delegar en la tripulación el mantenimiento de la autoseparación con respecto a otras aeronaves en determinadas fases del vuelo [Hoffman et al. 1999, ICAO 2002]. Esta distribución de la responsabilidad del mantenimiento de la separación no es sólo un modo de aliviar la carga de trabajo del sistema actual ATM, sino que además se ha mostrado como un método eficaz en la detección y resolución de conflictos de tráfico aéreo [Wangerman y Stengel 1999, Prevot et al. 2003].

CE	Ámbito	Título
0	Puerta-a-Puerta	Acceso a la información/intercambio para soporte de decisión mejorado
1	Planificación Prevuelo	Consideraciones de restricciones del NAS para la optimización de planificación/optimización de vuelo
2	Salida en Superficie	Asignación de ruta inteligente para tiempos eficientes de retroceso y de rodadura
3	Salida Terminal	Libre maniobraje para salidas preferentes de usuario
4	Salida Terminal	Negociación de trayectorias para salidas preferentes de usuario
5	Ruta	Maniobraje libre para salida, crucero y llegada
6	Ruta	Negociación de trayectoria para salida, crucero y llegada
7	Ruta	Colaboración para la atenuación de restricciones debido a la meteorología y al Espacio Aéreo de Uso Especial (Special Use Airspace o SUA)
8	Ruta/Área Terminal	Colaboración para la convergencia de llegadas preferentes de usuario
9	Área Terminal	Libre maniobraje para evitar meteorología adversa
10	Área Terminal	Negociación para evitar meteorología adversa
11	Área Terminal	Auto-separación para la convergencia y para el vuelo en senda
12	Área Terminal	Intercambio de trayectoria para la convergencia y separación en senda
13	Aproximación Terminal	Detección y resolución de conflictos a bordo para aproximación espaciadas
14	Llegada Superficie	Asignación inteligente de rutas para un eficiente cruce y rodadura de la pista activa

Tabla 1.1: Elementos conceptuales de la propuesta DAG-TM

1.1. El sistema de gestión de tránsito aéreo: presente y futuro

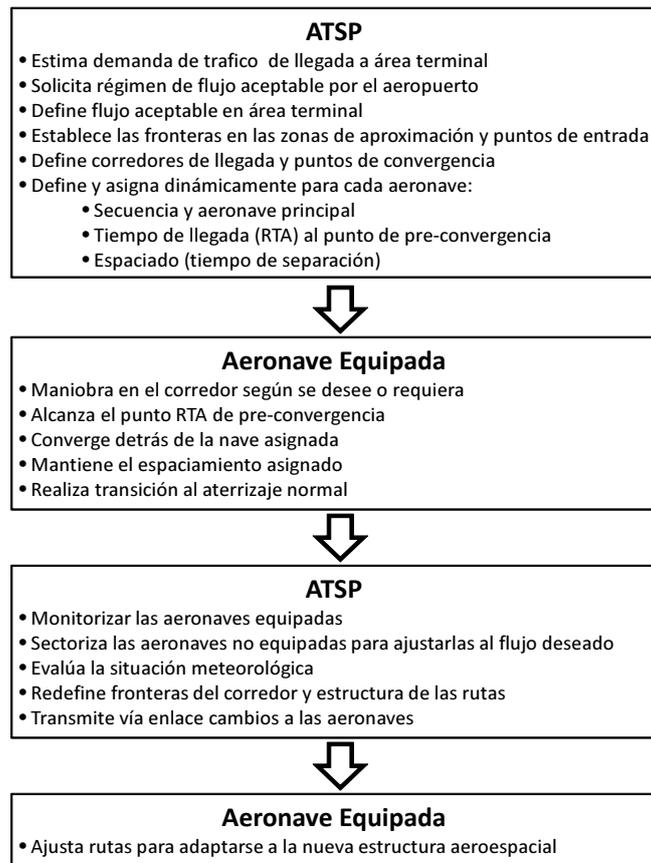


Figura 1.5: Secuencia de las etapas del proceso DAG-TM CE-11

Sin embargo, los criterios para establecer y evaluar la eficacia y la seguridad de nuevos esquemas de distribución de responsabilidades aire-tierra en la separación de las aeronaves trasciende a las propuestas DAG-TM. En este contexto, [Zeghal y Hoffman 2002] han propuesto un marco teórico para analizar los distintos estudios tendentes al desarrollo e implementación de conceptos operacionales que contemplen la delegación de la auto-separación. Desde la perspectiva operacional, los autores proponen el concepto de *niveles de delegación* y apuntan a la posibilidad de establecer tres niveles de delegación: limitada, extendida y completa.

En la *delegación limitada* el controlador es el responsable de identificar y solucionar los problemas derivados de la separación entre aeronaves, mientras que los pilotos son responsables de implementar las soluciones.

En la *delegación extendida*, el controlador es el encargado de identificar el problema y delega en el piloto la búsqueda e implementación de la solución así como su monitorización.

En la *delegación completa* los pilotos son responsables de todas las tareas relacionadas con el mantenimiento de la auto-separación: identificación de problemas y soluciones, implementación y monitorización.

Operaciones basadas en trayectorias 4D

Desde los orígenes de la navegación aérea basada en radioayudas, el control del tráfico aéreo utiliza los tiempos de paso de las aeronaves por distintos puntos de referencia de la ruta para mantener una adecuada separación entre las aeronaves; también están extendidos los procedimientos de navegación de área (RNAV). Si a estas RNAV se incorporan restricciones de tiempos requeridos para alcanzar los puntos que la definen, se puede hablar de *navegación 4D*.

*El concepto de operaciones basadas en trayectoria 4D (Trajectory Based Operations o TBO) extiende la definición de navegación 4D no sólo a determinados puntos de la ruta, sino también en un continuo cuatridimensional desde la posición en origen hasta la posición de destino*¹⁵ [Wilson 2007].

El concepto TBO es un nuevo paradigma del control del tráfico aéreo en el que se propone que el contenido de la información de coordinación aire-tierra (o tierra-aire), en lugar de especificar una ruta y/o un *vector de vuelo* (velocidad, altitud, rumbo) como sucede actualmente, haga referencia a una trayectoria de vuelo 4D. Este concepto parte de la base de que cada aeronave es capaz de realizar una predicción exacta de la senda 4D completa que volará y que, además, puede ser guiada de acuerdo a esta referencia con precisión.

El hipotético escenario de TBO, las aeronaves calcularán a bordo sus *TPUs* de acuerdo a las restricciones de espacio aéreo. Posteriormente, esta trayectoria será negociada con los sistemas de tierra dando lugar a un contrato *aire-tierra* según el cual:

1. Las aeronaves deberán seguir la trayectoria contratada hasta que una nueva trayectoria sea negociada. En caso de emergencia la negociación puede ser adelantada.
2. El sistema de tierra deberá asegurar que la trayectoria contratada esté libre de conflictos. De este modo, si la trayectoria TPU solicitada por la aeronave resulta conflictiva con otras, se deberá llevar a cabo una nueva negociación de trayectoria.
3. Los sistemas de tierra podrían delegar en las aeronaves la negociación entre ellas para alterar sus respectivas trayectorias bajo determinadas circunstancias, (por ejemplo cuando se haya asignado una separación mínima respecto a la aeronave precedente o anterior en una secuencia), y siempre que no afecten a las trayectorias asignadas a terceras aeronaves.

El escenario anterior es particularmente crítico y complejo durante las operaciones de llegada en áreas terminales de aeropuerto por dos motivos principales. En primer lugar

¹⁵ Siguiendo este mismo criterio, una trayectoria 3D es aquella en la que no existe ningún tiempo asociado a sus puntos tridimensionales. En cambio una trayectoria 3.5D es una trayectoria 3D en la que uno más de sus puntos tiene asociada una restricción temporal [Glover y Ligeros 2004, Wilson 2007].

por la variabilidad y las limitaciones espacio-temporales de las operaciones de tráfico en esta fase del vuelo. En segundo lugar por la conveniencia de que estas trayectorias correspondan a *Llegadas en Descenso Continuo (CDAs o Continuos Descent Arrivals)*.

Una llegada y aproximación *CDA* permite a la aeronave volar a mínima o cerca de la mínima potencia hasta la fase de aproximación final. Comparadas con las operaciones de llegada tradicionales, las aproximaciones *CDA* reducen el consumo de combustible y las emisiones de gas. También tiene efecto en la reducción del ruido debido al uso de ajustes inferiores de potencia y a que el perfil vertical es más pronunciado que el tradicional (manteniendo a la aeronave en posiciones más altas)¹⁶ [Wilson y Hafner 2005]. Sin embargo las aproximaciones *CDA* exigen una mayor precisión en la predicción y seguimiento de la trayectoria.

1.1.4. Subsistemas para los nuevos conceptos operacionales

La ejecución de procedimientos ATC y de navegación en entornos operacionales como los descritos en la sección anterior requiere, además del soporte CNS/ATM, de otros subsistemas complementarios [De Mata 2002].

En tierra, y particularmente para las operaciones de llegada, son necesarios sistemas e interfaces persona-máquina que permitan la progresiva automatización de las tareas del ATC: predicción de trayectorias 4D, detección y resolución de conflictos, secuenciación de tráfico¹⁷, negociación automática aire-tierra de trayectorias, etc. Los prototipos más actualizados de estos sistemas corresponden a los desarrollados para el sistema CTAS [Callantine et al. 2001].

A nivel de aeronave son necesarios sistemas e interfaces para la síntesis de trayectoria para el guiado 4D a lo largo de trayectorias, sistemas para la autoseparación, etc. Las propuestas más recientes relacionadas con este tipo de sistemas son fundamentalmente dos. La primera de ellas se refiere a la extensión de las capacidades de navegación 4D en ruta de los actuales FMS para lograr la capacidad de guiado 4D en todas las fases del vuelo (FMS 4D), y de modo particular para la fase de descenso y aproximación [Korn et al. 2006, Canino et al. 2007]. La segunda consiste en el desarrollo del sistema ASAS-CDTI (*Airborne Assurance System-Cockpit Display Traffic Information*) [Ruigrok and Korn 1999].

¹⁶El procedimiento de descenso actual consiste generalmente en un descenso que se realiza en forma escalonada en varias etapas. Ello es consecuencia principalmente de la elevada componente táctica del actual ATC en áreas terminales que exige la imposición de numerosas restricciones de altitud y/o velocidad a medida que se ejecuta el procedimiento de descenso y aproximación al aeropuerto.

¹⁷La secuenciación del tráfico hace referencia al establecimiento de un orden de aterrizaje para un grupo de aeronaves y la programación se refiere a la asignación de un tiempo para el aterrizaje de cada una de ellas. Los procesos de secuenciación y programación comienzan cuando las aeronaves están a unas 200 millas náuticas (unos 45 minutos) del aeropuerto y habitualmente antes de iniciar el descenso.

1. Introducción y motivación

Los FMS actuales tienen incorporada tanto la capacidad de guiado 3D (FMS 3D) como la de guiado de la aeronave a lo largo de rutas (de crucero principalmente) con restricciones RTA¹⁸ [Moir y Seabridge 2003].

En el programa PHARE se evaluaron diversos prototipos para el seguimiento de trayectorias 3D sujetas a restricciones RTA en distintos puntos de la ruta. Aunque a estos FMS se les denominó 4D FMS, hay que advertir que éstos no tienen una plena capacidad de guiado 4D, en la medida en que las restricciones RTA no se aplican a todos los puntos de la trayectoria 4D.

El prototipo de sistema ASAS-CDTI es un sistema de mantenimiento de la separación respecto a otras aeronaves [Bramer 1999, ICAO 2002]. Este sistema surgió como una propuesta conceptual de OACI sobre las funcionalidades que debería tener el mismo para que permita a las aeronaves realizar operaciones de autoseparación con otras aeronaves de forma autónoma. Esta propuesta ha servido de base para el desarrollo de prototipos que están actualmente bajo evaluación preliminar. De acuerdo al esquema funcional propuesto por OACI, el ASAS, deberá contener los tres subsistemas principales:

1. El Sistema de Procesamiento de Vigilancia y Mantenimiento de la Separación (ASAP¹⁹) que contiene la lógica y algoritmos para la detección y resolución de conflictos y a cuyos módulos llegan mediante radiodifusión (ADS-B, TIS-B, etc.) los datos relativos a los planes de vuelo contenidos o almacenados en los respectivos Sistemas de Gestión de Vuelo (FMS) de los aviones circundantes.
2. El Monitor de Cabina para la Información de Tráfico (Cockpit Display of Traffic Information-CDTI). Es un sistema (véase figura 1.6) que deberá integrar aplicaciones para el conocimiento del entorno de la aeronave (Airborne Situation Awareness). Por ello, además de ser una unidad de visualización que utiliza como base las actuales pantallas de visualización horizontal de navegación (Navegation Display o ND) para incluir las representaciones gráficas del tráfico circundante, es una herramienta interactiva que puede ser manipulada a través de un panel de control [Ballin et al. 2002].
3. El Sistema de Alerta que junto con el CDTI constituyen el interfaz del ASAS.

¹⁸RTA: Required Time of Arrival.

¹⁹ASAP: Aircraft Surveillance Application Processing



Figura 1.6: Prototipo de pantalla CDTI

1.1.5. Modelos y algoritmos matemáticos

Las prestaciones exigidas a los sistemas de tierra y aviónica citados en la sección anterior requieren de una capa subyacente constituida por un conjunto diverso de algoritmos y modelos matemáticos. En síntesis estos algoritmos y modelos matemáticos son los siguientes:

- Modelos para la predicción de trayectoria.
- Algoritmos para la detección y la resolución de conflictos.
- Algoritmos para la planificación de secuencias de llegada de aeronave.
- Modelos de guiado y control 4D.

Los algoritmos para la predicción de la trayectoria y los de detección y resolución de conflictos son utilizados tanto por los sistemas de control de tierra como por los sistemas de gestión de navegación de la aeronave. Los algoritmos de planificación de secuencias de llegada de aeronaves son exclusivos de los sistemas de control de llegadas en tierra. Por último, los algoritmos de guiado y control 4D forman parte del sistema de navegación de las aeronaves. De todos ellos, son los modelos para el guiado y control 4D los que no han sido suficientemente desarrollados.

1.1.5.1. Modelos para la predicción de trayectoria

En general, la dinámica de la aeronave puede ser representada mediante modelos de seis grados de libertad [Stengel 2004]. Sin embargo, el cálculo de trayectorias a nivel de sistemas de tierra o de FMS puede ser llevado a cabo adecuadamente mediante un modelo simplificado de masa puntual (Point Mass Model o PMM) [Glover y Ligeros 2004, Eurocontrol 2009a]. Este modelo proporciona una aceptable exactitud junto a un bajo costo computacional [Nuic et. al 2005]. El modelo más básico está constituido por un sistema de ecuaciones diferenciales que proporcionan información sobre la evolución temporal de la posición de la aeronave, velocidad, rumbo y peso. Esta información está ligada a las características aerodinámicas de la aeronave y a los parámetros de la atmósfera en los que se realiza el vuelo (presión, temperatura y viento, principalmente) [Mondoline et al. 2002, MacConkey et al. 2002].

Los parámetros aerodinámicos de las aeronaves (peso, coeficientes de sustentación y resistencia, etc.) y sus velocidades operacionales típicas para cada fase del vuelo suelen venir recogidas en bases de datos específicas (*Aircraft performance Model* o APM). Entre los modelos APM más extendidos caben citar el modelo aéreo-propulsivo utilizado por el sistema CTAS [Gong y Chan 2002] y la base de datos BADA (Base of Aircraft DAta) de Eurocontrol [Eurocontrol 2009a].

Los principales factores que afectan a la exactitud de la predicción de la trayectoria se manifiestan de manera más acusada durante las operaciones de llegada. Estos factores son principalmente dos: las velocidades operativas utilizadas durante el descenso y los valores de viento en cada punto de la trayectoria.

Durante el descenso, el rango de velocidades aerodinámicas que puede seleccionar la tripulación en cada segmento del descenso es muy variado. Ello, unido a la variabilidad de las condiciones viento-temperatura, condiciona de forma significativa la pendiente del perfil vertical. Evidentemente, también en ascenso las variaciones de velocidad operacionales y condiciones atmosféricas condicionan los valores de la trayectoria; sin embargo los errores acumulados en la predicción no son tan críticos como en el caso de la convergencia de flujos de tráfico de llegada al aeropuerto. En [Magill 1996] se analiza la variabilidad de las velocidades verticales de las aeronaves comerciales tanto en ascenso como en descenso. En dicho análisis, el margen de velocidades verticales observadas sobre unos 10000 vuelos, puso de manifiesto que durante las operaciones de descenso, las variaciones de velocidad vertical se deben principalmente a las condiciones operacionales de las aeronaves. En consecuencia el rango de variación de velocidades más reducido se encuentra a bajas altitudes cuando la aeronave se encuentra en la aproximación final siguiendo la senda del ILS.

Por otra parte, los modelos APM propuestos actualmente para sistemas de tierra como el sistema CTAS, no proporcionan valores actualizados de algunos datos de la aeronave

(masa, configuración de cada fase de vuelo, velocidades operacionales, etc.), algo que sí es posible en los modelos APM utilizados por los FMS de las aeronaves. Como ya se ha comentado, la solución a este problema vendrá de la posibilidad de que los datos utilizados por el FMS puedan ser enviados al modelo APM soportado de los sistemas de tierra mediante enlace de datos [Coppenger et al. 2001]. Por esta razón, los retos actuales para la mejora en la exactitud de los modelos de predicción de trayectoria de los sistemas de tierra, pasan por la inclusión en dichos modelos de una información más completa sobre las intenciones de la aeronave respecto a sus velocidades operativas [Gallo et al. 2007, Lopez-Leones et al. 2007] así como de las condiciones atmosféricas.

Otro problema no suficientemente resuelto se refiere al cálculo del punto de inicio del descenso (*Top Of Descent* o TOD). Se trata también de una cuestión crítica debido a que los errores en la estimación del mismo dan lugar a diferentes perfiles verticales que afectan al control de la separación a medida que las aeronaves convergen hacia el punto de aproximación final. La mayoría de los sintetizadores de trayectorias desarrollados hasta la fecha para efectuar operaciones CDA (por ejemplo los del sistema CTAS), tienen la finalidad de facilitar descensos CDA por debajo de los 10000 pies para alcanzar la senda de aproximación final con un ángulo de 3° sobre el plano horizontal. Ello permite una mayor flexibilidad para determinar el TOD, pero a costa de una peor predicción del perfil vertical desde el nivel de crucero hasta los 10000 pies [Wilson y Hafner 2005, Tong et al. 2007].

1.1.5.2. Algoritmos para la detección y resolución de conflictos

El desarrollo de modelos y algoritmos para automatizar los procesos de *detección y resolución de conflictos* (DRC) es una de las áreas de mayor interés para el desarrollo de sistemas para la navegación y control del tráfico aéreo.

Los tres objetivos principales que persiguen los actuales sistemas de detección y resolución de conflictos son: predecir el conflicto, comunicar el conflicto detectado al operador y, en algunos casos, asistirle en la resolución del mismo. El conflicto en este caso es considerado como un evento en el cual una o más aeronaves experimentan una pérdida de separación mínima con respecto a otras aeronaves u obstáculos para la navegación.

Kuchar y Yang han establecido una taxonomía para clasificar la amplia variedad de propuestas relativas a algoritmos para la detección y la resolución de conflictos [Kuchar y Yang 1997]. Esta clasificación abarca un total de 68 propuestas de métodos de detección y resolución de conflictos. Algunos de estos modelos son aplicables no sólo al tráfico aéreo sino también a la robótica, vehículos terrestres o transporte marítimo. Entre las propuestas aplicadas al tráfico aéreo, nueve de ellas son algoritmos implantados actualmente en sistemas de aeronave (TCAS, GPWS, etc...) o de tierra (CTAS).

Los autores proponen una clasificación de estos modelos atendiendo a seis atributos:

1. Introducción y motivación

dimensiones del estado de información (o vector de posición de la aeronave), método empleado para la *proyección temporal* del estado de la aeronave, *métrica* para la detección del conflicto, *método para la resolución* del conflicto, *dimensiones de las maniobras* de resolución y gestión de conflictos con *múltiples aeronaves*.

La taxonomía anterior ha servido de partida en el siguiente capítulo de esta Tesis para agrupar los algoritmos anteriores en función del escenario operacional en el que son aplicados (por ejemplo en la planificación estratégica de las aeronaves o del ATC, en casos de modificaciones tácticas para resolver contingencias, etc.). En este sentido se ha puesto de manifiesto que no existen propuestas suficientemente desarrolladas que aborden el problema de la gestión distribuida y automatizada de conflictos.

1.1.5.3. Algoritmos para la planificación de secuencias de llegada de aeronave

Estos algoritmos usan el tiempo estimado de llegada (*Estimated Time of Arrival o ETA*) obtenido a partir de una predicción de trayectoria, para transformarlos en un tiempo programado de llegada (*Scheduled Time of Arrival o STA*). El hecho de que el tiempo ETA de cada aeronave al aeropuerto no siempre pueda coincidir con la STA se debe a que es necesario mantener una determinada separación entre éstas. Esta separación, que en general en la secuencia de llegada es inferior a la utilizada como métrica para la detección del conflicto, sirve para evitar problemas de estela turbulenta durante la fase de aproximación final a pista. Dicha separación de seguridad está basada en unos tiempos de separación definidos en función de los tipos de aeronave contiguas. El objetivo del algoritmo es minimizar la desviación total del tiempo de ETA deseado por cada aeronave.

El algoritmo encargado de calcular la secuencia de aeronaves proporciona, junto con dicha secuencia, un conjunto de restricciones temporales que garantizan el mantenimiento de las correspondientes distancias de seguridad en la secuencia. Estas restricciones serán utilizadas por las aeronaves para recalcular sus trayectorias 4D de llegada adaptándolas a la nueva situación. Las trayectorias de llegada deben por tanto optimizar este flujo de llegada mientras aseguran el mantenimiento de la adecuada separación entre las aeronaves [Fahle et al. 2003].

Los algoritmos de secuenciación desarrollados hasta la fecha han sido implementados principalmente en el sistema CTAS. Éstos proporcionan información al controlador del orden de la secuencia de aeronaves a distintas pistas. También facilitan valores de rumbo y velocidades a mantener por la aeronave en distintos puntos de control con el fin de asegurar la separación entre aeronaves. En general, estos algoritmos priorizan la velocidad de cálculo frente a la búsqueda de soluciones óptimas, básicamente porque gran parte de los retrasos de la llegada quedan absorbidos a través de secuencias que reducen los tiempos de separación entre aeronaves convergentes.

1.1.5.4. Modelos de guiado y control 4D

Los modelos de guiado y control de trayectoria 4D (también denominados FMS4D) tienen la finalidad de calcular las entradas de control de aeronave de manera que ésta sea capaz de seguir una trayectoria 4D de referencia.

Dentro de los distintos modelos requeridos para procedimientos basados en el concepto TBO, tal vez sean este tipo de algoritmos los menos desarrollados actualmente.

Las propuestas planteadas en el programa PHARE como FMS 4D [Eurocontrol 1997], no dejan de ser prototipos FMS 3.5D de acuerdo a la definición de trayectoria 4D. Una versión mejorada de dicho modelo fue posteriormente implementada en el FMS de un simulador de vuelo A330-300, para ejecutar trayectorias 4D de descenso próxima al descenso continuo desde el nivel de vuelo FL110²⁰ hasta la interceptación de la senda a 4000 pies. [Korn et al. 2006]. En este caso los puntos de la distancia mínima entre puntos de la trayectoria con restricciones de tiempo eran de 4 millas náuticas. Los resultados mostraron una precisión de entre +30 y -120 pies y 1 segundo de tiempo en cada punto con restricciones, siempre que la predicción de viento utilizada para calcular la trayectoria de referencia fuese acertada.

Por otra parte, en esta Tesis se ha tenido en cuenta que en los futuros escenarios de tráfico aéreo, el proceso de guiado y control automático de trayectorias debe ser transparente no solo al piloto sino también a los sistemas de tierra, con el fin de que éstos puedan incorporar dicho proceso a las tareas de monitorización en tiempo real del seguimiento de las trayectorias 4D. Por esta razón, se presenta un modelo específico de guiado y control 4D como una extensión del modelo dinámico híbrido propuesto en [Glover y Ligeros 2004, Glover y Ligeros 2004] para la síntesis de trayectoria. En este caso, los estados discretos generados por el FMS 4D pueden ser enviados a los sistemas de tierra. Ello permite disponer de una nueva información de vigilancia relativa a los procesos de guiado y control de cada aeronave a lo largo de sus respectivas trayectorias negociadas. De esta forma, cuando se producen desviaciones no permitidas respecto a una trayectoria, también en los sistemas de tierra se podrán generar eventos para disparar procedimientos que resuelvan dicha contingencia.

1.1.6. Programas y proyectos I+D

La mayoría de las actuales iniciativas I+D destinadas a implantación del futuro ATM están recogidas en los proyectos *SESAR* y *NextGen* que se desarrollan en Europa y en Estados Unidos respectivamente [Brooker 2008, NCOIC 2008].

El programa SESAR (*Single European Sky ATM Research*) [Eurocontrol 2009b, Sesar

²⁰El nivel de vuelo FL (Flight Level) 110 equivale a 11000 pies de una atmósfera estándar.

1. Introducción y motivación

2007] es una propuesta de carácter tecnológico cuyo objetivo es lograr la implantación de una red ATM europea de altas prestaciones para el año 2020 [Sesar 2006]. En el proyecto SESAR participan la Comisión Europea, Eurocontrol y la Industria ATM. Está desarrollado en tres fases: *(i) fase de definición (2006-2008)* en la que se ha elaborado el Plan Maestro Europeo de Gestión del Tráfico Aéreo, *(ii) fase de desarrollo (2008-2016)* en la que se llevarán a cabo el desarrollo y validación de las tareas recogidas en el plan Maestro SESAR y *(iii) fase de despliegue (2014-2020+)* en la que se implantarán progresivamente las soluciones validadas en la fase anterior.

Por otro lado *NextGen* es un proyecto que a su vez integra otros proyectos, conceptos y tecnologías. Este proyecto está coordinado por la Joint Planning Development Office (JPDO) creada para tal fin por la FAA²¹ [JDPO 2004]. A través de la JPDO participan en el proyecto *NextGen* otras agencias estadounidenses: Departamentos de Transporte, Defensa, Comercio, Seguridad Civil, FAA y NASA. El objetivo central *NextGen* consiste en desarrollar una visión de un sistema de transporte aéreo de nueva generación para el horizonte temporal de 2025 (*Next Generation Air Transportation System o NGATS*) [NASA 2006], definiendo las investigaciones requeridas para alcanzar tales objetivos. La lista de investigaciones necesarias coincide con las enumeradas en apartados anteriores: comunicaciones e infraestructura física, aceleración de la automatización y cambios de procedimientos basados en los análisis de trayectorias 4D para incrementar las capacidades del espacio aéreo y la dinámica de reconfiguración de dicho espacio para adaptarlo a las demandas geográficas y temporales. El objetivo central de NGATS es transformar el concepto TBO a un ambiente de operaciones de vuelo basado en *performances* específicos. La estrategia que sugiere NGATS para desarrollar el comportamiento TBO en propuestas más concretas hasta un nivel de operaciones de vuelo consiste en definir una serie de funciones denominadas *evaluadores*. El concepto de *evaluador* crea y evalúa las trayectorias 4D propuestas por aeronaves considerando las condiciones meteorológicas, los recursos de espacio aéreo y las restricciones, asegurando la compatibilidad entre las propuestas realizadas por las aeronaves y la eficiencia del flujo de tráfico aéreo. Los componentes conceptuales de las operaciones TBO (entre los que se encuentra el evaluador) operan sobre un amplio rango de horizontes temporales que incluyen la configuración del espacio aéreo, la gestión del flujo del espacio aéreo, el control de flujo de tráfico a nivel regional y la resolución de conflictos de tráfico. A partir de la definición de estos componentes, el proyecto NGATS pretende explorar y desarrollar soluciones integradas que aporten datos para la investigación, definición y evaluación de conceptos y tecnologías para la automatización de las tareas de control de tráfico y de navegación aérea. Se incluye en este trabajo la especificación de roles humanos en dichas tareas.

²¹FAA: Federal Aviation Administration

1.1.7. Aspectos no resueltos: el desarrollo de procedimientos

Como ya se ha comentado en la sección 1.1.3, los conceptos operacionales proporcionan una descripción genérica de los escenarios de tráfico que son posibles a partir del desarrollo de las potencialidades de los sistemas CNS/ATM. Por tanto, ofrecen pautas para desarrollar nuevas reglas para la navegación aérea y el control de tráfico aéreo.

La literatura de referencia presentada en las sesiones anteriores, pone de manifiesto que las propuestas planteadas para implementar los conceptos operacionales, se han centrado en el desarrollo de sistemas y modelos matemáticos para la automatización de determinadas tareas de pilotos y controladores. A partir de dichas propuestas se pueden extraer algunas reglas de uso de dichos sistemas para los operadores, pero en ningún caso estos resultados proporcionan información suficiente sobre los roles y las reglas de actuación para pilotos y controladores durante las operaciones de vuelo. A su vez, esta falta de especificación sobre procedimientos limita el propio desarrollo de los sistemas y modelos anteriores.

En definitiva, es evidente que en el diseño de procedimientos se debe considerar el potencial uso de los sistemas descritos. Sin embargo, *el actual estado de desarrollo estos últimos pone de manifiesto la necesidad de proponer procedimientos de operación que materialicen las propuestas recogidas en los conceptos operacionales y que a la vez sirvan para completar las especificaciones exigibles a los sistemas que requieren pilotos y controladores para llevarlos a cabo.* Este planteamiento ha sido tenido en cuenta en esta Tesis, para proponer un modelo de las operaciones de tráfico aéreo en el que se contemple el diseño combinado de procedimientos y sistemas para la navegación y el control de tráfico aéreo.

1.2. Diseño de procedimientos y subsistemas: modelado basado en sistemas multiagente

Tal y como se ha indicado en la sección 1.1.7 anterior, el diseño de nuevos procedimientos y de sistemas orientados al desarrollo práctico de nuevos conceptos operacionales no siempre puede realizarse de forma independiente. Por eso resulta necesario diseñar modelos conceptuales de las operaciones de tráfico donde se contemplen las interdependencias entre procedimientos y sistemas. Además, estos modelos conceptuales deben ser fácilmente trasladables a modelos ejecutables para la simulación analítica destinada a la evaluación y validación operacional de procedimientos y sistemas.

Precisamente, la simulación de escenarios de tráfico aéreo con distintos niveles de fidelidad, es el soporte principal de la metodología empleada de forma generalizada por

1. Introducción y motivación

la comunidad científica para desarrollar nuevos conceptos operacionales [NASA 2006, Eurocontrol 2009b]. Las simulaciones en tiempo real son, en general, simulaciones *HITL* (*Human In The Loop*) destinadas a la evaluación de factores humanos durante los procedimientos de navegación y/o control de tráfico. En cambio las simulaciones en tiempo acelerado, tanto dinámicas como de eventos discretos, se centran en el análisis de otros aspectos menos centrados en el factor humano: modelos matemáticos, algoritmos, procesos de negociación y/o de toma de decisión, medidas de calidad del servicio, etc. Obviamente muchas plataformas de simulación en tiempo real permiten llevar a cabo simulación en tiempo acelerado mediante la inclusión de modelos computacionales que ejecuten las tareas asignadas al elemento humano.

Algunos de los simuladores multi-aeronaves utilizados actualmente en investigación de tráfico aéreo son el *NARSIM* (*NLR's Air Traffic Control Research Simulator*) desarrollado por el laboratorio aeroespacial holandés NLR [NARSIM], el PAS (*Pseudo Aircraft System*) desarrollado por la NASA [NASA ARC 2002], el TGF (*Target Generation Facility*) de la FFA [TGF 2009] o el *ATC Interactive* basado en el entorno ODID²² [Skynet 2002]. El simulador de tráfico NARSIM puede interconectarse al simulador de vuelo experimental RFS (Research Flight Simulator). El RFS se utiliza para evaluar, desde la perspectiva de la tripulación, nuevos procedimientos de navegación y/o subsistemas asociados (principalmente aquellos que tienen que ver con la separación de aeronaves) [Clari et al. 2002].

Uno de los problemas que presenta la investigación del futuro ATM radica en el hecho de que los modelos *software* de entornos de tráfico aéreo requieren una alta modularidad y escalabilidad que haga posible la incorporación progresiva de distintos módulos, modelos o algoritmos de una forma natural y con el menor costo posible, a partir del núcleo principal que representa la dinámica de vuelo de las aeronaves.

Uno de estos desarrollos las estaciones MACS (Multi Aircraft Control System) implementadas por la división de Investigación de Factores Humanos y Tecnología del Ames Research Center de la NASA [Prevot 2002]. Cada estación MACS es una plataforma independiente programada en JAVA que proporciona interfaces de usuario y vistas para el piloto, controladores/gestores de tráfico aéreo, operadores de compañías, gestores de experimentos y observadores. Cualquiera de las estaciones puede servir como un dispositivo de entrada de fidelidad media, un agente autónomo o una pantalla para cualquiera de las perspectivas de una simulación de gestión de tráfico aéreo distribuida. La idea es utilizar MACS como un entorno software flexible que permite el prototipado, simulación y evaluación de conceptos operacionales de control de tráfico aéreo. Para ello distribuye la información y responsabilidad entre pilotos, controladores y operadores. MACS implanta

²²*Operational Display and Input Development* (ODID) es un entorno gráfico desarrollado por EUROCONTROL para la presentación y acceso a la información relativa al tráfico aéreo en interfaces HMI [Eurocontrol 1994].

interfaces gráficas de usuario para diferentes tipos de operadores en la misma arquitectura software para permitir a los equipos de diseño prototipar y evaluar conceptos operacionales nuevos en tiempo real.

Sin embargo, ninguna de las propuestas anteriores incluyen en sus especificaciones de diseño procesos de optimización distribuida, donde la negociación ofrece a las aeronaves la posibilidad de generar opciones y evaluar las propuestas que mejor se adaptan a sus preferencias. En este contexto, la *Teoría de Sistemas Multiagente* aporta soluciones conceptuales para el modelado de sistemas complejos distribuidos como los futuros escenarios ATM [Callantine et al. 2006, Callantine et al. 2006a]. Esta teoría permite formular adecuadamente los roles y funcionalidades de cada uno de los actores que intervienen en el escenario de tráfico aéreo, sus interacciones con el entorno así como los esquemas de toma de decisión distribuida destinados a hacer compatibles las metas particulares de los agentes. También permite plantear nuevas estrategias de coordinación y negociación para sistemas distribuidos. De esta forma, tanto las nuevas metodologías para el análisis y diseño de sistemas multiagente, como la tecnología software que la acompaña, se postulan como una solución que resuelve de forma natural el modelado y diseño de escenarios ATM solventando, además, los problemas de modularidad y escalabilidad mencionados anteriormente.

En las subsecciones siguientes se resumen los principales conceptos asociados a este paradigma y en la sección 1.3 se analizan sus principales aplicaciones desarrolladas hasta la fecha en el ámbito del tráfico aéreo.

1.2.1. Agentes y sistemas multiagente

Actualmente no existe una definición formal y única del concepto de *Agente*. Una de las definiciones más extendida es la propuesta [Wooldridge y Jennings 1995] y su adaptación posterior por [Wooldridge 2002] según la cual “*un agente es un sistema computacional que está situado en algún entorno y que es capaz de acciones autónomas en este ambiente con el fin de encontrar sus objetivos de diseño*”. Esta definición ha sido usada por la mayoría de los investigadores para formular una serie de características generales que permitan comprender qué se entiende por agente y cómo opera en la práctica.

En la definición anterior destacan dos propiedades fundamentales del agente: la *autonomía* y su *situación en un entorno*. La autonomía implica que éste no es controlado externamente. A su vez [Rusel y Norving 1995] caracteriza el entorno considerando diversas propiedades: accesible/inaccesible, determinista/no determinista, estático/dinámico, discreto/continuo.

En [Wooldridge y Jennings 1995] los autores distinguen entre agente (cualquiera que tenga las propiedades anteriores) y agente inteligente (que pretende lograr objetivos),

1. Introducción y motivación

incorporando a éste último nuevas capacidades tales como *reactividad*, *pro-actividad* y *sociabilidad*.

La *reactividad* hace referencia a la capacidad del agente para responder a eventos externos cambiando su estado interno o realizando funciones internas o externas sobre el entorno. La respuesta a los eventos externos se obtiene a través de patrones de percepción-acción: por ejemplo empleando técnicas de autómatas de estado finito extendidos o de aprendizaje simbólico mediante una red neuronal, etc. En ningún caso la respuesta obedece a procesos de razonamiento que contengan mecanismos explícitos para representar el conocimiento.

La *pro-actividad* consiste en la capacidad del agente para lograr sus objetivos de forma persistente mediante iniciativa propia (comportamiento dirigido por objetivos y no únicamente en respuesta al entorno).

La *sociabilidad* consiste en la capacidad del agente para interactuar con otros mediante algún tipo de comunicación o un conjunto de convenios.

A las capacidades anteriores se pueden agregar otras como la *flexibilidad* para alcanzar objetivos de múltiples formas o la *robustez* para recuperarse frente a fallos [Wooldridge 2002]. Otros autores añaden al listado anterior otras propiedades, que si bien no son menos importantes, no siempre son necesarias en todas las aplicaciones de agentes: movilidad, versatilidad, confiabilidad, resistencia, etc [Bratman 1987].

Un *Sistema Multiagente (SMA)* consiste en un conjunto de agentes que interactúan entre sí para resolver problemas complejos que superan las capacidades individuales o el conocimiento de cada uno de ellos. En la resolución de estos problemas los agentes pueden tener objetivos comunes o en conflicto.

Aunque los agentes están especialmente capacitados para resolver de forma cooperativa problemas distribuidos, conviene precisar algunas diferencias entre los Sistemas Multiagente y la Resolución Cooperativa de Problemas Distribuidos (*CDPS Cooperative Distributed Solving*). Ambas áreas de investigación forman parte de la disciplina de la Inteligencia Artificial Distribuida²³ [O'Hare y Jennings 1996]. En los problemas CDPS un conjunto de módulos (o nodos²⁴) cooperaran para dividir y compartir el conocimiento de un problema y el desarrollo de la solución. Es decir, las interacciones entre los agentes están prefijadas de antemano de acuerdo a un plan centralizado para la resolución del problema. En cambio los SMA tratan los problemas de coordinación en los que un conjunto de agentes inteligentes autónomos deciden dinámicamente qué interacciones son adecuadas,

²³La inteligencia artificial distribuida (IAD) es un subcampo de la Inteligencia Artificial (IA) que estudia los comportamientos inteligentes colectivos que son producto de la cooperación de diversas entidades denominadas agentes.

²⁴También denominados agentes en la literatura más actual sobre CDPS. Hemos optado por la denominación tradicional para poner de relieve sus diferencias funcionales respecto a los agentes de un SMA.

qué tareas hay que realizar y qué agente las debe llevar a cabo.

1.2.2. Interacción y coordinación entre agentes

En un SMA, las acciones de uno o varios agentes pueden afectar bien de forma favorable, neutra o perjudicial a los objetivos de otro u otros agentes del sistema. Por eso, de modo general, los agentes interactúan entre sí con el fin de lograr sus objetivos o para mejorar su rendimiento. La *interacción* entre agentes es definida por Jennings como *la concurrencia de sus comportamientos para lograr sus objetivos o realizar alguna tarea* [Jennings 2000]. Algunos escenarios típicos que requieren mecanismos explícitos de interacción entre agentes son, entre otros, los siguientes: *(i)* el intercambio de información [de Boer et al. 2003, Luo et al. 2003], *(ii)* la coordinación para que estos puedan organizar sus actividades individuales de una forma coherente [Durfee 1999], *(iii)* la colaboración en la que los agentes trabajan juntos para lograr un objetivo común [Pynadath y Tambe 2002, Panzarasa et al. 2002], *(iv)* la negociación en la que los agentes con intereses conflictivos intentan lograr un acuerdo mutuamente aceptable para las partes [Jennings et al. 2001].

Los distintos modos de interacción se adaptan a diferentes tipos de entornos y aplicación del SMA. El modo de interacción más simple es aquel en el que un agente reacciona a los cambios producidos en el entorno por los demás agentes a medida que estos ocurren y son percibidos por el primero. En este caso no existe una comunicación explícita entre los agentes y tampoco se dispone en el agente perceptor de un modelo que le permita conocer el previsible comportamiento de los demás agentes. Por el contrario, si el agente ha de tener en cuenta la actividad de otros agentes, necesita disponer bien de un modelo de comportamiento del otro agente y/o de un mecanismo de comunicación con éste.

Las interacciones entre agentes que se comunican entre sí son descritas en términos de relaciones de dependencias entre éstos. Estas relaciones son representadas en [Jennings 2000] a través del concepto “*esfera de influencia*” ilustrado en la figura 1.7. En dicha figura se representa un SMA donde varios agentes que interactúan con otros a través de la comunicación tienen una determinada “esfera de influencia” en el entorno. Estas esferas representan aquellas partes del entorno en las que el agente tiene o podría tener influencia para modificar los estados de dicho entorno²⁵. Cuando las esferas de influencia de los agentes presentan alguna coincidencia entre ellas, se produce una relación de dependencia entre dichos agentes. Las relaciones de dependencia pueden ser tanto positivas como negativas. Una dependencia positiva se produce en los casos en que un agente ofrece un servicio que otro agente necesita (por ejemplo información ofrecida por

²⁵Una manera de representar los efectos que tienen las acciones de un conjunto de agentes sobre un entorno es mediante el concepto de *función transformadora* de estado del entorno .

1. Introducción y motivación

los servicios de meteorología aeronáutica a una determinada aeronave para que ésta lleve a cabo la planificación de su trayectoria). En cambio las dependencias negativas se dan entre agentes que compiten por el uso de un recurso (por ejemplo, entre dos aeronaves que deseen pasar a la vez por un mismo punto del espacio aéreo).

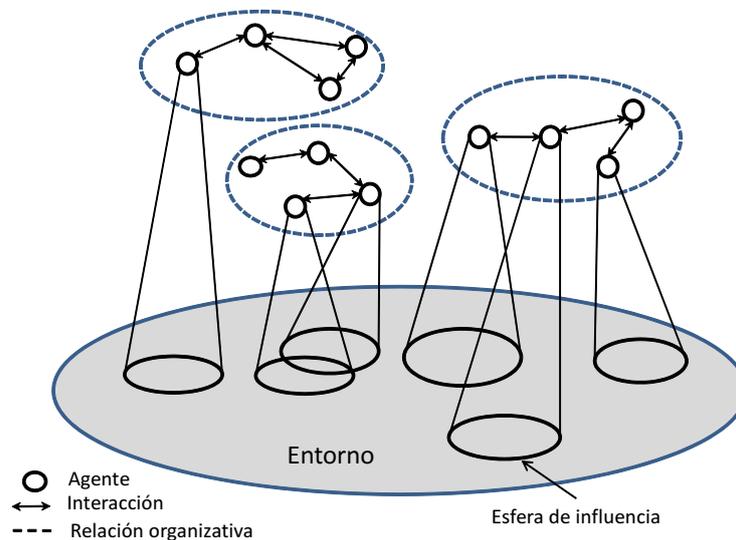


Figura 1.7: Interacciones en un sistema multiagente

La *coordinación* entre agentes es definida en [Malone y Crowston 1994] como la *gestión de dependencias*. Una definición equivalente que incluye otros aspectos del diseño del sistema (como por ejemplo la interacción a través de la comunicación) la concibe como el esfuerzo de *administrar el espacio de interacción o conjunto de interacciones posibles en un SMA* [Busi et al. 2001].

El marco teórico de la coordinación entre agentes está basado en *Teoría de la Organización* [Malone y Crowston 1994]. Esta teoría aborda los aspectos relativos a los distintos modelos de coordinación, la definición del espacio de coordinación (conjunto de opciones de coordinación posibles) así como el tratamiento de los problemas de la toma de decisiones y el establecimiento de acuerdos en la coordinación de actividades organizativas.

En la práctica, todo proceso de coordinación se lleva a cabo a través de mecanismos específicos que recogen tres tipos de acciones:

- *Identificación de las relaciones de dependencia* por parte de cada agente respecto a los demás agentes y toma de conciencia de la necesidad de adaptar sus propios planes a los de los demás.
- *Toma de decisiones* sobre las acciones de coordinación a llevar a cabo para adaptar sus planes.
- *Planificación* de los detalles de las acciones a ejecutar.

Para ilustrar estas actividades, tómesese el ejemplo de dos aeronaves en vuelo que progresivamente convergen hacia un mismo *way point*. Obviamente existe una interdependencia entre los objetivos de las dos aeronaves de seguir avanzando por su ruta prevista. En el sistema actual ATM, el ATC actuaría como agente superior para detectar esta dependencia de conflicto y modificar los planes de vuelo de las aeronaves. Sin embargo, en este ejemplo se considerará un escenario donde son las aeronaves las encargadas de detectar las interdependencias y actuar en consecuencia. En este caso el grado de identificación de las relaciones de dependencia es consecuencia del equipamiento específico que lleven dichas aeronaves a bordo. Una aeronave equipada únicamente con TCAS²⁶ sólo dispondrá de información del movimiento relativo de las demás aeronaves respecto a si misma. En cambio si dispone de recepción ADS-B, tiene acceso a información sobre el plan de vuelo de la otra aeronave.

Una vez identificada la dependencia entre objetivos, la tripulación de cada aeronave (o los sistemas de aviónica correspondientes) deberán decidir cómo adaptar sus respectivos planes de vuelo. La decisión sobre las acciones a llevar a cabo para modificar estos planes depende fundamentalmente del tipo de información que cada aeronave tenga de la otra en cada instante. Si las aeronaves disponen únicamente de TCAS (y no existe otro tipo de comunicación entre ambas), se podrán tomar decisiones en función del tipo de aeronave. Por ejemplo si una aeronave es más rápida que la otra, esta última podría desacelerar para ceder el paso, o bien si están dentro del rango de actuación del mismo TCAS, será este sistema el que proporciona al piloto una solución RA (*Resolution Advisores*) para que modifique los parámetros de navegación. Los algoritmos incluidos en el TCAS proporcionan RAs en función de la posición relativa de ambas aeronaves. Estos algoritmos aplican razonamiento social. Es decir que, a partir de lo que saben del otro, infieren las acciones que tomará ese otro y actúan en consecuencia. En cambio, si ambas aeronaves están equipadas con ADS-B sería posible un razonamiento más completo para decidir qué modificaciones llevar a cabo. En este caso podrían llegar a un acuerdo respecto a la acción conjunta que van a realizar. Para que esta opción sea posible es necesario que exista un mecanismo de comunicación y la certeza de que ambas aeronaves van a cumplir con los acuerdos alcanzados. Una vez acordada las acciones a llevar a cabo éstas serían ejecutadas.

1.2.2.1. Mecanismos de coordinación

La coordinación es necesaria tanto cuando se trata de agentes que cooperan para realizar una tarea conjunta como cuando se trata de una negociación entre agentes indi-

²⁶La introducción del sistema TCAS en los años 80 puede ser considerada como una referencia a partir de la cual se plantea por primera vez la posibilidad de un sistema ATM que evolucionara hacia un modelo de toma de decisión compartido aire-tierra [Kahne y Frolow 1996].

1. Introducción y motivación

vidualistas que compiten por obtener recursos necesarios para lograr sus propios objetivos. Desde esta perspectiva [Huhns y Stephens 1999] clasifican los mecanismos de coordinación entre agentes en dos grupos: la cooperación y la negociación.

La cooperación es entendida en este caso como la coordinación entre agentes con objetivos no antagónicos, mientras que la negociación hace referencia a la coordinación entre agentes cuyos objetivos son inicialmente conflictivos entre sí²⁷.

Los mecanismos de cooperación establecen el modo en que un conjunto de agentes con objetivos compatibles, comparten sus recursos y/o su conocimiento parcial del entorno para lograr un objetivo global común. La estrategia básica compartida por todos estos mecanismos consiste en descomponer y distribuir las tareas. De modo particular deben dar respuesta a cuestiones tales como qué agentes deben llevar a cabo determinadas tareas, qué resultados parciales se deben intercambiar y qué comunicaciones hay que establecer.

Uno de los mecanismos de coordinación cooperativos más extendidos es la Red de Contratos (*Contract Net Protocol*) y algunas de sus variantes [Sandholm 1999]. A través del mismo, un agente *administrador (manager)* puede transferir una determinada tarea a un agente *contratista (contractor)* después de realizar una solicitud de ofertas a diversos agentes contratistas y seleccionar entre las propuestas recibidas aquella que mejor se adapte a sus requerimientos. De esta forma un agente administrador puede subdividir una tarea compleja en varias tareas simples y posteriormente, mediante un *Contract Net Protocol*, asignar cada una de dichas subtareas a un agente *contractor*. Cada agente adjudicatario emplea este mismo protocolo para enviar los resultados de la realización de la tarea encomendada por el administrador, quien finalmente la sintetiza para obtener los resultados de la tarea original.

Los mecanismos de negociación para lograr acuerdos entre agentes son un aspecto esencial del modelo de operaciones basadas en trayectoria que se propone en esta Tesis. Por esta razón en la sección 1.2.3 se describen las principales características de dichos mecanismos.

1.2.2.2. Toma de decisiones de coordinación

El marco teórico principal a partir del cual se han desarrollado los esquemas sobre los procesos de toma de decisiones de coordinación es la *Teoría de Juegos*, desarrollada inicialmente por John von Neumann a comienzos de la década de 1940 [Aumann y Hart 1994].

²⁷Esta definición restringe la cooperación a la coordinación para la resolución de problemas de forma colaborativa entre un conjunto de agentes. No obstante, en ocasiones, la asignación de tareas durante el proceso de cooperación, puede requerir mecanismos de negociación entre los agentes a los efectos de acordar el reparto de las mismas. Por otra parte, de acuerdo a la Teoría de Juegos, descrita en el siguiente apartado 1.2.2.2 se define como juego cooperativo aquel en el que existe comunicación entre los agentes independientemente de que los objetivos de los agentes sean tanto afines como conflictivos entre sí.

La Teoría de Juegos interpreta la interacción de los agentes como un juego, entendido éste como una representación formal de una situación en la cual un número de jugadores (agentes) interactúan en un contexto de interdependencia estratégica. Esto significa que cada agente tiene un control parcial de la situación, de modo que el logro de sus objetivos depende no sólo de sus acciones sino también de las acciones llevadas a cabo por los otros agentes. Además, cada agente es capaz de evaluar el grado de satisfacción de las distintas decisiones que pueda tomar considerando el resultado de las posibles acciones de los demás agentes.

En este contexto, la Teoría de Juegos es una teoría normativa que pretende prescribir cual sería el comportamiento de cada agente basándose en dos supuestos: (i) que los agentes son *racionales* y (ii) que los agentes *deciden y actúan de forma estratégica*²⁸.

La *racionalidad* de los agentes hace referencia a que éstos intentan maximizar el cumplimiento de sus objetivos. Para ello se modelan los objetivos a través de preferencias, las cuales pueden ser cuantificables mediante funciones de utilidad multiatributo. Una *función de utilidad* asocia a cada una de las acciones de los agentes un valor que representa el grado de preferencia del agente respecto a los resultados esperados de las acciones. El agente intenta optimizar esta función de utilidad de forma que al hacerlo maximiza el cumplimiento de sus objetivos. Sin embargo, hay que considerar que esta tarea no consiste únicamente en la resolución de un problema de optimización en el sentido de que el agente no controla todos los atributos de la función debido a que los demás agentes tienen autonomía sobre sus propias acciones.

El *comportamiento estratégico* de los agentes indica que su comportamiento está determinado por el conocimiento que tenga acerca de los otros agentes.

En Teoría de Juegos, existen dos ramas principales según el análisis que se lleve a cabo de los juegos: la teoría de los juegos no cooperativa y la teoría de juegos cooperativa.

La *teoría de juegos no cooperativa* analiza los juegos en los que no existe comunicación entre los agentes. Es decir, se trata de juegos en los que no hay transferencia de utilidad y donde los agentes actúan independientemente intentando maximizar sus objetivos sin posibilidad de establecer acuerdos o compromisos más allá de los establecidos explícitamente por las reglas del juego. En este caso el razonamiento social de los agentes debe llevarles a elegir acciones que forman parte del denominado *equilibrio de Nash*²⁹.

²⁸En Teoría de Juegos una estrategia es un plan de acciones completo que se lleva a cabo durante el juego y en el que se tiene en cuenta las reacciones de los otros jugadores para realizar su elección. La estrategia está explicitada antes de que comience el juego y prescribe cada decisión que los agentes deben tomar durante el transcurso del juego en función de la información que éste disponga. La estrategia puede incluir movimientos aleatorios.

²⁹Un conjunto de acciones o estrategias está en equilibrio de Nash si ningún agente tiene incentivos para desviarse de él de forma individual. O dicho de otra forma, si ningún agente se beneficia cambiando su estrategia mientras los otros no cambian la suya, entonces el conjunto de estrategias y las correspondientes ganancias constituyen un equilibrio de Nash.

1. Introducción y motivación

En la *teoría de juegos cooperativa* (o juegos con transferencia de utilidad) se asume que existe comunicación entre los agentes permitiéndoles establecer acuerdos u otras formas de cooperación. En este caso los acuerdos vinculantes permiten a los agentes obtener una mayor utilidad que si actuaran por su cuenta³⁰. La corriente cooperativa de la Teoría de Juegos es el fundamento formal sobre el que se asientan los modelos desarrollados en ciencias sociales y especialmente en economía [Sycara 1990, Rosenschein y Zlotkin 1995] que inspiraron el enfoque de la negociación como un mecanismo que permite la convergencia de decisiones de coordinación conjunta mediante comunicación explícita [Müller H. 1996].

Desde la perspectiva de la Teoría de Juegos, es evidente que los esquemas de toma de decisión en escenarios de gestión de tráfico aéreo distribuido correspondientes a los conceptos DAG-TM y TBO pueden ser abordados desde la Teoría de Juegos cooperativa.

1.2.3. Mecanismos para alcanzar acuerdos: la negociación

La negociación entre agentes es *“una forma de interacción en la cual un grupo de agentes, con intereses conflictivos y un deseo de cooperar, intentan alcanzar un acuerdo mutuamente aceptable en la división de sus recursos escasos”*³¹ [Rahwan et. al 2004]. En general, la negociación ha sido empleada para la asignación de tareas, asignación de recursos, resolución y prevención de conflictos. A su vez se ha empleado bajo diferentes supuestos: agentes no-cooperativos, agentes cooperativos, a través de un mediador o jerárquicamente en una organización.

Los componentes esenciales de todo proceso de negociación son los tres siguientes [Wooldridge 2002]: el objeto de la negociación, los protocolos y el modelo de toma de decisión de los agentes.

- *El objeto de la negociación* se refiere al rango de temas sobre los que se deberá alcanzar un acuerdo. El objeto de la negociación puede contener un único asunto o varios. También forma parte del objeto de la negociación el conjunto de soluciones posibles así como los criterios que permitan a los agentes evaluar la calidad de una solución de acuerdo a sus intereses particulares.

³⁰Conviene matizar que un juego cooperativo no presupone que los agentes necesariamente deban compartir los mismos intereses. Del mismo modo los juegos cooperativos en los que los agentes comparten intereses (juegos de equipo), no excluyen la posibilidad de que puedan ser analizados desde un punto de vista no cooperativo o estratégico.

³¹Otros autores definen la negociación como un proceso de búsqueda en un espacio de potenciales acuerdos con el objetivo de encontrar una solución que satisfaga las preferencias y requerimientos de todas las partes [Jennings 2000, Jennings et al. 2001]. También [Rosenschein y Zlotkin 1994] la considera como una forma de toma de decisiones en conjunto donde dos o más partes realizan una búsqueda en un espacio de posibles soluciones con el objetivo de alcanzar un consenso. Para [Huhns y Stephens 1999] la negociación es un proceso mediante el cual dos o más agentes toman una decisión en conjunto, cada uno de los cuales intenta cumplir un objetivo individual.

- *Los protocolos* o conjunto de reglas de encuentro que rigen las interacciones de los agentes durante la negociación. Estos protocolos indican los tipos de participantes posibles y la implicación de terceras partes, los estados de la negociación (aceptación de propuestas, cierre de la negociación, etc.), los eventos que producen cambios en los estados de la negociación, las acciones válidas de los participantes en un estado particular, etc. Los protocolos están ligados a la cantidad de agentes que participan en la negociación dando lugar a diferentes tipos de negociación: bilateral, multilateral o multilateral.
- *El modelo de toma de decisión de los agentes.* Este modelo decide las estrategias internas que emplean los agentes para lograr sus objetivos. Obviamente, el grado de sofisticación del modelo y el rango de decisiones que pueden llevarse a cabo en el proceso de negociación, dependen de la información que el agente tenga del entorno, del objeto de la negociación y del protocolo. Las estrategias de toma de decisión de un agente en particular pueden ser tanto privadas como visibles a los demás participantes de la negociación. Las estrategias o técnicas de negociación están basadas en la Teoría de Juegos, en técnicas heurísticas o en la Argumentación. En los modelos basados en la Teoría de Juegos, los agentes miden el grado de preferencia de las posibles soluciones mediante funciones de utilidad e implementan estrategias que tratan de optimizar sus resultados considerando las decisiones de otros agentes [Nash 1950, Rubinstein 1982]. Los modelos basados en heurística realizan búsquedas no exhaustivas para encontrar soluciones buenas cuando la búsqueda de soluciones óptimas presenta dificultades computacionales [Sierra et al. 1997, Matos et al. 1998, Fatima et al. 2004]. Los modelos basados en argumentación permiten a los agentes añadir información argumentativa a sus propuestas (o respuestas a propuestas) para justificar sus posturas o influenciar en la postura de los otros agentes³² [Sierra et al. 1998] .

La importancia relativa de estos elementos dentro de un mecanismo de negociación particular es variada. Así en los procesos de negociación diseñados como subastas es el protocolo el que condiciona el comportamiento del agente restringiendo los tipos de propuestas o elecciones posibles frente al objeto de negociación [Rosenschein y Zlotkin 1994, Vulkan y Jennings 2000]. En otros casos, son los esquemas de razonamiento interno del propio agente los que determinan las acciones que llevará a cabo el agente. En el caso particular de las negociaciones en escenarios distribuidos de tráfico aéreo, el peso relativo de los tres elementos anteriores es, en general, similar.

³²En la literatura de referencia, el término negociación en ocasiones está restringido a la negociación basada en la Teoría de Juegos, mientras que la argumentación es entendida como otra forma distinta de alcanzar acuerdos.

1. Introducción y motivación

Por otra parte el diseño de todo mecanismo para lograr acuerdos deberá tener un conjunto de propiedades deseables tales como [Sandholm 1999]:

Garantía de éxito. Es decir, debe asegurar el acuerdo entre los agentes.

Satisfacción global. Maximiza el bienestar social asegurando que cualquier solución adoptada maximice la suma de utilidades de los agentes que participan en la negociación.

Pareto-eficiencia. Una solución es pareto-eficiente o pareto-óptima si no hay otro resultado que haga al menos a un agente mejorar sin hacer al menos a otro agente empeorar. De esta forma, si una solución es no pareto eficiente significa que existe al menos otra en la que uno o varios agentes pueden mejorar sus objetivos sin perjudicar los de los demás. Obviamente, las soluciones que maximizan la satisfacción global son un subconjunto de las soluciones pareto-óptimas.

Razonamiento individual. La participación de un agente en una negociación es individualmente racional para éste si el beneficio que obtiene no es menor que el que habría obtenido sin participar en la negociación. El razonamiento social es necesario porque supone un incentivo para participar en la negociación.

Estabilidad. Un mecanismo es estable si proporciona a los agentes incentivos para comportarse de una determinada manera; dicho de otro modo, si ningún agente tiene incentivos para desviarse de la estrategia o conjunto de estrategias preestablecidas. El tipo de estabilidad más conocida es el equilibrio de Nash (ver nota 29 de la página 35).

Simplicidad. Un mecanismo simple es aquel que hace que la estrategia apropiada para participar en la negociación sea obvia. Es decir, que al ser usado por un agente, éste puede fácilmente determinar la estrategia óptima.

Distribución. Un protocolo para alcanzar acuerdos debería diseñarse de forma distribuida, evitando por tanto una entidad central que tome las decisiones. Las razones para ello consisten en asegurar que no existen puntos de fallo únicos (por ejemplo en un único árbitro) así como en minimizar el flujo de comunicaciones de un agente en particular.

1.2.3.1. Negociación basada en la Teoría de Juegos

En este caso los objetivos del agente se expresan en términos de funciones de preferencia y los agentes negociadores realizan propuestas y contra-propuestas en las que se aplican

estrategias basadas en la Teoría de Juegos para buscar soluciones pareto-óptimas. A su vez las estrategias dependen de los objetivos de los agentes, de los límites temporales (*deadlines*) del proceso, de la información que proporcione el agente oponente, etc.

El objeto de la negociación se caracteriza de tal forma que los agentes puedan realizar una búsqueda distribuida a través de un espacio de acuerdos potenciales. Formalmente, la Teoría de Juegos caracteriza un conjunto de soluciones o acuerdos posibles a través del concepto de *espacio de soluciones*. A un nivel abstracto el espacio de soluciones se define como un conjunto de acuerdos $\Psi = \{\Omega_1, \dots, \Omega_n\}$ donde $n \in N$ es el tamaño del espacio de búsqueda. Si además se pretende caracterizar cada atributo resulta más útil aún describir el espacio de soluciones mediante vectores del espacio *euclídeo* multidimensional en el que una solución o acuerdo se define mediante un conjunto de atributos A_1, \dots, A_n donde cada atributo A_i puede tomar un conjunto de valores a_1^i, \dots, a_m^i . El espacio de soluciones crece de forma significativa a medida que lo hace el número de atributos y dominio de cada uno de ellos. Por esta razón, la búsqueda de soluciones en escenarios con muchos atributos y dominios de gran rango puede llegar a ser inviable³³.

Por otra parte, dado que en la negociación se trata de optimizar la solución global, maximizando en lo posible las preferencias de los agentes, es necesario poder evaluar los acuerdos o soluciones tanto a nivel individual como a nivel colectivo.

El grado de preferencia que tiene un agente i sobre cada una de las soluciones del conjunto de acuerdos posibles se puede expresar formalmente mediante funciones de utilidad. Una función de utilidad $U_i : \Psi \rightarrow R^+$ asigna a cada solución Ω_k del conjunto de acuerdos posibles Ψ , un número real que captura el grado o nivel de satisfacción del agente respecto a Ω . De este modo las preferencias individuales del agente se pueden definir mediante una relación de preferencia binaria \succsim_i sobre el conjunto Ψ . Usando esta notación, la expresión $\Omega_1 \succsim_i \Omega_2$ indica que la asignación Ω_1 es al menos tan buena como la asignación Ω_2 para el agente i . Además $\Omega_1 \succ \Omega_2$ expresa una *preferencia estricta* en la que se cumple que $\Omega_1 \succsim_i \Omega_2$ pero no $\Omega_2 \succsim_i \Omega_1$. Por tanto, de acuerdo con esta notación, la función de utilidad $U_i(\cdot)$ representa la relación \succsim_i si $U_i(\Omega_1) \geq U_i(\Omega_2)$ sólo es posible cuando se cumple $\Omega_1 \succsim_i \Omega_2$. Además, se considera que una preferencia es racional si ésta a su vez es transitiva (es decir si $x \succ y$ y $y \succ z$ entonces $x \succ z$) y completa (o que para todo x e y o $x \succ y$ o $x \preceq y$ o se cumplen ambas).

Para la evaluación global de los acuerdos es útil el concepto de dominancia. Un acuerdo Ω_1 domina débilmente otro acuerdo Ω_2 si para todos los agentes implicados se cumple que $U_i(\Omega_1) \geq U_i(\Omega_2)$. Un acuerdo Ω_1 domina estrictamente (o simplemente domina) Ω_2 si Ω_1 domina débilmente Ω_2 y para al menos un agente k se cumple que $U_k(\Omega_1) > U_k(\Omega_2)$.

³³Una solución a este problema la aportan los distintos mecanismos de negociación heurísticos que realizan búsquedas no exhaustivas para lograr soluciones “buenas” aunque no necesariamente óptimas [Sierra et al. 1997, Matos et al. 1998, Fatima et al. 2004].

1. Introducción y motivación

Junto a estos conceptos resultan útiles las definiciones sobre acuerdo racional individual así como la de acuerdo pareto-óptimo citadas al comienzo de esta sección como características exigibles a los mecanismos para alcanzar acuerdos.

En la figura 1.8 se muestra un esquema genérico de la estructura de un agente negociador cuyas interacciones con otro agente dependen fundamentalmente del intercambio de propuestas [Rahwan et. al 2004]. Según dicho modelo, los mensajes que proceden de otros agentes se procesan en un módulo de interpretación para identificar los elementos declarativos (o locuciones³⁴) del mensaje recibido. De este modo el módulo interpreta si dicho mensaje se trata de proposición, aceptación o rechazo u otro tipo de mensajes. Posteriormente se recogen en una base de datos los contenidos de dichas propuestas (excepto que sea una aceptación en cuyo caso la negociación finalizaría). El módulo de evaluación y generación de propuestas es el encargado de decidir sobre la aceptación, rechazo, generación de contra-propuesta o finalización de la negociación. Este módulo utiliza tanto la base de datos de contenidos de propuestas como otras posibles bases de datos de conocimiento. Estas últimas contienen un modelo del entorno y del oponente así como un perfil de actitudes mentales (creencias, deseos, preferencias, etc.) [Wooldridge 2002]. Por último el módulo de generación de locuciones se encarga de presentar en forma de mensaje la respuesta que se envía al otro agente.

En síntesis, durante el proceso de negociación, los agentes deben ser capaces de interpretar los mensajes, evaluar las propuestas entrantes así como generar propuestas y mensajes de salida.

Los mecanismos, descritos en los párrafos anteriores, para alcanzar acuerdos en la Teoría de Juegos son, en general, eficientes computacionalmente y adecuados para procesos de negociación bilaterales. También permiten verificar de una forma simple las propiedades deseables en este tipo de mecanismos ya citadas en la página 38. Sin embargo, dichas técnicas de negociación plantean otra serie de desventajas entre las que destacan las siguientes [Jennings et al. 2001]:

Las posiciones no pueden ser justificadas. Se asume que las preferencias de los agentes son modeladas mediante funciones de utilidad multidimensionales. Sin embargo existen preferencias difícilmente cuantificables. Como consecuencia de ello puede resultar difícil para un agente negociador expresar sus preferencias adecuadamente o justificar su postura en la negociación a un tercer agente que haya delegado en éste las tareas de negociación.

Las posiciones no pueden ser cambiadas. En Teoría de Juegos se considera que las

³⁴Los elementos de un lenguaje de comunicación son denominados normalmente locuciones, declaraciones o actos del habla. En la sección 1.2.4 de la página 43, se citan las principales locuciones habitualmente empleadas en los procesos de comunicación entre agentes.

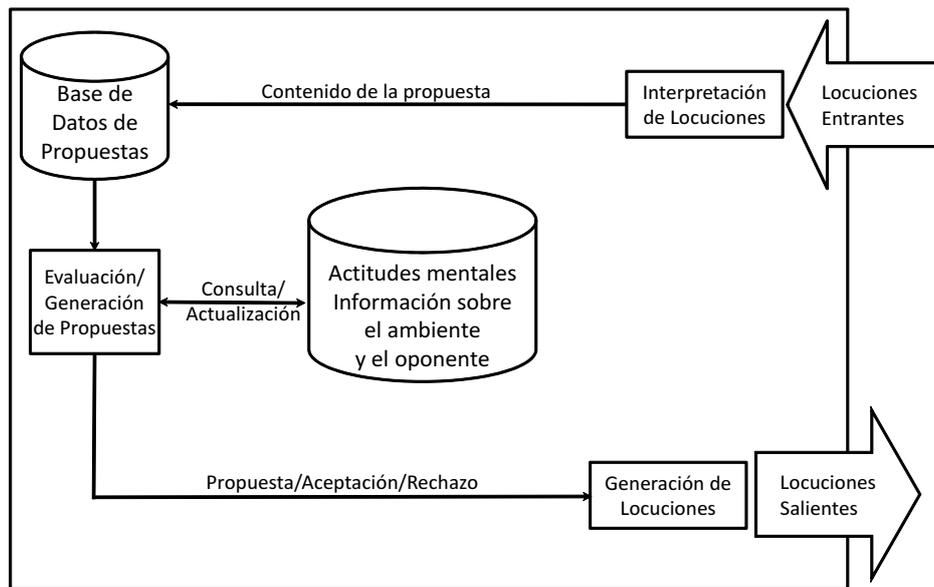


Figura 1.8: Elementos conceptuales de un agente negociador clásico

funciones de utilidad son fijas e inmutables y que por tanto no cambian mientras se negocia. Además, sólo se intercambian ofertas y contra-ofertas que son evaluadas por un módulo de evaluación de propuestas, no estando previsto el intercambio de información adicional. Todo ello impide que los agentes puedan modificar sus preferencias a medida que conocen nuevos argumentos del oponente o que un agente pueda influir en las preferencias del otro.

1.2.3.2. Negociación basada en la argumentación

Para solventar las limitaciones descritas de la negociación basada en la Teoría de Juegos, la negociación basada en la argumentación incorpora a las propuestas información adicional para argumentar las razones por las cuales dichas propuestas deberían ser aceptadas [Kraus et al. 1998, Parson et al. 1998, Sierra et al. 1998]. Un argumento es, por tanto, una meta-información que persigue hacer más atractiva y aceptable una propuesta. La argumentación es persuasiva porque los intercambios son capaces de alterar el estado mental de los agentes involucrados que abogan por la idea de que los agentes pueden aumentar la calidad de un acuerdo intercambiando discusiones que puedan influir mutuamente en los estados de los agentes. Obviamente el modelo de negociación basado en la argumentación resulta más complejo que los modelos basados en Teoría de Juegos. Así por ejemplo los protocolos pueden requerir un mayor número de locuciones y mayor número de reglas, lo que a su vez supone una mayor complejidad computacional para verificar que las locuciones se ajustan al historial de locuciones definido por el protocolo. Tampoco existe actualmente un marco de referencia bien definido para carac-

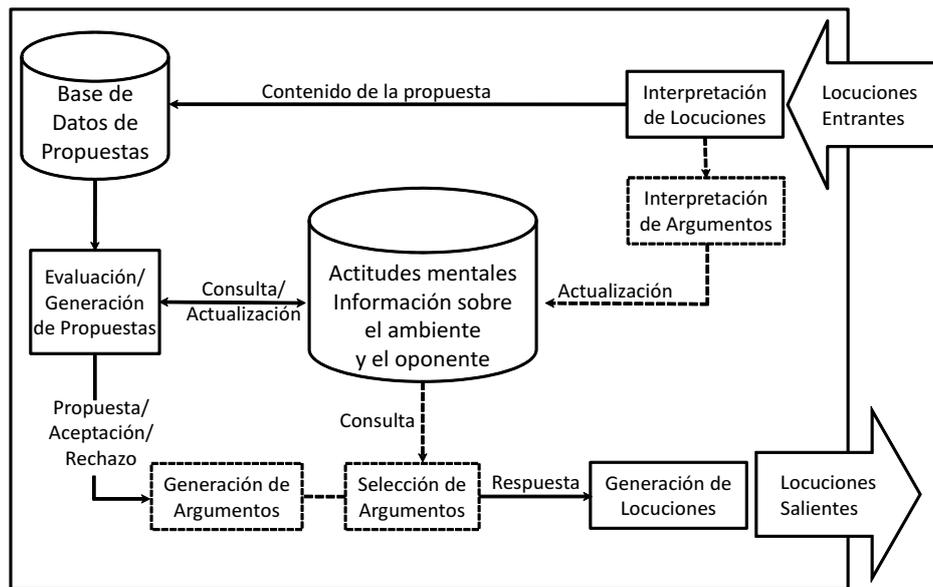


Figura 1.9: Elementos conceptuales de un agente argumentador

terizar la negociación basada en la argumentación. Sin embargo en trabajos como los de [Rahwan et. al 2004] se apuntan un conjunto de componentes característicos de la negociación basada en argumentación. Algunos de estos elementos son de carácter interno al agente y hacen referencia a los componentes característicos de un agente argumentador. Otros en cambio son de carácter externo y tienen que ver con el entorno en el que operan los agentes (por ejemplo el lenguaje de comunicación o los protocolos de negociación).

En la figura 1.9 se muestran los componentes básicos de un agente argumentador³⁵. En dicha figura se indican con las líneas discontinuas los componentes adicionales que son necesarios en este tipo de agentes, respecto a los agentes descritos en la sección anterior. Estos nuevos componentes tienen la finalidad de: (i) evaluar los argumentos de entrada y en consecuencia actualizar su estado mental de acuerdo a éstos, (ii) generar nuevos argumentos de salida candidatos y (iii) seleccionar un argumento a partir de un conjunto de argumentos disponibles.

1.2.3.3. Protocolos de negociación

Los mecanismos de comunicación para alcanzar acuerdos se diseñan en forma de protocolos constituidos por un conjunto formal de reglas que gobiernan la interacción entre los participantes. Dichas reglas especifican en cada etapa del proceso de negociación qué

³⁵Este esquema propuesto por [Rahwan et. al 2004] puede diferir respecto a otros diseños de agentes argumentadores en cuanto al orden de determinados bloques o la combinación o descomposición de algunas de sus funcionalidades. Sin embargo, el esquema muestra las funcionalidades básicas de un agente argumentador a partir del cual llevar a cabo el análisis y diseño de las funcionalidades de un agente específico.

debe hacer o decir cada agente. Por ejemplo, después de que un agente realice una propuesta, el otro agente puede ser capaz de aceptarla, rechazarla o criticarla pero no podría, por ejemplo, ignorarla haciendo una contra-propuesta [Rahwan et. al 2004].

El conjunto de reglas que forman parte de un protocolo pueden clasificarse de acuerdo al siguiente esquema [Esteva et al. 2001, Jennings et al. 2001]:

Reglas para la admisión: especifican cuándo un agente puede participar en un diálogo de negociación y bajo qué condiciones.

Reglas para la retirada del participante: indican cuándo un participante puede retirarse de la negociación.

Reglas de terminación: especifican cuándo termina la negociación (por ejemplo, una vez que el agente haya aceptado un acuerdo).

Reglas para la validez de propuestas: especifican las condiciones que deben cumplir las propuestas. Por ejemplo, un agente no puede realizar una propuesta que ya haya sido rechazada previamente.

Reglas para determinar el resultado: especifican cómo debe expresarse el resultado de una interacción. Por ejemplo indicando la oferta ganadora en un proceso de subasta o el envío de una locución de aceptación por parte de una negociación bilateral.

Reglas de compromiso: especifican cómo deben manejarse los compromisos en el marco del proceso para alcanzar el acuerdo. Es decir, señala en qué casos y bajo qué circunstancias se puede romper un compromiso. Esta regla guarda una relación directa con la gestión de inconsistencias entre las locuciones previas y las actuales.

1.2.4. Comunicación y lenguajes de comunicación

La comunicación entre agentes les permite incorporar a su razonamiento las intenciones, deseos y objetivos de otros agentes, así como informar sus propios deseos, objetivos e intenciones. De este modo los agentes pueden desarrollar sus acciones con una visión menos local y pueden coordinarse con otros agentes. Por otro lado, la comunicación requiere de lenguajes con elementos propios para facilitar el intercambio de información y la comprensión de su contenido [Labrou et al. 1999]. Tal y como se ha comentado en la sección anterior, los elementos del lenguaje de comunicación son habitualmente denominados locuciones, declaraciones o actos del habla. En la negociación basada en la Teoría de Juegos las locuciones que habitualmente se emplean son: *propose* para hacer propuestas, *accept* para aceptar propuestas y *reject* para rechazar propuestas. En cambio en la negociación

1. Introducción y motivación

basada en argumentación se requiere una comunicación más rica y lenguajes de dominio que permitan el intercambio de *meta-información*. Las diferencias más notables entre los marcos de negociación basada en argumentos (ABN o *Argumentation-Based Negotiation*) y la que no lo es (no-ABN) están mostradas en la tabla 1.2 [Rahwan et. al 2004].

	Negociación <i>no</i> basada en argumentación	Negociación basada en argumentación
Lenguaje de Comunicación	Las locuciones permiten a los agentes enviar soluciones de ofertas, propuestas, aceptaciones y rechazos	Las locuciones permiten el paso de meta-información de forma separada o en conjunción con otras locuciones
Lenguaje de Dominio	Definen solo propuestas	Define propuestas y meta-información relativa a preferencias, objetivos, creencias,....

Tabla 1.2: Lenguajes de comunicación para ABN y no-ABN

En los últimos años se han desarrollado diversos estándares de lenguajes de comunicación de alto nivel entre agentes. Entre éstos destacan los estándares KQML (*Knowledge Query and Manipulation Language*) y el FIPA ACL (*Foundation of Intelligent Physical Agents-Agent Communication Language*)³⁶. Ambos lenguajes están inspirados en la teoría de los actos del habla (*speech-acts*). De acuerdo a esta teoría, la comunicación se realiza mediante un conjunto de *actos comunicativos* que a su vez se clasifican en categorías según la actividad social a la que se encuentren destinadas. Además, los actos comunicativos permiten el intercambio de mensajes, los cuales a su vez tienen una determinada estructura constituida por una serie de elementos que contienen datos como el nombre del emisor, el nombre del receptor, contenido del mensaje, etc. (no todos estos elementos deben estar obligatoriamente incluidos en los mensajes).

El estándar FIPA-ACL es tal vez el más extendido actualmente. Dicho estándar dispone de una librería que comprende 22 acciones comunicativas. Las acciones contenidas en FIPA ACL se pueden agrupar en cuatro categorías en función de la actividad social a la que se encuentran destinadas: *Información, Realización de Acciones, Negociación e Intermediación*. Además de la librería anterior, el estándar proporciona una descripción detallada del lenguaje natural de cada acción y su consecuencia. También proporciona un modelo formal de semántica de la acción (sus precondiciones y sus efectos) así como ejemplos de uso del acto comunicativo.

³⁶FIPA (*Foundation of Intelligent Physical Agent*) es una de las organizaciones internacionales sin ánimo de lucro dedicada a establecer estándares que faciliten la interacción ente agentes y sistemas de agentes desarrollados a través de diferentes plataformas de agentes.

Por otro lado, en los casos en los que los contenidos informativos presenten cierto nivel de complejidad, resulta útil definir una *ontología*³⁷ para asegurar que dichos contenidos mantienen idéntico significado para el emisor y el receptor. De este modo un mensaje estándar FIPA ACL está definido por el contenido del mensaje, la intención del acto comunicativo (*performative*), el modelo formal en el que se codifica el mensaje y la ontología que describen los términos del contenido del mensaje. Finalmente cabe señalar que de acuerdo a esta teoría, la estructura de la comunicación o conversación entre agentes a menudo se corresponde con patrones típicos de secuencias de mensajes denominados protocolos de comunicación o interacción también contemplados en el estándar FIPA ACL.

1.2.5. Arquitectura interna de los agentes

La arquitectura de los agentes viene definida por el diseño de los componentes y de los mecanismos internos que determinan su comportamiento. Este diseño permite al agente recibir información del entorno y disponer de los mecanismos de control adecuados para decidir la ejecución de acciones internas y externas. El establecimiento de los mecanismos de control dependen fundamentalmente de la forma elegida para representar la realidad. Desde este punto de vista, se pueden definir tres tipos de arquitecturas de agente:

- Arquitecturas deliberativas

Son arquitecturas basadas en la lógica (simbólica) en las que el entorno es representado y manipulado de forma simbólica, usando mecanismos de razonamiento. Reciben la información desde el exterior en forma de eventos y en forma de mensajes expresados en lenguaje de comunicación. Es un mecanismo semejante al utilizado por el conocimiento humano, por lo que su codificación es bastante comprensible para el elemento humano. Sin embargo, no siempre es fácil traducir la realidad física a estructuras simbólicas, y hacerlo a veces implica elevados costes computacionales. En general, las arquitecturas deliberativas están orientadas a potenciar las propiedades pro-activas de los agentes [Maes 1990] .

Dentro de las arquitecturas deliberativas destacan aquellas que han tomado como referencia el modelo cognitivo BDI (*Belief, Desire, Intention*) [Haddadi y Burmeister 1997]. Según este modelo las *creencias* representan el conocimiento que tenga el agente de su entorno. Los *deseos* son los estados finales definidos en forma de objetivos. Finalmente las *intenciones* son el conjunto de tareas que planifica el agente con el fin de lograr sus deseos de acuerdo a sus creencias.

³⁷Una ontología consiste en un vocabulario de términos, así como un conjunto de reglas que permitan la combinación de dichos términos y la extensión del vocabulario.

1. Introducción y motivación

Una propuesta práctica de arquitectura deliberativa basada en el modelo BDI es la arquitectura de razonamiento procedimental (arquitectura PRS o *Procedural Reasoning System*)[Georgeff y Lansky 1987]. Esta arquitectura establece procedimientos específicos para almacenar las creencias, deseos e intenciones a través de bases de datos y otras estructuras de almacenamiento de datos y secuencias de acciones.

■ Arquitecturas reactivas

Son arquitecturas realizadas bajo un enfoque conductista con un modelo estímulo-respuesta, recibiendo la información del exterior únicamente en forma de eventos. No tienen un modelo simbólico de la realidad como elemento central de razonamiento y no utilizan razonamiento simbólico complejo. En general tienen un diseño más simple y responden más rápidamente que las arquitecturas deliberativas. Sin embargo razonan de peor forma y carecen de capacidad para aprender de la experiencia. Las principales arquitecturas reactivas son las *reglas situadas*, *los autómatas de estados finitos*, *las redes neuronales*, etc. Una de las arquitecturas reactivas más extendida es la arquitectura de *subsunción de Brooks* [Brooks 1991].

■ Arquitecturas híbridas

Estas arquitectura combinan tanto módulos reactivos como deliberativos permitiendo que el agente exhiba ambos comportamientos. Los módulos reactivos se encargan de procesar los estímulos que no necesitan deliberación mientras que los módulos deliberativos determinan qué acciones deben realizarse para satisfacer los objetivos locales y cooperativos de los agentes. Entre las arquitecturas híbridas destacan la arquitectura *Touring Machine* (arquitectura horizontal) [Ferguson 1992], la *Interrap* (arquitectura vertical)[Müller J. 1996]. También la arquitectura PRS puede implementarse como una arquitectura híbrida.

1.2.6. Metodologías y herramientas para el análisis y diseño de SMA

Tanto el desarrollo de aplicaciones de usuario como el diseño de modelos para la simulación analítica basados en SMA requieren de una metodología específica para analizar y diseñar dichos sistemas. Junto con dicha metodología es deseable que co-existan herramientas que trasladen los modelos conceptuales obtenidos a código ejecutable en lenguajes de programación convencionales.

Existe una relativa variedad de propuestas metodológicas para diseñar SMA, aunque aún no existe un estándar dentro de la comunidad científica. Algo similar ocurre con las herramientas para la implementación de SMA. Por otra parte, en los últimos años

han aparecido nuevas metodologías que incluyen pautas y herramientas para la implementación de los modelos diseñados, de forma que metodologías de diseño y herramientas para generar código ejecutable se definen como un todo.

Las metodologías actuales se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- *Metodologías basadas en la ingeniería del conocimiento.* Algunas de estas metodologías son: CommonKADSR [Schreiber et al. 1994], coMoMAS [Glaser 1996] y MAS-CommondKADS [Iglesias et al. 1996].
- *Metodologías orientadas a agente*³⁸: Gaia y su extensión ROADAP, SODA, MESSASE, INGENIAS, Tropos, Prometheus, Mase, etc.

Las metodologías basadas en el conocimiento presentan dificultades prácticas para el diseño de funcionalidades especificadas de los agentes debido al contexto en el que fueron diseñadas. Las metodologías orientadas a agentes han sido diseñadas considerando las propiedades y arquitectura de los agentes descritas en los apartados 1.2.1 y 1.2.5. La mayoría de las metodologías orientadas a agentes son extensiones de la tecnología orientada a objetos. El análisis y diseño orientado a objetos ha sido extensivamente estudiado y desarrollado. Sin embargo no es completamente extrapolable al desarrollo de SMA debido a que a pesar de que agentes y objetos tienen ciertas similitudes, tienen también ciertas diferencias significativas. Así por ejemplo, la propiedad de la pro-actividad de un agente no es, entre otros, un aspecto contemplado en las metodologías orientadas a objetos. Sin embargo, existen otros aspectos relevantes de los métodos y notaciones de la programación orientada a objetos que han servido para inspirar métodos de análisis y diseño orientado a agentes. Tal es el caso del *Proceso Unificado Racional (RUP)* que tiene una similar aplicación como proceso iterativo para el refinado progresivo de las distintas fases del modelado de sistemas multiagente. De la misma forma ocurre con el concepto de escenarios de casos de uso que tiene una aplicación similar en el modelado orientado a objetos, o la notación AUML³⁹ utilizada para representar las interacciones entre distintos agentes y que es una extensión de la notación UML.

En [Cernuzzi y Rossi 2002, Sturmy y Shehory 2004, Luck et al. 2004] se llevan a cabo diversos análisis comparativos de las principales metodologías. Con el fin de ilustrar las particularidades de la metodología empleada en esta Tesis para el modelado de los escenarios de tráfico aéreo en áreas terminales, se describen a continuación las características

³⁸Algunos autores como [Luck et al. 2004] consideran únicamente como metodologías orientadas a agente a Gaia-ROADAP y SODA. El resto de metodologías de este grupo son incluidas en una categoría diferente denominada Extensiones de la Metodología Orientada a Objetos.

³⁹La notación AUML (Agent Unified Modeling Language) extiende la notación de UML para representar aspectos específicos de la interacción de los agentes tales como las actuaciones que emergen de ellos mismos entre otras (<http://www.auml.org>).

más significativas de dos de las más extendidas: INGENIAS y Prometheus. Ambas metodologías integran a metodologías anteriores a ellas. Además las dos están basadas en el modelo RUP [Jacobson et al. 2000] y proporcionan un alto nivel de detalle tanto para el diseño como para la implementación de SMA.

1.2.6.1. Metodología INGENIAS

INGENIAS es una metodología desarrollada a partir de otra anterior denominada MESSAGE. MESSAGE [Caire et al. 2002] propone analizar y diseñar un SMA considerando cinco puntos de vista denominados meta-modelos. La metodología INGENIAS⁴⁰ extendió y validó los meta-modelos de MESSAGE mediante la experimentación y el desarrollo de diversos casos de estudio [Pavón y Gómez-Sanz 2003]. Los meta-modelos o puntos de vista considerados en la metodología INGENIAS para el modelado de SMA son los siguientes:

1. *Agente*: este meta-modelo describe los distintos tipos de agente en términos de sus estados mentales.
2. *Organización*: describe la forma de agrupamiento de los agentes y la funcionalidad del sistema para lograr finalmente la estructura que determina la arquitectura del SMA.
3. *Entorno*: define los elementos que existen alrededor del sistema y cómo son percibidos por el agente.
4. *Tareas y Objetivos*: Especifica las tareas que ejecuta cada agente según su estado mental.
5. *Interacciones*: detalla los aspectos de coordinación y comunicación entre agentes.

La elaboración de los modelos de INGENIAS se generan de forma iterativa e incremental partiendo de la arquitectura del sistema (o meta-modelo de organización) de acuerdo a las etapas indicadas en la tabla 1.3 [Pavón et al. 2005].

Como se aprecia en dicha tabla, esta metodología no proporciona pautas concretas para definir la especificación del sistema. Por eso, cuando el sistema a modelar presenta un cierto grado de complejidad, la fase de análisis podría requerir un trabajo previo para establecer dicha especificación. Esta es una de las razones por las cuales en esta Tesis se ha optado por la metodología *Prometheus* que a continuación se describe.

⁴⁰Una información más detallada sobre la metodología INGENIAS se puede encontrar en la dirección url del Grupo de Agentes de Software: Ingenierías y Aplicaciones (GRASIA), <http://grasia.fdi.ucm.es>.

		FASES		
		Inicio	Elaboración	Construcción
Análisis	<ul style="list-style-type: none"> • Generar casos de uso e identificar realizaciones de los casos de uso con modelos de interacciones • Esbozar la arquitectura con un modelo de organización • Generar modelos del entorno para trasladar la captura de requisitos a los modelos 	<ul style="list-style-type: none"> • Refinar casos de uso • Generar modelos de agentes para detallar los elementos de la arquitectura • Continuar con los modelos de organización identificando flujos de trabajo y tareas • Modelos de tareas y objetivos para generar restricciones de control (objetivos principales, descomposición de objetivos) • Refinar modelo de entorno para incluir nuevos elementos 	<ul style="list-style-type: none"> • Estudiar resto de casos de uso 	
	Diseño	<ul style="list-style-type: none"> • Generar un prototipo con herramientas de prototipado rápido, como ZEUS o Agent Tool 	<ul style="list-style-type: none"> • Centrar el modelo de organización en el desarrollo de flujos de trabajo • Llevar las restricciones e identificadas a modelos de tareas y objetivos para dar detalles acerca de las necesidades y resultados de las tareas y su relación con los objetivos del sistema • Expresar la ejecución de tareas dentro de modelos de interacción • Generar modelos de agente para detallar patrones de estado mental 	<ul style="list-style-type: none"> • Generar nuevos modelos de agente o refinar los existentes • Depurar la organización centrandolo en las relaciones sociales

Tabla 1.3: Etapas de modelado INGENIAS

1.2.6.2. Metodología Prometheus

Esta metodología cubre todo el proceso de diseño e implementación de agentes inteligentes. La metodología contempla tres fases (figura 1.10): especificación del sistema, diseño de arquitectura y diseño detallado [Padgham y Winikoff 2004].

Especificación del sistema: En esta etapa se definen los *objetivos* o metas del sistema así como las *funcionalidades* requeridas para lograrlos. También se especifican las

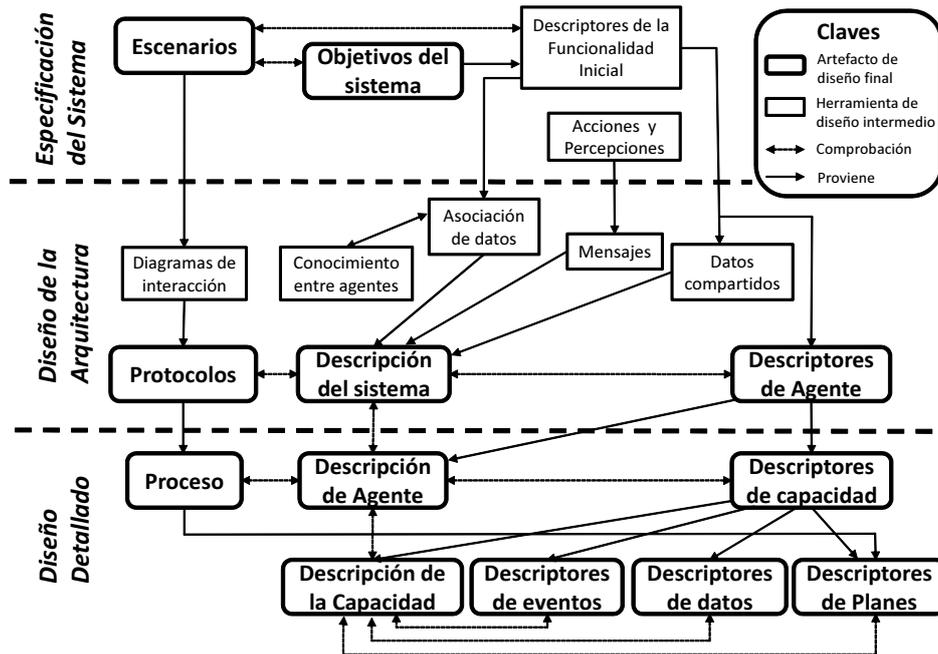


Figura 1.10: Etapas de la metodología Prometheus

características del interfaz entre el sistema y su entorno en términos entradas (*percepciones*) y salidas (*acciones*) del sistema. La identificación y el refinamiento de los objetivos se realizan de forma iterativa a partir de la definición de distintos *escenarios* de casos de uso. Los *escenarios* ilustran el modo de operación de dicho sistema. El concepto de escenario (o escenario de casos de uso) procede de las metodologías *software* orientadas a objetos, pero con una estructura ligeramente adaptada que proporciona una visión más integrada que el mero análisis del sistema aislado.

Diseño de arquitectura: En esta fase se determina qué tipo de agentes contendrá el sistema y se captura la estructura general del sistema y su comportamiento dinámico. La identificación de agentes y la especificación de sus características (recogidas a través de descriptores) se realiza a partir del agrupamiento de funcionalidades que comparten el mismo tipo de datos. La descripción de la estructura del sistema se representa mediante un diagrama en el que se señalan los agentes que lo constituyen así como los mensajes y datos compartidos entre los agentes y sus respectivas acciones y percepciones. El comportamiento dinámico del sistema se describe a través de protocolos de interacción entre los agentes. Estos protocolos pueden representarse mediante diagramas AUMML cuyo diseño inicial se apoya en diagramas que muestran las interacciones de los agentes en distintos escenarios de casos de uso.

Diseño detallado: En esta fase se describe la arquitectura interna del agente y los procesos que este lleva a cabo internamente. El aspecto central de esta etapa consiste

en definir las capacidades, eventos internos, planes y estructuras de datos detallada. Las capacidades son módulos dentro del agente que utilizan o proporcionan tipos de datos afines. Las capacidades pueden estar jerarquizadas dentro de otras capacidades de forma que en este diseño detallado, el agente tendrá un número arbitrario de capas de una complejidad comprensible en cada nivel. De este modo, las capacidades están constituidas por otras sub-capacidades o bien, a nivel inferior por planes, eventos y datos. Los planes recogen el conjunto de tareas que se realizan para lograr un fin determinado. Además, están disparados por determinados eventos (mensajes internos o externos, percepciones, etc.). Como resultado de esta fase se obtienen diagramas generales de cada uno de los agentes (que muestran las capacidades a nivel superior del agente), diagramas de capacidades, descriptores detallados de los planes y descriptores de los datos.

Por otra parte, la herramienta *Prometheus Design Tool* (PDT) facilita las tareas del desarrollador a lo largo de las etapas anteriores proporcionando información sobre las posibles inconsistencias durante el diseño [Padgham y Winikoff 2008]. Dicha herramienta es capaz, además, de generar de forma automática esqueletos de código del modelo en el lenguaje orientado a agentes JACK que más adelante se describe.

La metodología *Prometheus* ha sido utilizada para el análisis y modelado del escenario de tráfico objeto de esta Tesis. Las razones para elegir esta metodología frente a las demás son fundamentalmente las siguientes:

- Su alto nivel de detalle en las orientaciones prácticas proporcionadas para obtener la especificación inicial del sistema a modelar.
- Las pautas para integrar los protocolos de interacción y los agentes en la arquitectura del sistema.
- La modularidad lograda de la arquitectura interna de los agentes alrededor del concepto de capacidades. Esta modularidad ofrece dos ventajas adicionales: *(i)* una correspondencia directa entre cada una de las capacidades del agente y la descripción funcional de los sistemas utilizados en las aeronaves o en los sistemas de tierra para gestionar sus respectivos procedimientos y *(ii)* la posibilidad de desarrollar un sistema más complejo y jerarquizado bien mediante la implementación de nuevos planes en las capacidades definidas, o bien rediseñando el agente y sus correspondientes capacidades como un nuevo sistema multiagente con sus correspondientes agentes.

1.2.6.3. Herramientas para la implementación de SMA

Uno de los lenguajes de programación más usados para la implementación de sistemas multiagente es Java, aunque también se utilizan C++, TCL y SmalTalk. El uso extendido de Java obedece principalmente al amplio uso de aplicaciones basadas en SMA que hacen uso de Internet. Siguiendo la filosofía de Java de ofrecer bibliotecas de clases para la interfaz de usuario, comunicaciones, etc., se han desarrollado plataformas que proporcionan clases y métodos específicos para la implementación genérica de un SMA. Estas plataformas utilizan los lenguajes de programación anteriores e incorporan librerías propias para la creación de agentes y para la gestión y monitorización de su ciclo de vida.

En los últimos años también se han realizado esfuerzos para estandarizar plataformas de agentes. Para ello se han creado diversos organismos tales como *OMG (Objet Management Group)*, *KSE (Knowledge Sharing Effort, Agent Society)* y *FIPA (Foundation of Intelligent Physical Agent)*. Las especificaciones desarrolladas por FIPA son actualmente las más extendidas y proporcionan pautas acerca de cómo gestionar los agentes dentro de la plataforma, cómo realizar la comunicación entre los agentes, cómo transportar los mensajes entre agentes, etc. El núcleo de las especificaciones FIPA lo constituye la especificación del lenguaje de comunicación entre agentes *FIPA-ACL (FIPA -Agent Communication Language)*, citada en la sección 1.2.4.

Una de las plataformas más extendidas es la plataforma JADE (Java Agent Development Environment) [Bellifemine et al. 2007]. Esta plataforma proporciona un conjunto de librerías para crear agentes que pueden comunicarse entre sí utilizando el lenguaje FIPA ACL. Estas librerías también incluyen varios agentes ya implementados cuya finalidad es la de facilitar la gestión de los agentes de una aplicación específica (por ejemplo manteniendo un registro de todos los agentes del SMA y de los servicios que proporcionan). El razonamiento interno de los agentes JADE se lleva a cabo mediante la implementación de un conjunto de clases Java denominadas comportamientos (*behaviours*)⁴¹. JADE no presupone una determinada arquitectura interna de los agentes, si bien la implementación basada en comportamientos resulta especialmente apta para agentes reactivos. Sin embargo es posible combinar JADE con herramientas como JESS (*Java Expert System Shell*) o DROLLS para dotar a los agentes de inteligencia⁴². El aspecto más destacable de JADE es

⁴¹ Así por ejemplo, las tareas a realizar se pueden programar modificando el método *action()* de la clase *behaviours*. Los comportamientos disponen de otros métodos de forma que las tareas se puedan ejecutar una única vez o bien de forma cíclica o periódica. También es posible construir arquitecturas de comportamientos complejos a partir de otros comportamientos más simples, dando lugar a comportamientos que se ejecutan secuencialmente, en paralelo o como una máquina de estados finitos.

⁴² Jess dota a las aplicaciones de razonamiento a partir de reglas que tratan con la información inicial que tienen, permitiendo que la aplicación pueda adquirir conocimientos por sí misma. En este caso, en las librerías de JADE existe un comportamiento que permite el uso de JESS como un motor de razonamiento del agente. Así por ejemplo, es posible controlar la activación y desactivación de comportamientos JADE mediante la implementación de una arquitectura mixta deliberativa-reactiva donde JESS juega el papel

que proporciona una infraestructura que facilita la implementación los aspectos relativos a la comunicación entre agentes, dejando abierta a criterio del diseñador el desarrollo de la arquitectura interna del agente.

Por otra parte, existe una versión extendida de JADE (JADEX) que permite estructurar el razonamiento interno del agente de acuerdo a una arquitectura BDI [Braubach y Pokahr 2002]. En este caso, las creencias, deseos y planes de cada agente son descritas a través de una plantilla XML, proporcionando así una visión de la arquitectura del agente. Asimismo, el comportamiento dinámico que recoge las tareas correspondientes a cada plan se codifica directamente dentro de clases Java específicas de JADEX denominadas planes. Al ejecutar un agente en la plataforma JADEX, éste inicializa sus creencias, objetivos y planes a partir del fichero XML de definición de agente. Además crea e inicia diversos comportamientos JADE especialmente diseñados para gestionar los datos de los agentes y las tareas programadas en los planes. Una descripción más detallada sobre la implementación de JADEX a partir de agentes JADE se puede encontrar en [Pokahr et al. 2003]⁴³.

Además de las dos plataformas anteriores cabe citar a otras como JACK. Esta plataforma es un entorno de desarrollo de agentes que opera como una extensión del programa Java para proporcionar conceptos referentes a agentes [Howden et al. 2001]. Los agentes en JACK están basados en la arquitectura BDI bajo el estándar FIPA. Los elementos principales de este entorno de desarrollo son los siguientes:

- El lenguaje de agente JACK consistente en un superconjunto de lenguaje Java que introduce una nueva semántica y sintaxis, nuevas clases base, interfaces y métodos para tratar con conceptos orientados a agentes.
- El compilador de JACK que compila el lenguaje de agente JACK hacia un lenguaje Java de modo que los agentes puedan operar sobre cualquier plataforma Java.
- El kernel del agente JACK: programa en tiempo de ejecución dentro del cual los agentes JACK operan y proporciona la funcionalidad subyacente que está definida en el lenguaje de agente JACK.

Por otra parte, el hecho de trasladar las especificaciones de diseño a especificación del sistema para su implementación no es una cuestión trivial debido a que el análisis y diseño depende notablemente de la metodología usada, mientras que la implementación

deliberativo mientras que los comportamientos de JADE representan el rol reactivo.

⁴³En realidad JADEX considera dos capas en la arquitectura del agente: una capa superior de carácter deliberativo, que en función de los eventos externos, la experiencia acumulada y las acciones realizadas toma una serie de decisiones (alcanzar un objetivo, realizar una acción, etc.); y una capa inferior a nivel de ejecución de tareas de un agente que se llevan a cabo a partir de eventos internos que resultan del proceso de toma de decisión.

depende de la plataforma para la ejecución de la aplicación⁴⁴. Sin embargo, el grado de madurez de las metodologías INGENIAS como la Prometheus facilitan la traducción de las especificaciones de diseño a código ejecutable. Ambas metodologías proponen convertir la configuración y el desarrollo de los procesos de generación de código en una tarea más del proceso de desarrollo del SMA.

La metodología INGENIAS incluye un conjunto de herramientas -el INGENIAS Development Kit (IDK)- construido sobre los meta-modelos. El IDK facilita la codificación final mediante el empleo de plantillas o armazones software. Para ello dispone de un editor de especificaciones y varios ejemplos de generación de código para diferentes plataformas, siendo la plataforma base la plataforma JADE. Estos ejemplos constituyen el esqueleto del código (o plantillas), que el desarrollador puede modificar de forma segura. La implementación de las especificaciones se realiza de forma iterativa sobre un módulo que contiene las plantillas sobre las cuales se vuelca toda la información de las especificaciones. Dicha información se obtiene mediante un algoritmo que recorre los diagramas y extrae de ellos la información relativa a las especificaciones. Como consecuencia de todo el proceso se logra un sistema de agentes ejecutable sobre JADE.

Por otra parte, el diseño *Prometheus* es directamente extrapolable a lenguaje JACK. Este código es generado automáticamente por la herramienta de ayuda PDT de *Prometheus*. No obstante, nivel de detalle logrado con el diseño *Prometheus* facilita la implementación del modelo en cualquiera de las otras dos plataformas citadas anteriormente.

1.3. Aplicaciones de las técnicas orientadas a agentes al análisis y modelado del futuro ATM

La naturaleza dinámica del tráfico aéreo así como la distribución geográfica y funcional del mismo han sido objeto en la última década de numerosas propuestas que plantean soluciones basadas en la *teoría de agentes*. La mayoría de estas propuestas abordan aspectos ligados a los conceptos operacionales del futuro descritos en la sección 1.1.3.2. También se han desarrollado algunas aplicaciones de usuario tales como la herramienta OASIS (Optimal Aircraft Sequencing using Intelligent Scheduling) [Ljungberg y Lucas 1992].

Comenzando por esta última, hay que señalar que OASIS es un sistema utilizado en el aeropuerto de Sydney para ayudar a los controladores en la secuenciación de aeronaves de llegada. El sistema está constituido por un conjunto de agentes con funcionalidades diferenciadas. Unos agentes utilizan los datos radar para realizar estimaciones de los tiempos de paso de las aeronaves por distintos puntos de la ruta de llegada. A partir de dichas

⁴⁴Un análisis detallado de las distintas herramientas que tratan de unir los dos extremos del problema se puede encontrar en el *capítulo 3* de [Luck et al. 2004].

estimaciones, estos agentes proponen al operador de control diversas estrategias basadas en la modificación de los tiempos de paso con el fin de optimizar el flujo de llegada. A su vez, otros agentes del sistema se encargan de hacer un seguimiento de la evolución espacio-temporal de los vuelos a los efectos de detectar y notificar posibles divergencias entre los tiempos asignados a cada aeronave y los tiempos reales.

Las demás aportaciones recogen aspectos analíticos así como propuestas conceptuales y de prototipado de subsistemas para el futuro ATM. Las aportaciones, descritas a continuación, han sido clasificadas en tres categorías: *(i)* análisis de esquemas de negociación entre agentes en escenarios de tráfico aéreo, *(ii)* análisis de sistemas de aviónica para los escenarios de gestión distribuida del tráfico aéreo y *(iii)* sistemas de simulación para el análisis de conceptos avanzados de tráfico aéreo.

1.3.1. Análisis de esquemas de negociación en escenarios de tráfico aéreo

Dentro de esta categoría las aportaciones se pueden considerar a su vez clasificadas en dos grupos. En el primer grupo se encuentran los trabajos de Wangerman y Stengel en los que se presupone que la comunicación es únicamente entre aeronave y sistema de tierra [Wangerman y Stengel 1998, Wangerman y Stengel 1999]. En el segundo grupo se incluyen los trabajos en los que se contempla la comunicación aire-aire entre aeronaves [Harper et al. 1999].

Los trabajos de Wangerman y Stengel analizan el comportamiento dinámico de un sistema aeronave/espacio aéreo considerado como un sistema inteligente (Intelligent Aircraft/Airspace System o IAAS). Este sistema está constituido por tres tipos de agentes: las compañías aéreas, las aeronaves y los gestores de tráfico. El comportamiento dinámico de los agentes del IAAS se analiza desde la perspectiva de la Teoría de Juegos. Este análisis muestra la existencia de un esquema de optimización iterativo que podría ser resuelto de forma satisfactoria mediante una aproximación distribuida. En este contexto, los principios de negociación constituyen una manera de implementar procesos iterativos de optimización distribuida en las operaciones del IAAS.

Los objetivos principales de aeronaves y compañías aéreas consisten en maximizar sus respectivas funciones de utilidad de modo que son considerados como agentes “*maximizadores*”. En cambio los agentes gestores de tráfico (cuyas funciones se consideran centralizadas en un único agente controlador de tráfico), tienen la responsabilidad de garantizar el mantenimiento de la distancia de separación de seguridad entre todas las aeronaves. En este caso el agente controlador de tráfico es considerado como agente “*satisficer*”⁴⁵.

⁴⁵Este término, que no tiene traducción directa al castellano, es utilizado por los autores para definir, de acuerdo a la teoría de satisfacción de Krosnicks [Krosnick 1991], a aquellos agentes que usan la estrategia

1. Introducción y motivación

La maximización de la función de utilidad de las aeronaves consiste en minimizar una función de coste, definida por los pilotos o la propia compañía. Así, la función a minimizar para una aeronave de transporte civil podría consistir en el coste de la operación de vuelo (que es un compromiso entre tiempo de vuelo y consumo de combustible), mientras que para un avión de negocios la función de coste podría ser el tiempo de vuelo y el confort. Como resultado de la optimización de la función de coste se obtiene una trayectoria específica para cada aeronave en particular (ruta horizontal, altitud y velocidades). Esta trayectoria se convierte en la estrategia⁴⁶ de la aeronave.

La función de coste de la compañía evalúa el coste de las operaciones de su flota de aeronaves en vuelo. La optimización de esta función da lugar a la estrategia de la compañía. Esta estrategia se define mediante un vector de parámetros de optimización (niveles de vuelo, velocidades, tiempos de llegada, etc.) que le son proporcionados a cada aeronave. De esta forma la estrategia de la aeronave está ligada a la estrategia de su compañía. Además, la función de coste de la aeronave puede ser modificada durante el vuelo a instancias de la compañía debido a situaciones no previstas en la planificación inicial del vuelo (por ejemplo, los retrasos en las operaciones de vuelo supone considerar nuevamente otros costes como las pérdidas de conexiones con otros vuelos, reasignaciones de tripulaciones de vuelo, etc.).

El problema para cada aeronave perteneciente a un conjunto total de aeronaves N en una determinada región de vuelo, consiste en maximizar la función de utilidad eligiendo la mejor estrategia del conjunto de estrategias viables (es decir, aquellas trayectorias que mantengan la separación de seguridad respecto a las demás aeronaves). Cualquier cambio de estrategia requiere, además, la aprobación del agente control de tráfico como encargado de verificar que dicho cambio no causa conflictos con las otras trayectorias.

Para resolver el problema anterior [Wangerman y Stengel 1996] propone un esquema de optimización distribuida en la que los agentes generan opciones y evalúan las propuestas que mejor se adaptan a sus preferencias sobre una función de utilidad multi-atributo y un esquema de árbol de decisión. Los resultados de las simulaciones presentadas en [Wangerman y Stengel 1996] pusieron de manifiesto que la optimización distribuida se adapta bien a la naturaleza del sistema AAS mejorando notablemente los resultados respecto a los métodos centralizados. La optimización distribuida permitió a los agentes maximizadores mayor grado de libertad para optimizar sus propias estrategias, e hizo posible la coordinación de los vuelos de diversas aeronaves sin la necesidad de la interven-

de intentar encontrar criterios de adecuación más que identificar una solución óptima.

⁴⁶En teoría de agentes el término estrategia es más amplio en el sentido que abarca el conjunto de métodos utilizados para encontrar el plan que le permita lograr sus metas. Así, dentro de un modelo BDI la trayectoria formaría parte de las intenciones de la aeronave, mientras que el término se refiere al método utilizado por el agente para encontrar el plan que le permita ejecutar dicha trayectoria.

ción del ATC excepto para la aprobación de propuestas. Este trabajo aportó los primeros datos en los que se muestran las ventajas de que en determinadas situaciones sean las aeronaves las que resuelvan por sí mismas situaciones de conflictos. Por otra parte, comparando las características de la optimización basada en principios de negociación respecto a los esquemas de optimización descentralizados [Wangerman y Stengel 1999] se concluye que los principios de negociación: *(i)* producen soluciones tan buenas como las producidas por los esquemas centralizados que tienen un completo conocimiento de las funciones de utilidad de todos los agentes, *(ii)* no requieren que un agente deba tener un conocimiento de las funciones de utilidad de los demás agentes y tampoco fuerza a un agente a cambiar a un plan de acción con una utilidad inferior *(iii)* se muestran más eficientes frente a los esquemas centralizados que no tienen un conocimiento completo de las funciones de utilidad individuales y *(iv)* se adaptan bien a situaciones con un elevado número de agentes interactuando.

En [Wangerman y Stengel 1998] se desarrolla un modelo gestión de tráfico aéreo basado en principios de negociación. Para ello se analiza el comportamiento de un agente negociador proponiendo una estructura interna así como una arquitectura de la organización de los agentes dentro de un IAAS. Según los autores, al análisis de la arquitectura interna de los agentes podría servir de base para desarrollar sistemas inteligentes que proporcionen asistencia a los operadores humanos (pilotos, controladores, operadores) o para los sistemas que operan autónomamente bajo la supervisión humana.

En dicho trabajo, se analiza el comportamiento del agente identificando sus funciones de acuerdo a un modelo cognitivo de los procesos de toma de decisión y control [Stengel 1993]. Según este modelo, toda acción humana es el resultado de una jerarquía de procesos o funciones de tres tipos: declarativos, procedimentales o reflexivos. Los procesos declarativos son aquellos que sugieren acciones conscientes del agente. Las funciones procedimentales se refieren a las que procesan el conocimiento pero no dependen del consciente (es decir se realizan de forma inconsciente o procedimental a partir de dichos datos). Por último las funciones reflexivas hacen referencia a aquellas funciones dirigidas a lograr los objetivos del agente de forma reactiva o como respuesta a estímulos externos.

Las funciones declarativas de un agente inteligente pueden ser modeladas por sistemas expertos [Belkin y Stengel 1987, Stengeul y Niehaus 1989, Stengel 1993]. Las funciones de procedimiento y reflexivas son consideradas como funciones colaterales con las que interactúa el sistema experto para volcar u obtener información. Para establecer las reglas de base del sistema experto, en [Wangerman y Stengel 1999] se clasificaron las tareas en cuatro grupos principales: tareas de emergencia, tareas de un modo de operación específico, tareas de negociación y tareas de rutina. Las reglas base propuestas por los autores para dirigir el proceso de negociación constituyen un subconjunto de reglas dentro de la

1. Introducción y motivación

jerarquía de reglas base del sistema experto.

En [Harper et al. 1999] se propone un modelo orientado a agentes de un ATM en un entorno de *vuelo libre* así como un modelo de toma de decisión distribuida para la resolución de conflictos en dicho ATM. La arquitectura del modelo ATM está constituida por agentes piloto y un agente ATC. Estos agentes contienen representaciones simplificadas del procesado de información y de evaluación de la situación aplicadas a la detección de conflictos. También contienen información detallada de modelos que aplican esquemas de toma de decisión distribuida en la resolución de conflictos entre dos aeronaves en el plano horizontal. La particularidad de este trabajo radica en que el proceso de negociación aplicado está gobernado por un conjunto de reglas que rigen el curso de la negociación desde que el conflicto es detectado hasta que se ejecuta un plan para resolverlo. Este sistema de reglas se apoya en la definición previa de los siguientes conceptos:

1. *Grado de autonomía del piloto*. Se definen tres niveles para representar los efectos de la autonomía del piloto sobre los procesos de toma de decisión. En el nivel 1 de autonomía el piloto solo actúa de acuerdo con las instrucciones ATC, mientras que en el nivel 3 el piloto tiene libertad para buscar y negociar soluciones con otros que tengan similar autonomía y para proponer las soluciones al ATC antes de ser implementadas.
2. *Propuesta de agente principal*, que establece los criterios para decidir qué agente debe tomar la iniciativa en la búsqueda de una solución al conflicto.
3. *Lógica de reacción del ATC*, que establece las posibles acciones del ATC en respuesta a un conflicto detectado según la inminencia del mismo y el nivel de autonomía de los pilotos.

Los niveles de autonomía permitieron analizar los efectos de cada nivel sobre los entornos de equipamiento mixto para estrategias de resolución de conflictos en la auto-separación de aeronaves autónomas. El análisis demostró que es posible la auto separación efectiva de las aeronaves con una mínima implicación del ATC. Sin embargo cuando la aeronave presentaba baja autonomía, el ATC debía implicarse directamente en el proceso de negociación, en la medida en que la autonomía de la aeronave no le permite llevar a cabo una auto-separación efectiva. Por otro lado, variando las reglas aplicadas a un problema con una geometría particular del conflicto, se pudo identificar las funcionalidades básicas requeridas por los sistemas a bordo para soportar la toma de decisiones colaborativa en entornos ATM de vuelo libre.

1.3.2. Sistemas para operaciones autónomas en cabina.

En esta categoría se encuentran los trabajos que proponen diseñar sistemas de aviónica basados en sistemas multiagente. Los desarrollos propuestos consisten en sistemas para la resolución de conflictos y de asesoramiento a la tripulación a través de avisos y recomendaciones [Shandy y Valasek 2001, Rong et al. 2002, Rong et al. 2003]. En general, estos agentes no comunican con otros agentes o entidades externas aparte del piloto.

En [Shandy y Valasek 2001] se propone un diseño de agente de tráfico inteligente desarrollado para detectar y resolver conflictos a bordo de aeronaves en un ambiente de *vuelo libre*. Este agente emplea un algoritmo de optimización de sendas que es guiado por un sistema experto basado en conocimiento. El algoritmo proporciona maniobras de evasión verticales y horizontales que cumplen con restricciones previas respecto a máximo régimen de ascenso, mínima desviación lateral, etc. El modelo fue probado para la resolución de conflictos entre dos aeronaves. El trabajo sólo pretende aportar datos sobre la viabilidad de la combinación de sistemas expertos y rutinas de optimización en la resolución de conflictos. También sugiere que la combinación de sistemas expertos basados en el conocimiento y la teoría del control óptimo proporciona una metodología de prototipado rápido para desarrollar agentes evitadores de conflictos. El sistema experto es quien asume la iniciativa en la toma de decisiones y determina las acciones requeridas para la detección y evitación del conflicto. El control óptimo es utilizado para generar la trayectoria óptima que evita el conflicto de acuerdo a los criterios asignados por el sistema experto. Los resultados de las pruebas realizadas muestran que la combinación de ambos métodos resultan eficientes y efectivos.

Una extensión del trabajo anterior se presenta en [Rong 2002], donde se propone un diseño de agente ejecutivo que resuelve conflictos tanto respecto al tráfico como a las zonas de meteorología adversa. Para ello sugiere una arquitectura jerárquica de agentes en la que existe un agente ejecutivo que toma decisiones a partir de la información producida por un agente de tráfico propuesto por [Shandy y Valasek 2001] y por un agente meteorología. El agente meteorología se encargaría de calcular las sendas óptimas de vuelo que aseguren la seguridad de la aeronave. El agente de guiado ejecutivo actúa como un árbitro de alto nivel que decide y resuelve, a partir de los conflictos detectados y soluciones aportadas por los agentes tráfico y meteorología. Este agente ejecutivo dispone de un conjunto de reglas de lógica difusa para priorizar entre conflictos tácticos y estratégicos debidos a la meteorología y al tráfico.

En [Rong et al. 2002] el problema de la detección y resolución del conflicto en un sistema multiagente multiaeronave es abordado por cada aeronave como un problema de satisfacción de restricciones. El método para solucionar dicho problema consiste en una negociación basada en argumentación entre parejas de aeronaves. Como futuros trabajos

se propone extender el modelo a escenarios más complejos que contemplen la negociación entre múltiples aeronaves con diferentes tipos de requerimientos operacionales.

Por último, en [Painter 2002] se caracterizan las capacidades requeridas de los futuros sistemas de gestión de vuelo (FMS) en cabina. Para ello se lleva a cabo un análisis orientado a agentes (identificando sus ventajas respecto a un análisis orientado a objetos) del proceso de navegación aérea en operaciones de llegada y en entornos de gestión de distribuido. El análisis de los requerimientos de dicho FMS se realiza asociando los mencionados requerimientos a un conjunto de agentes cooperativos: agente planificador de vuelo, agente de navegación, agente meteorología, agente tráfico, agente terreno, agente de compatibilidad de trayectoria, agente negociador. El análisis de estas capacidades fue posteriormente extendido a los sistemas de automatización para salidas y llegadas en aeropuertos no controlados [Ding et al. 2003].

1.3.3. Sistemas de simulación para el análisis de conceptos avanzados de tráfico aéreo

Como ya se ha indicado en la sección 1.2, la simulación de escenarios de tráfico aéreo tanto en tiempo acelerado como en tiempo real ha sido usada para diseñar y validar procedimientos y sistemas. Entre los trabajos sobre plataformas de simulación de escenarios de tráfico aéreo distribuido se encuentran los realizados conjuntamente por la Universidad del Estado de San José de EEUU y el centro Ames de la NASA [Prevot 2002, Callantine et al. 2006]. Dichos Centros han desarrollado un sistema de control multiaeronave utilizado para incrementar el realismo y la flexibilidad de las simulaciones HITL. La plataforma está constituida por un conjunto de estaciones independientes programadas en Java que proporcionan interfaces de usuario y vistas para los pilotos, controladores, compañías, gestores del experimento y otros observadores. Cada estación puede ser un dispositivo de entrada de fidelidad media, un agente autónomo o una pantalla de visualización para cualquiera de las perspectivas de la simulación de gestión de tráfico aéreo distribuido. A partir de esta arquitectura se pretende llevar a cabo un prototipado rápido de interfaces de usuario, controladores de tráfico aéreo así como sistemas de gestión de vuelo o funciones de guiado. En [Prevot 2002] se describen las vistas del piloto y del ATC desde un punto de vista funcional, mientras que en [Callantine et al. 2006] se analiza el modelo de agente de ATC identificando roles y responsabilidades en futuros sistemas ATM.

Otro desarrollo de una arquitectura funcional de un sistema de simulación de conceptos de espacio aéreo (ACES⁴⁷) es presentado en [Sweet et al. 2002]. El sistema ACES es

⁴⁷ACES: Airspace Concept Evaluation System

un sistema para la simulación en tiempo acelerado destinado a diseñar y evaluar nuevos conceptos operacionales. ACES no está pensado como una aplicación cerrada sino como una arquitectura modular que permite la progresiva incorporación de distintos modelos a los diferentes elementos que componen el sistema de espacio aéreo de EEUU (sistema NAS⁴⁸). Para ello ACES utiliza una arquitectura de alto nivel junto a un modelado basado en agentes para realizar simulaciones distribuidas del sistema de espacio aéreo. Cada modelo representa un aspecto particular del sistema: meteorología, comportamiento humano, dinámica de aeronave, planificación de vuelo, carga de trabajo del controlador, etc. Con el fin de facilitar la integración de los modelos anteriores, ACES añade a la arquitectura un modelado basado en agentes. De esta forma cada uno de los modelos anteriores cae dentro de una de las tres categorías básicas: Agente, Infraestructura o Entorno. Los modelos que representan a participantes en el sistema son considerados agentes (es decir, ATC, ATFM, ATM, operadores de compañías y aeronaves). Los modelos de infraestructura se refieren a componentes que operan entre dos agentes o entre un agente y el entorno (por ejemplo, los sistemas CNS, el sistema de predicción meteorológica, etc.). Finalmente el entorno contiene al resto de los modelos (definiciones de espacio aéreo, localizaciones de aeropuerto, meteorología actual, etc.). De este modo los agentes operan dentro del entorno del sistema de espacio aéreo y se comunican entre sí y con el medio a través de la infraestructura.

Actualmente existe un prototipo de la arquitectura ACES y un conjunto de aplicaciones para capturar en modelos específicos la infraestructura y el entorno del NAS. Sin embargo las tareas de diseño de modelos de agentes no ha sido desarrollada aún.

En un trabajo posterior se propone modelar la infraestructura CNS/ATM del sistema ACES también desde la perspectiva orientada a agentes [Satapathy y Manikonda 2004]. Para ello, se plantean dos aproximaciones. En la primera de ellas varias entidades CNS son modeladas como agentes; en particular se presenta un análisis de cómo modelar estas entidades apoyándose en un ejemplo práctico de desarrollo de un agente de comunicación. En la segunda aproximación se discute la opción de incorporar la arquitectura CNS como un único agente de infraestructura.

También en [Canino et al. 2007] se presenta el diseño de un simulador de tráfico aéreo experimental implementado como un SMA en un entorno JADE. La arquitectura del simulador está inspirada en la de los simuladores convencionalmente utilizados para el entrenamiento del personal responsable del Control de Tráfico Aéreo y está constituida por los agentes: aeronave, pseudopiloto, ATC, meteorología, terreno y configuración. En este caso se implementa el comportamiento dinámico de las aeronaves y una infraestructura básica de comunicaciones entre todos los agentes. La aerodinámica de las aeronaves se basa en

⁴⁸El sistema NAS (National Airspace) se refiere al conjunto de sistemas, usuarios y recursos del espacio aéreo de EEUU.

el modelo de rendimiento de aeronave BADA [Glover y Ligeros 2004, Eurocontrol 2009a]. Cada aeronave ejecuta su trayectoria de acuerdo planes de vuelo 3D o vectores de vuelo (rumbo, altitud y/o velocidad). Mediante mensajes aire-tierra se envían al ATC los parámetros de navegación de cada aeronave. Las comunicaciones tierra-aire consisten en instrucciones o información de conflictos detectados por el ATC y en información sobre parámetros atmosféricos y rutas de llegada enviados por los agentes meteorología y terreno respectivamente. El agente pseudopiloto es un interfaz de usuario a través del cual un único operador puede acceder al control de varias aeronaves desde una misma consola de vuelo. El objetivo de este simulador es la de servir de plataforma para la incorporación progresiva de mecanismos de toma de decisión en los agentes. Sin embargo, y al igual que en los casos anteriores, introducción de estos mecanismos de toma de decisión en aeronaves y ATC precisa de un diseño detallado previo de nuevos escenarios operacionales en los que se especifiquen los roles y funciones de los agentes.

1.3.4. Análisis de las aplicaciones desarrolladas: limitaciones actuales

Las propuestas basadas en sistemas multiagente presentadas en las secciones anteriores cubren un amplio espectro de los aspectos relacionados con las operaciones de tráfico aéreo en un entorno de vuelo libre. En algunas de ellas se llevan a cabo análisis preliminares basados en agentes de los entornos de vuelo libre y de los hipotéticos roles que jugarían los agentes que intervienen en él. Otras presentan arquitecturas preliminares y algunos prototipos de sistemas para la negociación en escenarios de operaciones autónomas, para la coordinación entre controladores o para la simulación de entornos de vuelo libre.

Sin embargo es evidente que la implementación efectiva de nuevos conceptos operacionales requiere aún de una descripción más detallada e interrelacionada de las propuestas anteriores. Todo ello confirma nuevamente la necesidad de desarrollar modelos conceptuales de operaciones basadas en trayectoria a través de los cuales llevar a cabo un diseño integrado de los siguientes aspectos:

- Procedimientos de operación tanto a nivel de aeronave como de ATC que especifiquen roles y tareas asignadas a tripulaciones y controladores así como reglas para la toma de decisión y para las interacciones entre los agentes implicados en las operaciones.
- Sistemas de aviónica y de ATC para la gestión y ejecución automatizada a varios niveles de dichos procedimientos.
- Modelos matemáticos y algoritmos subyacentes para soportar las funcionalidades requeridas por los sistemas anteriores.

- Lenguajes de alto nivel que permitan una intercomunicación precisa entre los sistemas de aeronave y de tierra. Además dichos lenguajes deben ser comprensibles al usuario (piloto o controlador) que interactúa con estos sistemas.

Afortunadamente, el alto grado de madurez que han alcanzado en los últimos años las metodologías para el desarrollo de sistemas multiagente permite llevar a cabo un análisis y modelado exhaustivo de los mencionados escenarios de tráfico. De esta manera el análisis y modelado de las interacciones en términos de estrategias de coordinación y negociación entre agentes facilita el desarrollo de propuestas sobre nuevos esquemas para automatización de los procedimientos para la navegación y el control del tráfico aéreo. A su vez, el estudio del comportamiento de los agentes y de su arquitectura interna durante los procesos de coordinación facilitan una identificación más precisa de las funcionalidades requeridas por los sistemas de aviónica y de tierra destinados a implementar dichos procedimientos.

1.4. **Ámbito y objetivos de esta Tesis**

En este capítulo ha quedado de manifiesto la necesidad actual de desarrollar propuestas concretas sobre procedimientos de navegación y control de tráfico aéreo en escenarios de trayectoria preferente de usuario. Junto a estos procedimientos, también se necesitan nuevos sistemas inteligentes tanto para proporcionar asistencia a los operadores humanos (pilotos, controladores, operadores) en la ejecución de dichos procedimientos como para ejecutarlos autónomamente bajo la supervisión humana. También se ha discutido la particular dificultad que presenta el desarrollo de nuevos procedimientos y sistemas para las operaciones de llegada en áreas terminales.

El trabajo desarrollado en esta Tesis parte de los esquemas metodológicos que, de manera generalizada, emplea la comunidad científica y aeronáutica para organizar las actividades I+D orientadas al desarrollo e implantación de nuevos conceptos operacionales [ICAO 2007, NASA 2006, Eurocontrol 2009b]. Dichas actividades están estructuradas alrededor de distintos grupos de tareas afines. Los grupos de tareas son planificados secuencialmente en el tiempo dando lugar así al conjunto de etapas del proceso de diseño e implementación de futuros conceptos operacionales. La figura 1.11 recoge las principales etapas de dicho proceso. Las dos primeras hacen referencia al análisis de las potencialidades de los sistemas CNS/ATM y al desarrollo de nuevos conceptos operacionales descritos en las secciones 1.1.2.2 y 1.1.3.2 respectivamente. Tal y como se ha indicado en este capítulo, los conceptos operacionales contienen especificaciones generales que orientan el posterior diseño de procedimientos específicos para llevar a cabo las operaciones de navegación y control del tráfico. Paralelamente a las propuestas de procedimientos se diseñan

1. Introducción y motivación

los sistemas (y los modelos matemáticos que los soportan) para poder ejecutar dichos procedimientos. El diseño de procedimientos y sistemas se realiza y completa de forma progresiva e iterativa a medida que son evaluados y validados mediante simulación analítica. De esta forma el diseño y la evaluación preliminar de procedimientos y sistemas son dos etapas previas que se realimentan entre sí antes de dar paso a las etapas de simulación de vuelo y tráfico (y que necesariamente incluye al elemento humano) y a las pruebas de vuelo. Estas dos últimas etapas son necesarias para definir los estándares de los procedimientos de los servicios de navegación aérea (PANS⁴⁹) o de los sistemas de navegación (RNP⁵⁰) que conducen a la implementación definitiva del concepto operacional.

Considerando el proceso descrito en el párrafo anterior, el trabajo desarrollado en esta Tesis está encuadrado dentro de la fase de diseño e implementación de procedimientos, sistemas y modelos matemáticos subyacentes (tal y como se remarca en la figura 1.11). Las propuestas de nuevos procedimientos y especificación de sistemas realizadas en esta Tesis, están incluidas dentro del diseño de un modelo conceptual que describe el comportamiento dinámico y la arquitectura interna de las entidades que participan en las operaciones de tráfico aéreo en escenarios de trayectoria preferente de usuario. Desde esta perspectiva el modelo conceptual deberá cumplir al menos con los siguientes requisitos: *(i)* proporcionar un alto nivel de detalle de forma que sea posible identificar tanto los procedimientos (a partir de las interacciones y del comportamiento dinámico de las entidades que lo constituyen) como las especificaciones de los sistemas y modelos matemáticos (a partir de la arquitectura interna de las mismas), *(ii)* poseer una arquitectura funcional altamente modular de forma que puedan incorporarse nuevos procedimientos, sistemas y/o modelos matemáticos a medida que éstos sean diseñados, *(iii)* servir de base para obtener modelos ejecutables para la simulación analítica.

A partir de los requisitos anteriores, las consideraciones sobre las que se desarrolla este modelo son las siguientes:

1. Está basado en un análisis orientado a agentes de los escenarios operacionales descritos en este mismo capítulo, contemplando su estructura estática y su comportamiento dinámico. De modo particular se caracterizan las interacciones derivadas de la planificación y ejecución de procedimientos para la navegación y el control del tráfico. Además, los procesos de generación y evaluación de propuestas así como los de toma de decisión, que en los procedimientos tradicionales han correspondido al operador humano (piloto o controlador de tráfico), son incorporados a los procesos internos de los agentes. Estos procesos deben ser transparentes al operador con la finalidad de que éste tenga la opción de intervenir en la toma de decisiones a varios

⁴⁹PANS: Procedures for Air Navigation Services.

⁵⁰RNP: Required Navigation Performance.

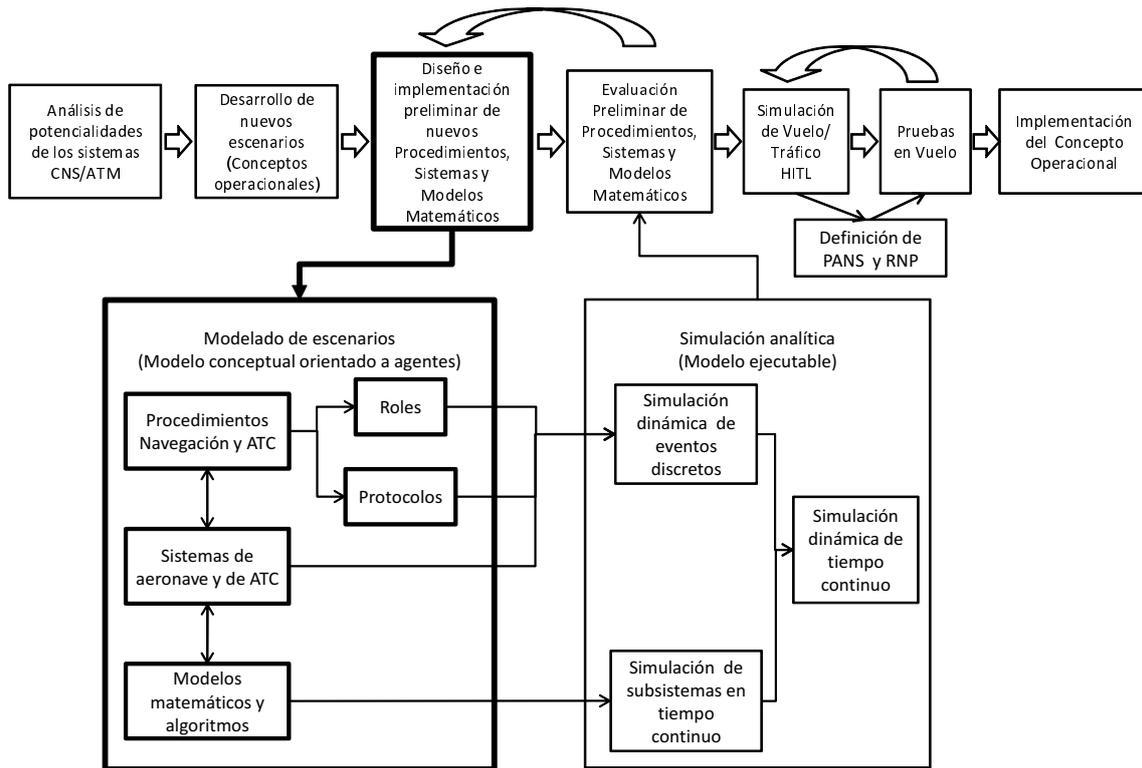


Figura 1.11: Ámbito de la Tesis dentro del marco metodológico para la implementación de futuros conceptos operacionales

niveles mediante la interacción con los agentes correspondientes.

2. Tiene en cuenta las perspectivas aire y tierra en un escenario distribuido de operaciones basado en el concepto de *trayectoria preferente de usuario* (conceptos DAG-TM y TBO). Esta doble perspectiva contempla los aspectos relativos a la distribución de roles entre los agentes.
3. Está particularizado para las operaciones de llegada con el fin de lograr un mayor grado de detalle en la especificación de los procedimientos (roles y protocolos de actuación principalmente), así como de las funcionalidades de los sistemas de tierra y de aviónica requeridos. Sin embargo también se han identificando en él las fronteras de interacción con los demás ámbitos de las operaciones de vuelo puerta-a-puerta.
4. El modelo deberá servir de soporte para obtener un modelo ejecutable para la simulación analítica orientada a la evaluación de nuevos procedimientos y capacidades de los sistemas de tierra y aviónica. En este contexto la arquitectura del modelo deberá presentar la adecuada modularidad y extensibilidad para incorporar nuevos procedimientos, sistemas y/o modelos matemáticos.

El diseño del modelo anterior se ha realizado considerando las pautas de la metodología *Prometheus* de desarrollo de SMA. El escenario inicial sobre el que se ha aplicado dicha

1. Introducción y motivación

metodología se basa en la propuesta contenida en el elemento conceptual CE-11 (y otros afines) del concepto DAG-TM en un entorno de operaciones TBO.

La aplicación de la metodología *Prometheus* conduce a un modelo conceptual de alto nivel de detalle de las operaciones de llegada en áreas terminales cuyas características principales son las siguientes:

1. Los procedimientos están definidos a partir de los protocolos de interacción entre los agentes y de los procesos internos que estos protocolos disparan. Los protocolos de interacción están destinados a actualizar la base de conocimiento que tienen los agentes de su entorno, y/o a la negociación entre éstos de propuestas de acuerdo a sus roles y preferencias. Por lo tanto, los procedimientos contienen datos sobre el escenario operacional a partir del cual se generan los eventos que disparan los procesos de planificación, ejecución y/o modificación de trayectorias de vuelo. También incluyen los datos sobre el estado de ejecución del procedimiento y de la trayectoria asociada a éste.
2. Los sistemas constituyen el soporte físico que ejecutan, a nivel de agente, los procesos anteriores. La arquitectura interna obtenida a través de la metodología empleada es una arquitectura desarrollada modularmente alrededor del concepto capacidades y planes según la notación de *Prometheus*. Las capacidades han sido planteadas con el fin de gestionar los distintos eventos asociados a los procedimientos y contingencias que se producen en las operaciones de vuelo en general. Ello presenta una doble ventaja: (i) se obtiene una nueva arquitectura funcional orientada directamente a gestionar procedimientos en entornos TBO, pero altamente compatible con los procedimientos actuales, (ii) facilita la posterior incorporación de nuevas funcionalidades y modelos matemáticos subyacentes en los sistemas de los agentes.

Capítulo 2

Modelos y algoritmos matemáticos para operaciones basadas en trayectoria: análisis y nuevas propuestas

Como ya se comentó en el capítulo anterior, los sistemas de aeronave y de ATC que den soporte a las operaciones TBO, requieren de un conjunto de modelos matemáticos y algoritmos computacionalmente eficientes y precisos para el cálculo y el tratamiento de datos de trayectoria 4D.

En este capítulo se analizan estos modelos y algoritmos con el fin de determinar y caracterizar los datos usados y producidos por las funcionalidades básicas de los sistemas requeridos en las operaciones TBO. La caracterización de estas funcionalidades es necesaria para posteriormente, en el capítulo 3, llevar a cabo una adecuada especificación del modelo propuesto en esta Tesis.

Este análisis también permite distinguir entre aquellos modelos que forman parte de los actuales sistemas de navegación y/o control de tráfico y aquellos otros que, a fecha actual, corresponden a propuestas para prototipos aún bajo estudio o no suficientemente desarrollados. Estos últimos modelos se pueden clasificar en dos grupos: los modelos que están orientados a la síntesis de trayectoria y los que realizan procesos específicos a partir de los datos de trayectoria.

La síntesis de trayectoria está ligada a la predicción de las trayectorias de aeronave a partir de un conjunto de restricciones espacio-temporales así como la evaluación de su coste operacional en términos de tiempo-consumo.

Los modelos que procesan datos de trayectoria se pueden agrupar a su vez en dos categorías. Por una parte se encuentran los modelos que miden la seguridad y eficiencia de varias trayectorias y generan nuevas restricciones de trayectoria cuando alguno de estos parámetros requiere ser mejorado: modelos para la detección y resolución de conflictos,

secuenciación de llegadas, etc. El segundo grupo lo constituyen los modelos para el guiado y control de aeronaves a lo largo de una trayectoria 4D de referencia.

Las propuestas actuales sobre modelos tanto para la detección y resolución de conflictos como para la secuenciación son numerosas. Estos modelos serán examinados y clasificados para vincularlos a las distintas circunstancias operaciones en las que se podrían utilizar. Sin embargo, las propuestas sobre modelos para el guiado y control 4D son más bien escasas. Ello se debe, entre otras razones, a que no existe un consenso en la comunidad científica acerca del formato adecuado para expresar la trayectoria 4D que debe de servir de referencia para el proceso de guiado de aeronaves. La funcionalidad de guiado y control 4D constituye una parte fundamental de la especificación de operaciones TBO no solo por la necesidad de mantener a las aeronaves dentro de un intervalo espacio-temporal de tolerancia fijado alrededor de su trayectoria prevista, sino también por la oportunidad que ofrecen para combinar la información que procesan durante su operación con la de otros sistemas de monitorización y vigilancia de tierra. Estas especificaciones resultan particularmente necesarias para la fase de descenso. Por esta razón, en este capítulo se propone un modelo de control 4D para trayectorias de llegada. La finalidad de este modelo no es tanto obtener un prototipo calibrado para las operaciones de control 4D, sino más bien la de identificar a partir de su análisis, los distintos estados operacionales que se producen durante su funcionamiento.

Finalmente hay que señalar que el necesario intercambio de información entre los sistemas de aire y de tierra que utilizan los modelos y algoritmos anteriores requerirá en los próximos años un esfuerzo adicional para estandarizar el concepto de trayectoria. Dicho estándar debe contemplar la trayectoria 4D como una unidad de información que contenga el conjunto de datos usados y producidos por los modelos anteriores. A partir de estas consideraciones el presente capítulo finaliza con la identificación de aquellos datos que deben formar parte del contenido informativo de la trayectoria 4D.

2.1. Modelos para la predicción de trayectoria

La arquitectura general de un modelo cinético de sintetizador de trayectoria está representada en la figura 2.1. El sintetizador está constituido por dos componentes básicos: el modelo de *Dinámica de Aeronave* (Aircraft Dynamic Model o ADM) y el *Sistema de Control de Vuelo*.

El ADM caracteriza el comportamiento aerodinámico de la aeronave mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales. La trayectoria 4D se obtiene mediante la integración de estas ecuaciones.

El sistema de control de vuelo genera las entradas de control requeridas para que la

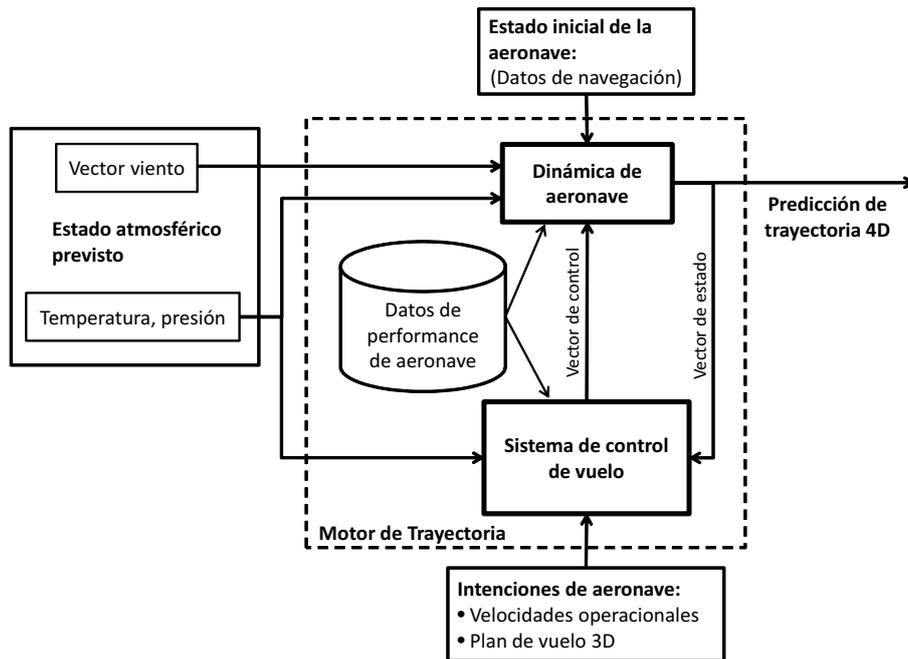


Figura 2.1: Entradas y elementos de un sintetizador de trayectoria

trayectoria discorra de acuerdo a las intenciones previstas por la tripulación.

Los datos de entrada al sintetizador son los siguientes: *(i)* el estado inicial de la aeronave (posición, velocidad, rumbo, potencia, resistencia, peso, etc.), *(ii)* el estado atmosférico previsible en la ventana de tiempos a considerar (dirección y velocidad del viento, temperatura y presión), *(iii)* los datos de *rendimiento* de la aeronave (también denominados *Aircraft Performance Model* o APM) y *(iv)* las intenciones de aeronave (perfil de velocidades y plan de vuelo 3D).

2.1.1. Modelo dinámico de aeronave

El ADM de una aeronave puede representarse mediante un modelo de seis grados de libertad [Stengel 2004]. Sin embargo, para lograr la síntesis de múltiples trayectorias en los sistemas de tierra y en los sistemas FMS de las aeronaves, la aerodinámica de la aeronave puede ser modelada adecuadamente usando un Modelo Masa Puntual (*Point Mass Model* o *PMM*) [Glover y Ligeros 2004, Eurocontrol 2009a]. Este modelo restringe los grados de libertad de movimiento de la aeronave¹ proporcionando una aceptable exactitud con un bajo coste computacional [Nuic et. al 2005]. Para ello, la aeronave es considerada como un punto en el espacio tri-dimensional (ver figura 2.2) y caracterizada a través de su vector de estado definido como $\chi(X, Y, Z, V, \psi, \gamma)$, donde X , Y y Z son las coordenadas cartesianas de la posición de la aeronave respecto a un sistema de referencia de tierra

¹En este caso el modelo asume que el piloto controla los movimientos de la aeronave alrededor del centro de gravedad y que este control asegura la estabilidad general de la aeronave.

plano, V es la velocidad respecto a la masa de aire o *TAS* (*True Air Speed*), γ es el ángulo de senda vertical de la aeronave, y ψ representa su rumbo. El modelo considera además que las entradas de control que modifican las fuerzas que actúan sobre la aeronave son: la potencia, T , el ángulo de ataque, α , y el ángulo de alabeo, ϕ . Los efectos de otras entradas tales como *spoilers*, *slats*, tren de aterrizaje, etc., son incluidos en el modelo a través de coeficientes de resistencia tal y como se verá más adelante. Por último, el movimiento de la aeronave también está afectado por el vector viento, $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3) \in \mathbb{R}^3$.

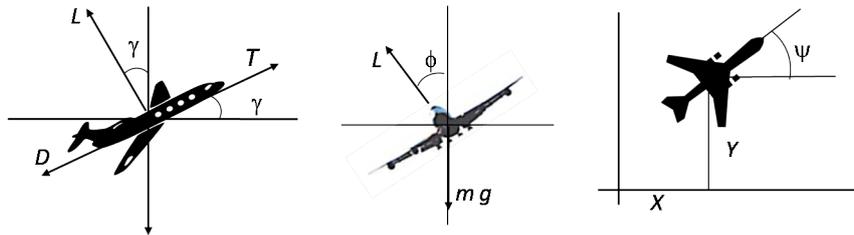


Figura 2.2: Fuerzas que actúan sobre la aeronave

De acuerdo a las premisas anteriores, la dinámica de la aeronave se representa por el siguiente sistema de ecuaciones del movimiento:

$$\begin{aligned}
 \dot{X} &= V \cos \psi \cos \gamma + \omega_1 \\
 \dot{Y} &= V \sin \psi \cos \gamma + \omega_2 \\
 \dot{Z} &= V \sin \gamma \sin \gamma + \omega_3 \\
 V &= \frac{1}{m} [(T \cos \alpha - D) - m g \sin \gamma] \\
 \dot{\psi} &= \frac{1}{m} V [L \sin \phi + T \sin \alpha \sin \phi] \\
 \gamma &= \frac{1}{mV} [(L + T \sin \alpha) \cos \phi - m g \cos \gamma]
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

donde m es la masa de la aeronave y g es el valor de la aceleración de la gravedad. L y D son las fuerzas de sustentación y resistencia respectivamente, definidas como:

$$L = \frac{C_L S \rho}{2} (1 + c\alpha) V^2 \tag{2.2}$$

$$D = \frac{C_D S \rho}{2} (1 + b_1 \alpha + b_2 \alpha^2) V^2 \tag{2.3}$$

En las expresiones anteriores, S es la superficie alar de la aeronave, ρ es la densidad del aire (que es función de la altitud) y α es el ángulo de ataque². Los parámetros C_L , b_1 y b_2 son coeficientes que determinan la fuerza de sustentación mientras que C_D y c son

²El ángulo de ataque es el ángulo formado por el eje longitudinal de la aeronave y la dirección de flujo de aire incidente.

coeficientes que determinan la resistencia. Estos coeficientes son característicos del modelo de aeronave y de su configuración de vuelo (por ejemplo el grado de extensión de los *flaps* o la extensión del tren de aterrizaje)³.

A partir del modelo anterior se obtiene el sistema de ecuaciones (2.4) en el que se han hecho las siguientes consideraciones: (i) al tratarse de vuelos comerciales con maniobras limitadas, el ángulo de ataque es despreciable ($\alpha \simeq 0$), (ii) el régimen de trabajo realizado por las fuerzas que actúan sobre la aeronave es igual al régimen de incremento de la energía potencial y cinética (Modelo de Energía Total [Eurocontrol 2009a]), (iii) se incluye un estado que define la variación de la masa a partir del consumo de combustible.

De acuerdo a dichas consideraciones, el movimiento de la aeronave se expresa a través de su vector de estado $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) \in R^6$, del vector de control $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3) \in R^3$ y del vector viento ω . En este caso, $x_1 = X$, $x_2 = Y$, $x_3 = h$, $x_4 = V$, $x_5 = \psi$, $x_6 = m$, $u_1 = T$, $u_2 = \phi$ y $u_3 = \gamma$. Además $\dot{x}_6 = \eta u_1$ donde η representa el consumo específico de combustible.

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} x_4 \cos x_5 \cos u_3 + \omega_1 \\ x_4 \sin x_5 \cos u_3 + \omega_2 \\ x_4 \sin u_3 + \omega_3 \\ \frac{C_D S \rho}{2} \frac{x_4^2}{x_6} - g \sin u_3 + \frac{1}{x_6} u_1 \\ \frac{C S \rho}{2} \frac{x_4}{x_6} \sin u_2 \\ -\eta u_1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2.1.2. Modelo de atmósfera

El valor de la densidad atmosférica en la ecuación (2.4) se obtiene a partir del modelo de *Atmósfera Estándar Internacional* (ISA)[ICAO 1964]. De acuerdo a este modelo, la densidad del aire ρ (kg/m^2) es función de la altitud, h .

$$\rho(h) = \begin{cases} \rho_0 \left(\frac{T(h)}{T_0} \right)^{-\frac{g}{K_T R} - 1} & h \leq h_{trop} \\ \rho_{trop} e^{\left(-\frac{g}{R T_{trop}} \right) (h - h_{trop})} & h > h_{trop} \end{cases} \quad (2.5)$$

donde ρ_0 es la densidad del aire a nivel del mar, T es la temperatura en el punto donde se encuentra la aeronave, T_0 es la temperatura a nivel del mar, h_{trop} es la altitud de la tropopausa. A su vez la relación $-(g/K_T R) - 1 \approx 4,25864$ siendo $R = 287,04 \text{ m}^2/Ks^2$ la

³El modelo además asume que la *TAS* no varía con el viento y que los cambios instantáneos de éste producen cambios de la misma magnitud en la velocidad de la aeronave respecto al sistema de referencia (*Ground Speed* o *GS*). En la práctica, los cambios instantáneos de viento dan lugar a un cambio más gradual de la variación de la *GS* debido al incremento de la resistencia sobre la aeronave. No obstante, el modelo descrito puede considerarse como una buena aproximación en la medida en que también se considera que no se producirán bruscas variaciones espacio-temporales del vector viento.

2. Modelos y algoritmos matemáticos...

constante real de gases, y $kT = -0,0065^\circ K/m$ es el gradiente de temperatura ISA por debajo de la tropopausa.

$$h_{trop} = 11000 + 1000 \Delta T_{isa}/6,5 \text{ (metros)} h_{trop}$$

donde la ΔT_{isa} es la diferencia entre la temperatura real y la estándar a nivel del mar ($(T_0)_{isa} = 288,15^\circ K$). Es decir que la temperatura a nivel del mar $T_0 = (T_0)_{isa} + \Delta T_{isa}$. Por lo tanto la densidad del aire a nivel del mar $\rho_0 = (\rho_0)_{isa} / T_0$.

A su vez la temperatura en función de la altura viene expresada como:

$$T(h) = \begin{cases} T_0 - 6,5 \frac{h}{1000} & h \leq h_{trop} \\ 215,65^\circ K & h > h_{trop} \end{cases} \quad (2.6)$$

Este modelo atmosférico también se utiliza para la conversión entre los distintos modos de medida de la velocidad de la aeronave. En este sentido la velocidad respecto a la masa de aire, *TAS*, se puede expresar en función de la velocidad calibrada (*Calibrated Air Speed* o *CAS*)⁴ como

$$V_{TAS} = \left[\frac{2P}{\mu \rho} \left\{ \left(1 + \frac{(P_0)_{isa}}{P} \left[\left(1 + \frac{2(\rho_0)_{isa}}{\mu (P_0)_{isa}} V_{CAS}^2 \right)^{1/\mu} - 1 \right] \right)^\mu - 1 \right\} \right]^{1/2} \quad (2.7)$$

donde $\mu = \frac{\gamma-1}{\gamma}$ y γ es el coeficiente de expansión isotrópico. Finalmente la velocidad calibrada viene dada por

$$V_{CAS} = \left[\frac{2(P_0)_{isa}}{\mu (\rho_0)_{isa}} \left\{ \left(1 + \frac{P}{(P_0)_{isa}} \left[\left(1 + \frac{\mu \rho}{2P} V_{TAS}^2 \right)^{1/\mu} - 1 \right] \right)^\mu - 1 \right\} \right]^{1/2} \quad (2.8)$$

donde $(P_0)_{isa}$ es la presión *ISA* a nivel del mar.

Del mismo modo la velocidad *TAS* se expresa en función del número *Mach*, M , como⁵,

$$V_{TAS} = M \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T} \quad (2.9)$$

⁴La velocidad CAS es la medida de la velocidad aerodinámica de la aeronave realizada tomando como valor de referencia la densidad del aire estándar a nivel del mar, $(\rho_0)_{isa}$. De esta forma, y a los efectos de obtener un comportamiento aerodinámico lo más estable posible durante la operación de vuelo, la tripulación utiliza referencias de velocidad CAS constantes. El mantenimiento de la CAS constante durante las operaciones de ascenso o descenso supone un incremento o disminución respectivamente de la velocidad *TAS* debido a la variación de la densidad del aire con la altura.

⁵El número Mach es la relación entre la velocidad de la aeronave respecto a la velocidad del sonido, c , en dicho punto, $M = \frac{V_{TAS}}{c}$

2.1.3. Modelo de rendimiento de aeronave

El *modelo de rendimiento de aeronave* (Aircraft Performance Model o APM) contiene los datos sobre las características aerodinámicas y el rendimiento de la aeronave.

Existen básicamente dos enfoques para crear un modelo APM destinado a la predicción de trayectoria y la simulación de tráfico [Suchkhov et al. 2003]. Uno de ellos es el enfoque del modelado cinético de las fuerzas que actúan sobre la aeronave tal y como se ha descrito anteriormente. El segundo de ellos es el modelo cinemático que plantea directamente las características de la ruta o plan de vuelo de la aeronave sin tratar el modelo aerodinámico subyacente.

Lógicamente, para una adecuada predicción de trayectorias 4D se requiere un APM basado en el enfoque cinético. En este caso los datos de *performance* de aeronave pueden obtenerse mediante programas *software* y bases de datos específicas utilizados por los fabricantes para la elaboración de los respectivos manuales de performance de las aeronaves⁶. Sin embargo, no resulta práctico incluir estos datos en los modelos de predicción de trayectoria para sistemas ATM debido a razones tales como las dimensiones de estas bases de datos, la velocidad con la que estos perfiles pueden calcularse a partir de dichos datos o los derechos de propiedad intelectual.

Por eso los modelos APM para la síntesis de trayectorias desde la perspectiva del ATM comprime esta información para obtener datos de performance que proporcionen la suficiente exactitud y la adecuada rapidez de cálculo en los procesos de generación de trayectorias. Uno de los modelos cinéticos más completos es el proporcionado por la base de datos BADA (Base of Aircraft DATA) desarrollado por el Centro Experimental de Eurocontrol (EEC). Dicha base de datos está constituido por un conjunto de ficheros ASCII que contienen un modelo APM y un modelo de procedimientos de operación de compañía para 294 tipos distintos de aeronave [Eurocontrol 2009a]. El modelo de procedimientos de operación específica las velocidades operacionales típicas de cada tipo de aeronave para cada fase del vuelo. Este modelo de procedimientos se puede considerar como un modelo básico que recoge las intenciones de la aeronave. Resulta útil para una predicción aproximada de la trayectoria de las aeronaves por parte de los actuales sistemas de tierra. Sin embargo, la síntesis de trayectoria basada en estas estimaciones de velocidad adolece de la flexibilidad y precisión requerida en las operaciones TBO.

El modelo APM de BADA está basado en el Modelo de Energía Total (Total Energy Model o TEM). El modelo TEM iguala el régimen de trabajo realizado por las fuerzas

⁶Un ejemplo de estos programas es el Software de Performance de Boeing, INFLT/REPORT. Este programa fue desarrollado para la producción de datos operacionales a partir del cual se elaboran los manuales de Operaciones, manuales de performance de planificación de vuelo y tablas de datos utilizadas por sistemas despachadores que planifican los vuelos de compañías. El módulo INFLT es un módulo computacional, mientras que REPORT es el módulo de presentación de datos de salida.

que actúan sobre la aeronave, al régimen de incremento de la energía potencial y cinética. Es decir,

$$(T - D) V_{TAS} = mg \frac{dh}{dt} + m V_{TAS} \frac{dV_{TAS}}{dt} \quad (2.10)$$

De acuerdo a este modelo, si no se considera el uso de dispositivos que afectan a la resistencia aerodinámica, D , (*spoilers*, *slats* o *flaps*) es posible controlar el perfil vertical de la trayectoria a partir del mando de potencia y el timón de profundidad. Estas dos entradas permiten controlar dos de las tres variables siguientes: potencia, velocidad y velocidad vertical.

Los parámetros de las características de las aeronaves definidos en el modelo APM de BADA son los siguientes:

- Coeficientes de resistencia aerodinámicos, C_D para cada fase del vuelo (ascenso, crucero y descenso) y/o configuración de la aeronave (*flaps*, tren de aterrizaje, etc.)⁷.
- Potencia del motor en función del tipo de motor de aeronave (Reactor, Turbohélice o Pistón), las condiciones atmosféricas y la fase del vuelo.
- Consumo del combustible expresado como función de la potencia aplicada así como de otros coeficientes específicos del tipo de motor de aeronave.
- Envoltante de vuelo o valores límite (principalmente velocidades máximas y mínimas) dentro de las cuales la aeronave puede ser operada de forma segura. También se incluyen los valores máximos de las aceleraciones longitudinal y vertical en operaciones de vuelo de aeronaves civiles.

2.1.4. Intenciones de aeronave

En un contexto genérico, el concepto intenciones de aeronave se refiere al *conjunto de información utilizada por los sistemas de tierra o de aeronave para describir el comportamiento futuro de esta última*. Por otro lado, la trayectoria 4D entendida como una lista de puntos 4D en número suficiente como para poder interpolarlos, es también una forma de describir el comportamiento futuro de la aeronave. La equivalencia entre intenciones de aeronave y la correspondiente secuencia de puntos 4D que se obtiene como consecuencia de la ejecución de dichas intenciones, permite considerar *intenciones y secuencia de*

⁷En la base de datos BADA estos valores vienen especificados en función de altitudes respecto al aeropuerto, tomando un conjunto de altitudes de referencia para la extensión de *flaps* y tren. En la futura versión BADA 4.0 se pretende definir estos valores a partir de eventos que se puedan producir en cualquier altitud.

puntos 4D como dos formas diferentes para describir una trayectoria 4D. En este contexto, un sintetizador de trayectoria, puede considerarse como un sistema que transforma la trayectoria expresada en términos de intenciones en una trayectoria expresada como secuencia de puntos 4D. Es decir,

$$S : I \rightarrow R^n \times N \quad (2.11)$$

donde I representa el modelo de intenciones, n es la dimensión del vector de estado x , y N es el número de puntos de la trayectoria.

En general, y dependiendo del sistema que haga uso de la información de trayectoria 4D, ésta deberá expresarse bien a través de un meta-lenguaje de alto nivel comprensible por el elemento humano y que facilite la interacción persona-máquina o bien a través de un conjunto de datos de bajo nivel para ser tratados por los modelos que procesan dichos datos (por ejemplo los sistemas de detección de conflicto). Entre el nivel más alto de abstracción (plan de vuelo operacional y otras restricciones) y el nivel más bajo (una lista de puntos 4D lo suficientemente densa como para permitir la interpolación lineal entre ellos) podrían existir niveles intermedios para expresar la trayectoria como una secuencia de restricciones y/o vectores de vuelo. Por ejemplo, se puede incluir una especificación de aquellos puntos de la trayectoria que identifiquen el comienzo o fin de un viraje, el TOD (Top Of Descent) , etc.

Teniendo en cuenta los procedimientos y sistemas actuales, se pueden considerar dos niveles para expresar las intenciones de aeronave.

En un nivel superior es posible describir las intenciones de aeronave mediante un plan de vuelo 3D, y un conjunto de velocidades operacionales que son introducidas en los actuales FMS. El conjunto de velocidades operacionales a aplicar en cada fase y subfase del vuelo es definido de forma discrecional por las compañías aéreas en sus manuales de operación en términos de *CAS* o *M*. La selección de estas velocidades son el resultado de un proceso de optimización del perfil de vuelo de acuerdo al *Cost-Index* de la compañía y de los datos del manual de performance de aeronave. En el caso de que en dicho modelo de intenciones se incorporen restricciones temporales en términos de RTAs en alguno de los puntos del plan de vuelo, las velocidades operacionales a aplicar tendrán en cuenta estas restricciones.

De esta forma las intenciones procedentes de un plan de vuelo operacional constituido por un conjunto P de N puntos $p \in R^3$ y un conjunto \mathcal{V} de M velocidades operacionales, v , se pueden expresar como:

$$I_p = \{P, \mathcal{V}\} \quad (2.12)$$

$$\text{con } p \in P = \{2, \dots, N\} \text{ y } v \in \mathcal{V} = \{1, \dots, M\}$$

En un nivel más bajo, las intenciones del plan de vuelo operacional se pueden descomponer en un conjunto discreto de vectores de vuelo cuyas componentes son el rumbo, ψ , altitud, h y la velocidad, v , a mantener por la aeronave en cada instante. Es decir, las intenciones en este caso vienen dadas por

$$I_v = \{\Psi, \Gamma, \mathcal{V}\} \quad (2.13)$$

con $\psi \in \Psi = \{1, \dots, N - 1\}$, $h \in \Gamma = \{1, \dots, N - 1\}$ y $v \in \mathcal{V} = \{1, \dots, M\}$.

Uno de los retos, en los próximos años, consistirá en lograr formatos para expresar la trayectoria 4D a través de distintos niveles de abstracción de las intenciones, asegurando que existe una relación unívoca entre estos niveles de representación y el nivel más bajo de la secuencia temporal de la posición 4D de la aeronave [Lopez-Leones et al. 2007]. Sin embargo, a los efectos de diseñar las funcionalidades de los futuros sistemas de tierra y aire del modelo propuesto en esta Tesis, es suficiente con analizar la interdependencia entre los dos modelos de intenciones anteriores y la trayectoria 4D.

2.1.4.1. Ruta del plan de vuelo

Los rumbos asociados al conjunto de segmentos $N-1$ que constituye la ruta horizontal de un plan de vuelo vienen dados por (ver figura 2.3),

$$\psi_c(i) = \arctan \left(\frac{x_2(i+1) - x_2(i)}{x_1(i+1) - x_1(i)} \right) \quad (2.14)$$

donde $\psi_c(i)$ es el rumbo asociado al segmento horizontal, i , que une los puntos (o *waypoints*) i e $i+1$ de dicho plan de vuelo.

En presencia de viento, ψ_h , el rumbo requerido para mantener $\psi_c(i)$ es:

$$\psi_h = \psi_c - \sin^{-1} \left(\frac{|\omega| \cdot \sin(\psi_\omega - \psi_c)}{V_{TAS}} \right) \quad (2.15)$$

siendo ω el vector viento y ψ_ω el ángulo de la componente horizontal del vector viento.

2.1.4.2. Velocidades operacionales

Como se indicó en la sección 2.1.3 anterior, la base de datos BADA, además del modelo de performance de aeronave, abarca un modelo de procedimiento operacional de compañías que contiene los valores típicos de las velocidades operacionales de éstas. Sin embargo, en un contexto de operaciones basadas en trayectoria preferente de usuario, es necesario que el modelo de intenciones contemple la discrecionalidad de las aeronaves para

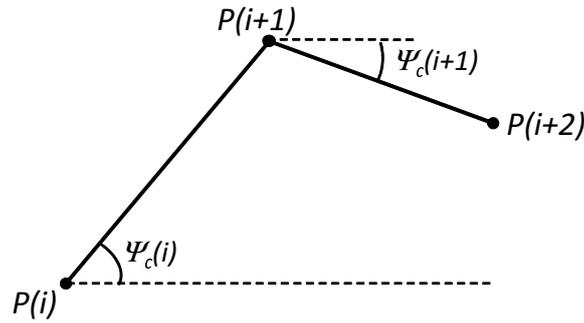


Figura 2.3: Ruta del plan de vuelo

seleccionar sus velocidades operacionales basándose en los criterios y restricciones de la tripulación y/o del ATC.

De forma general, las velocidades operacionales recogidas en el modelo de intenciones para cada fase del vuelo se puede expresar en la forma mostrada en la tabla 2.1, donde las velocidades vienen definidas en términos de *CAS* o *Mach* constante según la capa de altitud en la que se encuentre la aeronave.

<i>Altitud (pies)</i>	<i>Velocidad CAS (Kts) o M</i>
desde 0 a $h_1 - 1$	CAS_0
desde h_1 a $h_2 - 1$	CAS_1
.....	...
desde h_n a h_{trans}	CAS_n
por encima de h_{trans}	M

Tabla 2.1: Especificación de velocidades del modelo de intenciones para una determinada fase del vuelo

A modo de ejemplo, en la tabla 2.2 se recoge el modelo de procedimiento aplicado por la base de datos BADA a las aeronaves tipo reactor y para la fase de vuelo de descenso. En este caso, las velocidades vienen dadas por la velocidad mínima de seguridad de toda aeronave en vuelo, V_{min} , más un término añadido de seguridad $V_{DES,i}$, especificado en BADA. La velocidad mínima de seguridad viene dada por $V_{min} = C_{Vmin} \cdot V_{stall}$, donde C_{Vmin} es un coeficiente que, de acuerdo al estándar OACI, tiene un valor de 1.3 para todas las fases del vuelo excepto para la fase de despegue, en cuyo caso vale $C_{Vmin} = 1,2$. V_{stall} es la velocidad de pérdida de la aeronave para su masa de referencia, m_{ref} , siendo para cualquier otro valor de su masa, m :

$$V_{stall} = V_{ref} \sqrt{\frac{m}{m_{ref}}} \quad (2.16)$$

También $V_{des,1}$, $V_{des,2}$ y M_{des} forman parte del modelo de procesamiento.

Altitud (pies)	Velocidad CAS (nudos) o M
desde 0 hasta 999 pies	$V_{min} + Vd_{DES,1}$
desde 1000 a 1499 pies	$V_{min} + Vd_{DES,2}$
desde 1500 a 1999 pies	$V_{min} + Vd_{DES,3}$
desde 2000 a 2999 pies	$V_{min} + Vd_{DES,4}$
desde 3000 a 5999 pies	$\min(V_{des,1}, 220)$
desde 6000 a 9999 pies	$\min(V_{des,1}, 250)$
desde 10000 pies a altitud de transición	$V_{des,2}$
por encima de altitud de transición	M_{des}

Tabla 2.2: Velocidades CAS/Mach para reactores y turbohélice en la fase de descenso

Cualquier modificación de los valores anteriores debe estar dentro de los valores definidos en la envolvente de vuelo de la aeronave ($v \in [V_{max}, V_{min}]$).

2.1.5. Sistema de control de vuelo

Como se indicó en la sección 2.1.1, el sistema de control calcula el vector de control, u , requerido por la aeronave para seguir la trayectoria definida en el modelo de intenciones. Si el modelo de intenciones viene expresado en términos de plan de vuelo operacional, I_p , el sistema de control realizará previamente una transformación $I : I_p \rightarrow I_v$ y posteriormente calculará $\mathbf{u} = f(x, I_v)$.

De modo general, el control de la velocidad TAS de la aeronave se realiza a través de la potencia (en la fase de crucero) o del ángulo de senda⁸ (en la fase de descenso y ascenso).

En la fase de crucero el sistema de control fija el ángulo de senda de forma que la potencia y la variación de la velocidad vienen relacionados por la expresión:

$$\dot{x}_4 = -\frac{C_D S \rho}{2} \frac{x_4^2}{x_6} + \frac{1}{x_6} u_1 \quad (2.17)$$

En cambio para las fases de ascenso y descenso la potencia se ajusta a un valor fijo y la velocidad se controla con el ángulo de senda u_3 a través de la expresión:

$$\dot{x}_4 = -\frac{C_D S \rho}{2} \frac{x_4^2}{x_6} - g \sin u_3 + \frac{1}{x_6} u_1 \quad (2.18)$$

⁸Es decir, en los casos en que la potencia se fija de antemano y la velocidad se mantiene a un valor constante actuando convenientemente sobre el timón de profundidad (senda). Ésta es la operación más extendida entre las realizadas para cumplir un determinado vector intenciones. No obstante existen otros dos modos de operación: (i) aquellos en que se requiere un régimen de descenso o ascenso (*ROCD*) determinado y (ii) los casos en que tanto el *ROCD* y la velocidad deban estar predeterminadas (por ejemplo en el seguimiento de la senda *ILS* en la aproximación final).

Ambos modos de operación serán tenidos en cuenta en el modelo propuesto en la sección 2.6.

Por otra parte el control del rumbo de la aeronave se lleva a cabo mediante el ángulo de alabeo, u_2 , teniendo en cuenta la relación:

$$\dot{x}_5 = \frac{C_L S \rho x_4}{2 x_6} \sin u_2 \quad (2.19)$$

Por tanto, establecida la velocidad y el rumbo, a través de los controles anteriores, la posición de la aeronave viene determinada por las tres primeras ecuaciones de la expresión (2.4), es decir,

$$\dot{x}_1 = x_4 \cos x_5 \cos u_3 + \omega_1 \quad (2.20)$$

$$\dot{x}_2 = x_4 \sin x_5 \cos u_3 + \omega_2 \quad (2.21)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \sin u_3 + \omega_3 \quad (2.22)$$

Por otra parte, la función $\mathbf{u} = f(x, I_v)$ no es una función continua debido a que los ajustes de potencia se realizan de acuerdo al estado operacional de la aeronave (ascenso, aceleración, etc.). También la transformación $I : I_p \rightarrow I_v$ requiere identificar los distintos puntos del plan de vuelo por los que pasa la aeronave a los efectos de estimar los rumbos y altitudes requeridos para el seguimiento de dicho plan de vuelo. Por ello es necesario identificar aquellos estados operacionales, s , que definen las acciones de control requeridas de acuerdo a los valores instantáneos de x e I_v . De esta forma, el vector de control queda completamente definido mediante la función $\mathbf{u} = f(x, I, s)$. En la figura 2.4 se muestran los componentes internos del sistema de control de vuelo. Éste está constituido por dos módulos: un primer módulo encargado de calcular los estados discretos a partir del vector de estado y del modelo de intenciones y un segundo módulo encargado de calcular el vector de control.

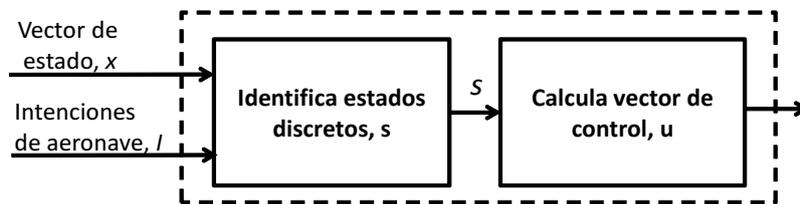


Figura 2.4: Sistema de control de vuelo

2.1.5.1. Estados discretos para la transformación del modelo de intenciones

El análisis de dichos estados está inspirado en la propuesta de [Glover y Ligeros 2004], que establece ocho estados discretos para fijar los valores del vector de control a partir de un plan de vuelo 3D y de las velocidades operacionales establecidas para cada modelo

de aeronave en la base de datos BADA. Esta propuesta se analiza a continuación para distinguir los estados que se utilizan exclusivamente para la transformación del modelo de intenciones de aquellos otros que se usan para determinar el vector u a partir del vector de vuelo. Este conjunto de estados discretos ha sido ampliado en la sección 2.6 para proponer un modelo para el seguimiento y control de trayectorias 4D.

En el caso de que el modelo de intenciones venga dado por un plan de vuelo operacional, se utilizarán tres estados discretos para fijar el vector de vuelo. Los dos primeros denominados *Capa de Vuelo* (*Flight Layer, FL*) y *Modo de Velocidad* (*Speed Mode, SM*) se utilizan para identificar la velocidad nominal de la aeronave de acuerdo a la tabla 2.1. El modo *FL* hace referencia al intervalo de altura en el que vuela la aeronave, mientras que el modo *SM* indica si la velocidad operacional está referida a *CAS* o *M*. El tercer modo, denominado *Índice de Waypoint* (*Waypoint Index, WI*) identifica cada *waypoint* del plan de vuelo a los efectos de establecer el rumbo y altitud a mantener en el segmento que une dicho *waypoint* con el siguiente.

Capa de vuelo (*FL*). Discretiza la altitud en un conjunto de capas sobre el que se asocia el conjunto de velocidades operativas *CAS* o *Mach*. Por ejemplo, el conjunto de velocidades especificadas en el modelo de procedimiento de compañía de la base de datos BADA para todas las aeronaves y fases de vuelo, discretizan la altitud en 11 capas de vuelo distintas dando lugar a otros tantos valores de la variable $FL=(0, 1, 2, \dots, 11)$. La actualización del valor de la variable se lleva a cabo a partir de la altitud actual, x_3 , de la aeronave y de acuerdo a la máquina de estados finitos de la figura siguiente:

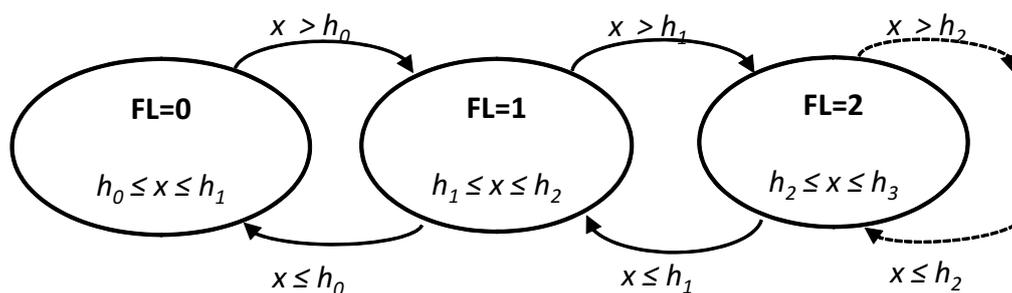


Figura 2.5: Máquina de estados finitos para el modo *FL*

Modo de velocidad (*SM*). Como se comentó anteriormente, este modo indica si las velocidades nominales de la aeronave están expresadas en términos *CAS* o *M*. En realidad es un modo derivado del modo *FL*, puesto que durante la discretización de la altitud realizada por esta variable se han considerado las regiones que están por encima y por debajo de la altitud de transición de *CAS* a *Mach* y viceversa. Con el

fin de evitar indeseables cambios de modo por efecto de redondeo, se ha establecido un margen de seguridad n_n m/s (por ejemplo $n_v = 1$) para comparar las velocidades *CAS* y *Mach*.

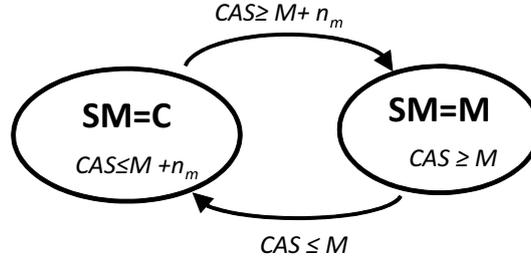


Figura 2.6: Máquina de estados finitos para el modo *SM*

Índice de Waypoint (*WI*). Asigna un número de índice a cada *waypoint* del plan de vuelo de la ruta, es decir, $WI \in \{0, 1, \dots, N\}$. De esta forma $WI = i$ indica que la aeronave se encuentra en el segmento que une los *waypoint* i e $i+1$. El valor de esta variable se actualiza a partir de la posición horizontal de la aeronave (x_1, x_2) y el segmento en el que se encuentre. El paso de un segmento a otro se realiza de acuerdo al método *fly-by* según el cual la aeronave comienza el viraje para interceptar el siguiente segmento de la ruta antes de alcanzar el *waypoint*.⁹ La distancia a la cual la aeronave debe comenzar el viraje y por tanto en la que se actualiza el valor de la variable *WI* viene dada por la geometría de la figura 2.7. De acuerdo a dicha figura se asume que durante el viraje la velocidad de la aeronave, su altitud y la velocidad del viento permanecen constantes. El rumbo necesario para volar los segmentos anterior y posterior al *waypoint* se obtiene a partir de la ecuación 2.15. Por consiguiente, el tiempo necesario para realizar el viraje necesario para el cambio de rumbo requerido dado por

$$t_{\text{viraje}} = \frac{V_{tas} \Delta\psi \text{ sig}_{\text{vir}}}{g \tan(\phi_{\text{nom}})} \quad (2.23)$$

donde $\Delta\psi = \psi_{h,i+1} - \psi_{h,i}$, $\text{sig}_{\text{vir}} = 1$ cuando el viraje es a derechas mientras que $\text{sig}_{\text{vir}} = -1$ si se trata de un viraje a la izquierda.

El vector desplazamiento \mathbf{c} de la aeronave durante este tiempo es resultado de la superposición de su desplazamiento nominal (considerando el vector *TAS*) y del desplazamiento debido al vector viento $\boldsymbol{\omega}$. Es decir,

⁹En contraposición al método *fly-past*, el método *fly-over* implica que la aeronave alcanza el *waypoint* antes de iniciar el giro. Este último método es muy habitual cuando la navegación se basa en el sistema VOR y supone realizar una maniobra posterior para interceptar el siguiente segmento. Con la aparición de los sistemas para la navegación de área, el método *fly-past* es el más utilizado.

$$\mathbf{c} = t_{turn} (\mathbf{V} + \boldsymbol{\omega}) \quad (2.24)$$

La proyección del vector anterior sobre el segmento correspondiente al *waypoint* representa la distancia, d a la cual hay que iniciar el viraje para interceptar el tramo de la ruta correspondiente al siguiente *waypoint*,

$$d = \mathbf{c} \left[\frac{P(i+1) - P(i)}{P(i+2) - P(i+1)}, \frac{P(i+2) - P(i+1)}{P(i+2) - P(i+1)} \right]^{-1} \quad (2.25)$$

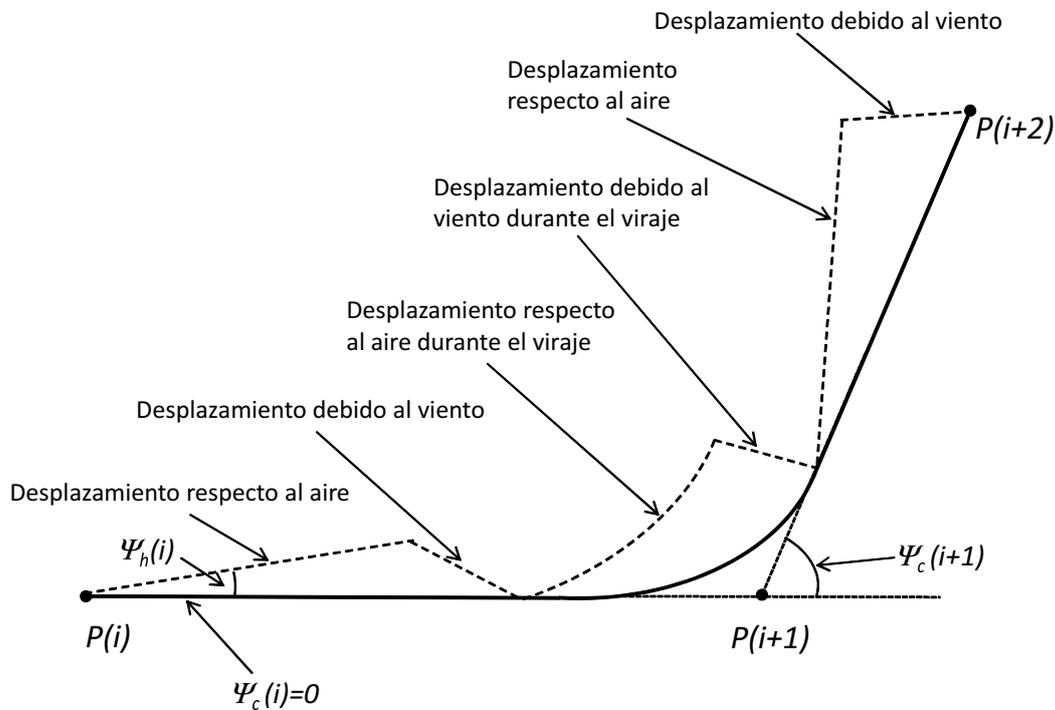


Figura 2.7: Geometría del viraje de aeronave en presencia de viento para maniobra *fly-past*

Finalmente en la figura 2.8 se muestra la máquina de estados finito que permite actualizar el valor de la variable WI .

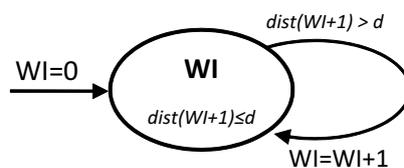


Figura 2.8: Máquina de estados finitos para la variable WI

2.1.5.2. Estados discretos para fijar el vector de control

Los estados discretos utilizados para fijar el vector de control son los siguientes: Modo de aceleración (*Acceleration Mode, AcM*), modo de altitud (*Altitud Mode, AIM*), Fase de descenso (*Descent Phase, DP*), modo de troposfera (*Troposphere Mode o TrM*)¹⁰.

Modo aceleración (AcM). Esta variable refleja si la aeronave se encuentra en estado de aceleración ($AcM=A$), desaceleración ($AcM=D$) o a velocidad constante ($AcM=C$).

Este modo se determina comparando la velocidad nominal del vector de intenciones con la velocidad actual de la aeronave. Evidentemente, y dado que las velocidades del vector de intenciones vienen expresadas en términos de *CAS/Mach*, estas velocidades deberán ser transformadas a velocidades *TAS* para compararlas con la velocidad x_4 del vector de estado de la aeronave. Las condiciones para la transición de un estado a otro se representan en la máquina de estados de la figura 2.9. En este caso, y con el fin de evitar cambios indeseables del modo aceleración por efecto de cálculos de redondeo, se ha establecido un margen de n_v m/s en la comparación entre la velocidad nominal y la velocidad real de la aeronave (por ejemplo $n_v = 1$).

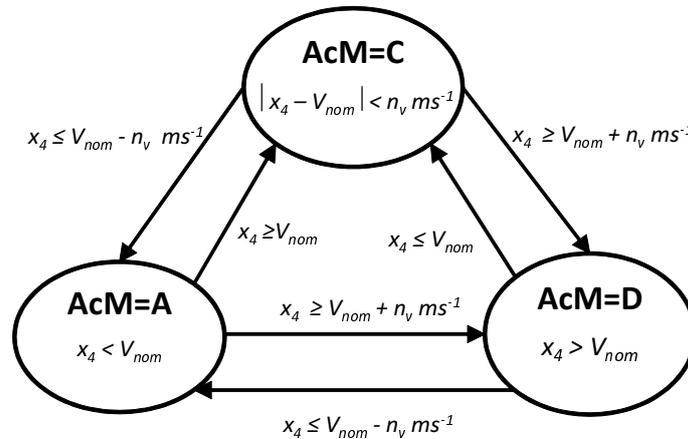


Figura 2.9: Máquina de estados finitos para definir el modo de aceleración

Modo de Altitud (AIM). El modo de altitud refleja los estados de ascenso (C), descenso (D), o a nivel (L) de la aeronave. Para determinar dicho estado la altitud x_3 de la aeronave es comparada con la altitud del vector de intenciones (habitualmente definida por la altitud del próximo *waypoint* de la ruta)¹¹. Con el fin de evitar

¹⁰También se puede definir una nueva variable para indicar si se ha optado por realizar un despegue normal o un despegue con potencia reducida. En este caso, como el modelo será aplicado en operaciones de vuelo en crucero y descenso, esta variable no necesita ser considerada.

¹¹En el caso de que el modelo, además de utilizarse para la generación de trayectorias, se use también para generar datos sintéticos en la simulación de escenarios de tráfico, la altitud del vector de intenciones puede venir dada por una instrucción de altitud proveniente tanto de los sistemas del ATC como de los sistemas de resolución de conflictos a bordo [Canino et al. 2008, Dura et al. 2008].

transiciones no deseables por efecto del redondeo se ha establecido un margen de n_h metros alrededor de las altitudes de referencia (por ejemplo $n_h = 1$). Asociado al modo ascenso existe otra variable discreta que identifica el ajuste de potencia realizado durante el ascenso (*Reduced Power Mode* o *RPM*). Este ajuste, consiste en utilizar potencia de ascenso normal (*RPM=OFF*) o bien una potencia reducida en aquellos casos en que discrecionalmente lo considere oportuno (*RPM=ON*).

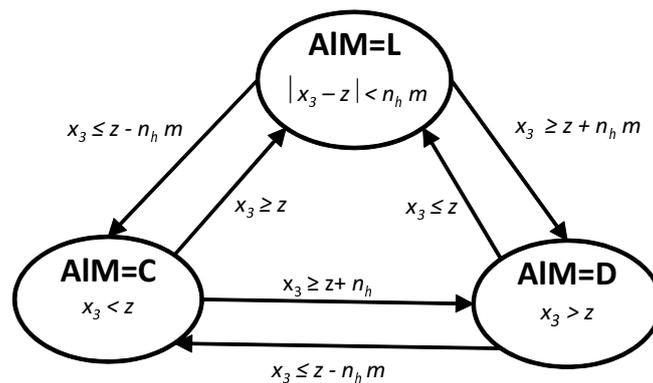


Figura 2.10: Máquina de estados finitos para el modo *AM*

Modo Troposfera (*TrM*). Esta variable distingue entre los casos en que la aeronave se encuentra por debajo (*L*) o por encima (*H*) de la troposfera, mediante la comparación de su altitud con la altitud de la tropopausa. Se utiliza para definir variables del modelo atmosférico tales como la densidad.

Fase de Descenso (*DP*). Desde el punto de vista de las operaciones de descenso, esta fase del vuelo puede estar dividida en cuatro subfases. Cada subfase representa una configuración de la aeronave (en términos de configuración de *flaps* y ajuste de potencia). Las cuatro fases del descenso son: descenso superior (*Upper Descent, UD*), descenso inferior (*Lower Descent, LD*), aproximación (*Approach, AP*) y aterrizaje (*Landing, LA*). Cada una de ellas se determina en función de la velocidad y altitud de la aeronave. Para ello, la velocidad de la aeronave se compara con las velocidades mínimas de crucero y aproximación, mientras que su altitud se compara con una altura de referencia, h_{des} , establecida en el modelo de procedimiento de la compañía para ajustar la potencia (en combinación con ajuste de *flaps*). Las dos altitudes de referencia básicas son: la altura máxima respecto al aeropuerto en la que se ejecuta el procedimiento de aproximación, h_{max-AP} , y la altura máxima respecto al aeropuerto en la que se lleva a cabo el procedimiento de aterrizaje, h_{max-LD} .

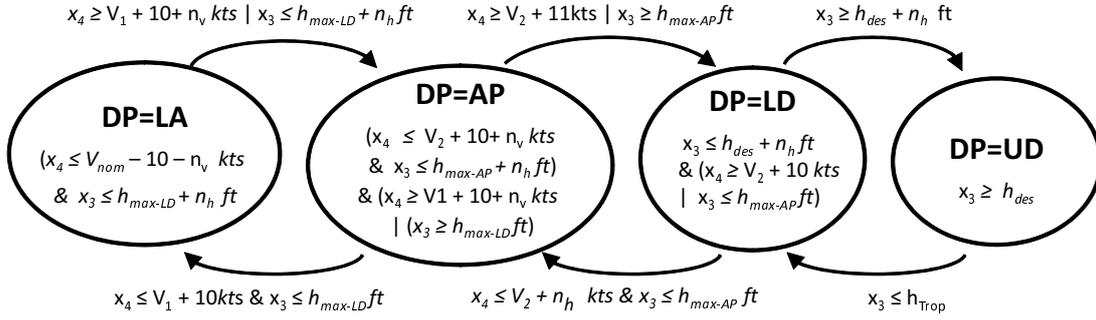


Figura 2.11: Máquina de estados finitos para la fase de descenso

Este estado también se puede utilizar para establecer criterios de búsqueda de velocidades para lograr trayectorias óptimas sujetas a restricciones temporales en determinados *waypoints*.

2.1.5.3. Cálculo del vector de control

La potencia, u_1 , está basada en los estados discretos anteriores y se obtiene como [Glover y Ligeros 2004]:

$$u_1 = \begin{cases} T_{MaxClimb} & AIM = C \wedge RPM = OFF \\ T_{MaxClimb} C_{poured} - \frac{C_D S \rho}{2} x_4^2 (1 - C_{poured}) & AIM = C \wedge RPM = ON \\ C_{Tdes}(FP) T_{MaxClimb} & AIM = D \vee [AIM = L \wedge AcM = D] \\ 0,95 T_{MaxClimb} & AIM = L \wedge AcM = A \\ \frac{C_D S \rho}{2} x_4^2 & AIM = L \wedge AcM = C \end{cases}$$

Donde $T_{MaxClimb}$ viene dada por [Eurocontrol 2009a]:

$$T_{MaxClimb} = \begin{cases} C_{TC1} \left(1 - \frac{x_3}{C_{TC2}} + C_{TC3} x_3^2 \right) & \text{para reactor} \\ \frac{C_{TC1}}{x_4} \left(1 - \frac{x_3}{C_{TC2}} + C_{TC3} x_3^2 \right) & \text{para turbohélice} \\ \frac{C_{TC1}}{x_4} \left(1 - \frac{x_3}{C_{TC2}} + \frac{C_{TC3}}{x_4} \right) & \text{para pistón} \end{cases} \quad (2.26)$$

Los valores C_{TC1} , C_{TC2} y C_{TC3} dependen del tipo de aeronave y también pueden obtenerse a partir del modelo de performance de aeronave BADA. El valor de $C_{Tdes}(DP)$ para los distintos valores de la fase de vuelo depende del tipo de aeronave y también son proporcionados por el modelo de performance de aeronave.

El alabeo, u_2 se implementa en [Glover y Ligeros 2004] mediante un control lineal que considera dos tipos de desviaciones: (i) la desviación lateral instantánea respecto a la

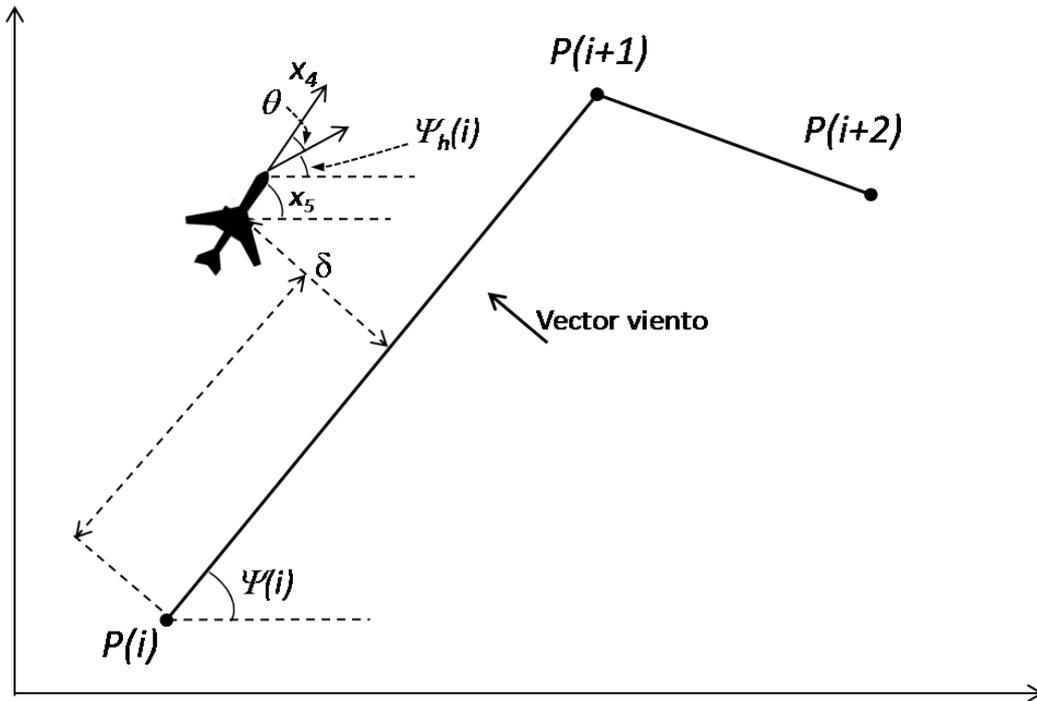


Figura 2.12: Geometría para el cálculo de la desviación de ruta y de rumbo

ruta horizontal, $\delta(t)$, (ii) la desviación entre el rumbo actual de la aeronave y el rumbo requerido para seguir el curso de la ruta.

La desviación lateral respecto a la ruta viene dada por (ver figura 2.12):

$$\delta(t) = [-\sin \psi_{c,i} \quad \cos \psi_{c,i} \quad 0] (P(t) - P_i) \quad (2.27)$$

siendo $P(t) = (x_1(t), x_2(t), x_3(t))$ el punto que define la posición de la aeronave, asumiendo que se encuentra entre los *waypoints* i e $i+1$. Por tanto es posible definir una función de control lineal como

$$\phi_1 = k_1 \delta(t) + k_2 \theta(t) \quad (2.28)$$

donde los coeficientes k_1 y k_2 pueden determinarse mediante la imposición de determinadas restricciones de estabilidad tal y como se describe en [Glover y Ligeros 2004].

Por otro lado, ϕ_1 es acotada con el fin de evitar valores de ϕ_1 que sobrepasen los límites nominales ϕ_{nom} resultando,

$$\phi_2(t) = \begin{cases} -\phi_{nom} & \text{si } \phi_1 \leq -\phi_{nom} \\ \phi_1(t) & \text{si } -\phi_{nom} \leq \phi_1 \leq \phi_{nom} \\ \phi_{nom} & \text{si } \phi_1 \geq \phi_{nom} \end{cases} \quad (2.29)$$

Una segunda acotación sobre ϕ_2 es necesaria para evitar que sus valores no den lugar a valores de rumbos, x_5 , que impidan a la aeronave converger hacia su correspondiente segmento de ruta. Esta circunstancia puede ocurrir cuando la aeronave se encuentre demasiado alejada del segmento de ruta, de forma que el ángulo de alabeo produzca valores de rumbo que hagan girar a la aeronave en círculos laterales a dicho segmento. De este modo resulta un ángulo de alabeo,

$$u_2(t) = \begin{cases} \min(\phi_2(t), 0) & \text{si } \phi/2 \geq x_5 \geq \bar{\psi} \\ \max(\phi_2(t), 0) & \text{si } -\pi/2 \leq x_5 \leq -\bar{\psi} \end{cases} \quad (2.30)$$

Por último, el ángulo de senda, u_3 , se obtiene a partir del factor de reparto de energía (*ESF*), teniendo en cuenta la expresión 2.10 de la sección 2.1.3 para el modelo de energía total. Asumiendo los casos en que la velocidad y la tracción se controlan de forma independiente la ecuación 2.10 se puede reordenar de la siguiente forma

$$(T - D)V_{TAS} = mg \frac{dh}{dt} + mV_{TAS} \frac{dV_{TAS}}{dh} \frac{dh}{dt} \quad (2.31)$$

Despejando el *ROCD*¹² de la expresión anterior resulta:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{(T - D)V_{TAS}}{mg} \left[1 + \frac{V_{TAS}}{g} \frac{dV_{TAS}}{dh} \right]^{-1} \quad (2.32)$$

A partir de la igualdad anterior se deduce que la relación entre la energía potencial y cinética, o factor de reparto de energía (*EFS*)¹³ viene dado por [Eurocontrol 1987]:

$$ESF = \left[1 + \frac{V_{TAS}}{g} \frac{dV_{TAS}}{dh} \right]^{-1} \quad (2.33)$$

La ventaja de utilizar el término anterior radica en el hecho de que el *EFS* puede fácilmente obtenerse a partir de los modos *AcM* y *SM* de la siguiente manera [EEC et al. 1995]:

1. Vuelo a número *Mach* constante por encima de la troposfera:

$$ESF = 1$$

Es decir, que por encima de la tropopausa la temperatura y la velocidad del sonido es constante, de forma que para mantener un *mach* constante no se requiere aceleración y entonces toda la potencia se utiliza para cambiar de altitud.

¹²ROCD (Rate Of Climb/Descent) es el término habitualmente utilizado para definir la velocidad vertical de la aeronave.

¹³EFS: Energy Shared Factor. En la referencia [Eurocontrol 2009a] el ESF se representa como una función del número *Mach*, $f\{M\}$.

2. Vuelo a *Mach* constante por debajo de la tropopausa:

$$ESF = \left(1 + \frac{\gamma RK_T}{2g} M^2\right)^{-1} \quad (2.34)$$

3. Velocidad *CAS* por debajo de la tropopausa:

$$ESF = \left\{1 + \frac{\gamma RK_T}{2g} M^2 + \left[\left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{\frac{-1}{\gamma - 1}} - 1\right]\right\}^{-1} \quad (2.35)$$

4. Velocidad constante por encima de la tropopausa:

En los casos en que el ni el *Mach* ni la velocidad *CAS* se mantengan constantes los valores usados están especificados en la tabla 2.3.

	<i>SM=A</i>	<i>SM=C</i>	<i>SM=D</i>
<i>AcM=C</i>	0.3	Seguir V_{nom}	0.7
<i>AcM=L</i>	0	0	0
<i>AcM=D</i>	0.7	Seguir V_{nom}	0.3

Tabla 2.3: Ajuste del factor de reparto de energía

2.2. Síntesis de trayectoria bajo restricciones

En un contexto TBO, la especificación del plan de vuelo operacional descrito en la sección 2.1.4 forma parte del proceso de cálculo de trayectorias. Por otra parte, el plan de vuelo operacional (intenciones) es el resultado de un proceso previo que considera restricciones de tipo espacial y temporal.

Las restricciones espaciales vienen impuestas por las regiones de espacio aéreo en las que no está permitido el vuelo. Las regiones de excesiva densidad de tráfico, las células tormentosas o el terreno son causa de restricciones espaciales que afectan a la morfología del plan de vuelo 3D.

Las restricciones temporales vienen dadas por la asignación de tiempos requeridos de llegada (RTA o *Required Time of Arrival*) a determinados puntos del plan de vuelo 3D. Estas restricciones afectan al perfil de velocidades operacionales.

La síntesis de trayectorias sujetas a las restricciones anteriores lleva aparejado un proceso de optimización. Desde la perspectiva aire, la tripulación trata de lograr trayectorias

libres de conflicto de mínimo coste operacional. Desde el punto de vista del ATC las restricciones están orientadas a lograr trayectorias libres de conflictos y que proporcionen flujos de tráfico eficientes.

El problema de la optimización de la trayectoria se puede formalizar de la siguiente manera. Dado un sistema dinámico

$$\dot{\mathbf{x}} = f[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), s] \quad (2.36)$$

cuyas condiciones iniciales en $t = t_0$ vienen dadas por

$$\psi_{0,a} \leq \psi[\mathbf{x}(t_0), \mathbf{u}(t_0), s, t_0] \leq \psi_{0,b}$$

y las condiciones finales en $t = t_f$ son

$$\psi_{f,a} \leq \psi[\mathbf{x}(t_f), \mathbf{u}(t_f), s, t_f] \leq \psi_{f,b}$$

y en el que la solución debe satisfacer las restricciones algebraicas

$$g_a \leq \mathbf{g}[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), s, t] \leq g_b \quad (2.37)$$

donde \mathbf{g} es el vector de dimensión n_g y además el vector de estado y el vector de control están limitados de la forma siguiente:

$$\mathbf{x}_a \leq \mathbf{x}(t) \leq \mathbf{x}_b \quad (2.38)$$

$$\mathbf{u}_a \leq \mathbf{u}(t) \leq \mathbf{u}_b \quad (2.39)$$

Por otra parte, es posible definir un conjunto de fases o dominios de tiempo dentro del intervalo $[t_0, t_f]$ debido a que las ecuaciones diferenciales que definen la relación 2.36 pueden variar en cada dominio. La frontera entre dos fases cualquiera $k-1$ y k (también denominada criterio de evento) permite ligar dos de ellas forzando los estados a ser continuos. Es decir,

$$x^{k-1}(t_f^{k-1}) = x^k(t_0^k) \quad (2.40)$$

La evaluación de la trayectoria en el intervalo $[t_0, t_f]$ de acuerdo a una métrica q viene expresada en la forma

$$\int_{t_0}^{t_f} q[\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), s, t] dt \quad (2.41)$$

2. Modelos y algoritmos matemáticos...

El problema de control óptimo básico consiste en determinar los valores de u^k y s^k en cada fase, $k \in [1, M]$ que minimicen el funcional

$$J = \varphi(x^1(t_o), x^1(t_f), s^1, t_0^1, t_f^1, \dots, x^M(t_o), x^M(t_f), s^M, t_0^M, t_f^M, \dots) \quad (2.42)$$

La optimización de sendas de vuelo en un entorno TPU para minimizar un cierto índice de coste con restricciones de seguridad es un problema de optimización no convexo que muestra no linealidades significantes. Por tanto, cuando el número de restricciones es elevado (en distancias largas o bien en rutas de llegada con progresivos flujos de tráfico convergente) se plantean dificultades para encontrar soluciones óptimas en tiempo real.

En [Betts 1998] se puede encontrar un resumen de los distintos métodos numéricos para la resolución del problema planteado (programación no lineal, control óptimo, análisis numérico o una combinación de los anteriores). En general todos estos métodos utilizan algún tipo de iteración para la búsqueda y evaluación dentro de un conjunto finito de soluciones desconocidas.

2.2.1. Métricas para evaluar el coste de trayectorias

El coste operacional de la trayectoria de una aeronave, i , que tiene una duración t_f se puede expresar como

$$J_i = \int_o^{t_f} L_i(\mathbf{x}(t), t) dt \quad (2.43)$$

donde L_i representa el coste instantáneo de la operación y que viene dada como una combinación lineal del coste del combustible y de los costes de la operación por unidad de tiempo.

El coste del combustible viene dado por

$$J_{i,c} = \int_o^{t_f} \eta u_1 dt \quad (2.44)$$

donde η representa el consumo específico por unidad de potencia de modo que ηu_1 es el régimen instantáneo de consumo de combustible (*fuel flow*).

Las velocidades operativas y las altitudes del plan de vuelo operacional se obtienen mediante un proceso de optimización del coste operacional de la trayectoria. De esta forma el tiempo de llegada óptimo para la aeronave es $t_{f,\text{óptimo}} = T_i$.

El coste operacional de una trayectoria también se puede medir en función de la desviación del tiempo de llegada respecto al tiempo preferente, T_i , representado en la figura 2.13. La penalización por unidad de tiempo cuando la aeronave alcanza su punto final de la trayectoria antes o después de T_i viene dada respectivamente por los parámetros

α_i y β_i . De este modo el coste operacional para una trayectoria es

$$J_i = \alpha_i \max\{0, T_i - t_i\} + \beta_i \max\{0, t_i - T_i\} \quad (2.45)$$

Por otra parte, el coste global de las trayectorias de un conjunto de aeronaves, N , se puede expresar como

$$\sum_{i=1}^N J_i \quad (2.46)$$

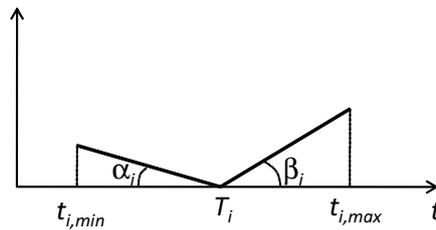


Figura 2.13: Coste operacional en función del tiempo óptimo de llegada

2.2.2. Síntesis de trayectorias óptimas

Desde la perspectiva aire, la síntesis de trayectorias preferentes de usuario en un entorno *Vuelo Libre* es un problema que puede abordarse en dos etapas (ver figura 2.14):

a) *Cálculo del conjunto de sendas óptimas* a partir de las restricciones espaciales en la región de vuelo que atravesará la aeronave desde su posición inicial a su posición final. Esta senda de vuelo proporcionará un plan de vuelo 3D a partir del cual calcular la trayectoria.

b) *Cálculo de la trayectoria 4D óptima* de acuerdo a la senda óptima de vuelo. En este caso se optimiza la trayectoria modificando la velocidad como parámetro que relaciona el tiempo de vuelo y el consumo de aeronave. En operaciones de llegada en áreas terminales con descensos planificados de forma continuada, la velocidad afecta al consumo únicamente en el tramo de crucero previo al descenso. Así es el tiempo el factor que más penaliza el coste de las operaciones de llegada (pérdidas de conexiones, sustituciones de tripulaciones, etc.).

Desde la perspectiva tierra, el proceso de síntesis de trayectoria óptima forma parte de un proceso más amplio (ver figura 2.15) en el cual se introducen nuevas restricciones espacio-temporales para que las trayectorias no mantengan ningún conflicto entre sí.

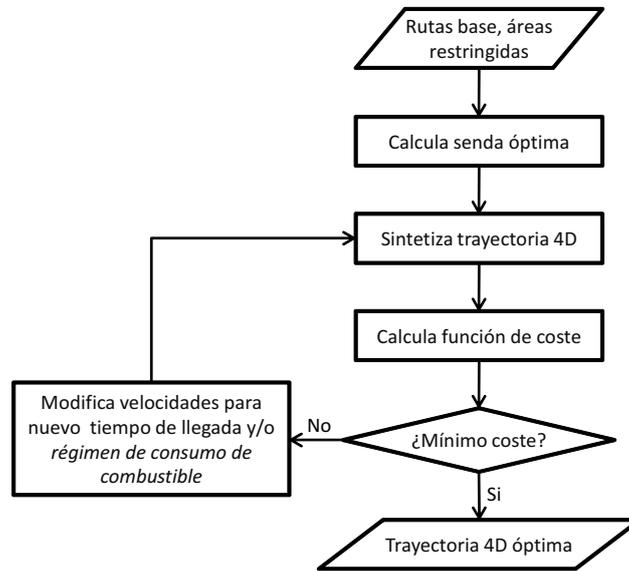


Figura 2.14: Síntesis de trayectorias preferentes de usuario

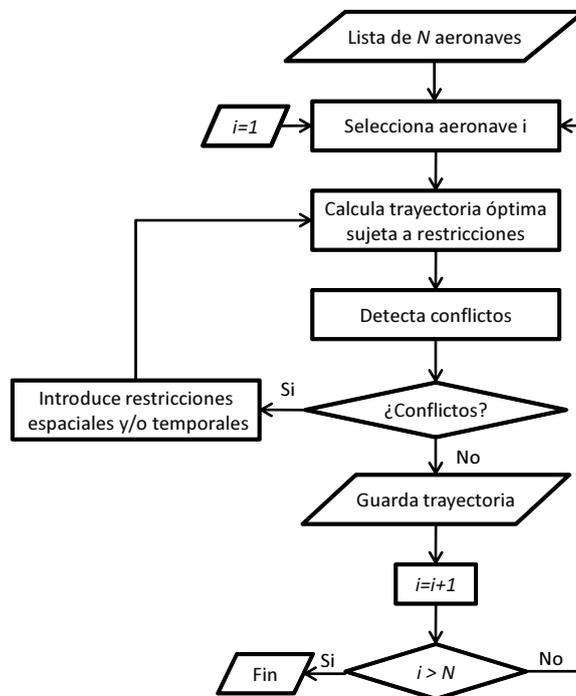


Figura 2.15: Generación de N trayectorias óptimas libres de conflicto

2.2.2.1. Cálculo de sendas de vuelo óptimas sujetas a restricciones espaciales

En un escenario de TPU la potencial existencia de infinitas sendas dificulta el proceso de optimización en un periodo determinado. Por lo tanto es necesario realizar algunas simplificaciones al problema. Estas simplificaciones tienen por objeto restringir el número de sendas posibles sobre las cuales realizar la búsqueda de la solución óptima. En [Hu et al. 2004] por ejemplo, se proponen dos modelos con distinto grado de simplificación representados en la figura 2.16. Uno de ellos plantea una optimización basada en la expansión del actual espacio aéreo estructurado. El otro sugiere un esquema de optimización basado en la proyección de un determinado intervalo de tiempo.

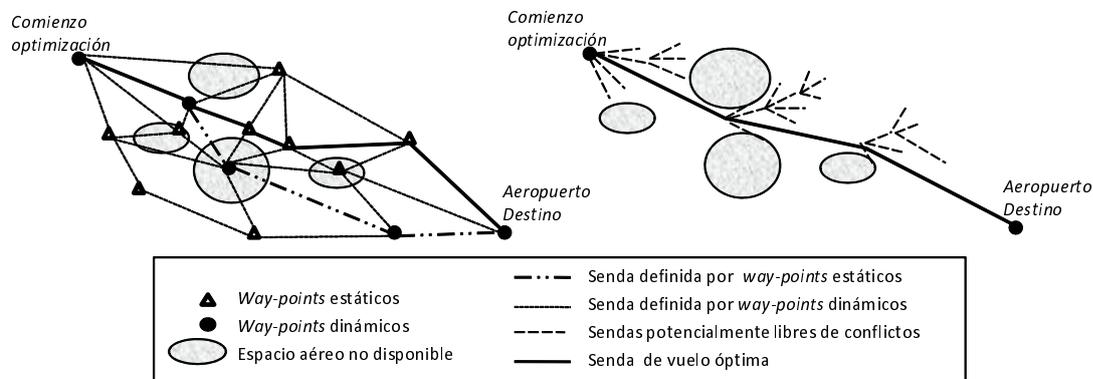


Figura 2.16: Optimización basada en expansión de espacio aéreo estructurado (izquierda) y basada en intervalo de tiempo (derecho) [Hu et al. 2004]

Optimización basada en la expansión del actual espacio aéreo estructurado

Este caso está ilustrado en la figura 2.16 (izquierda), donde se considera que las rutas del espacio aéreo se estructuran a partir de la combinación de un conjunto de *waypoints*. Estos *waypoints* dan lugar a una estructura de diversas sendas de vuelo posibles. La estructura podría ser generada por los sistemas de tierra y modificada dinámicamente por éstos si las circunstancias del entorno así lo aconsejan. A la vez los sistemas de tierra transmitirán a las aeronaves toda la información relativa a la estructura de rutas. Esta información sería utilizada por los sistemas de las aeronaves para encontrar la ruta óptima de vuelo. En caso de que la estructura sea alterada durante la ejecución de un vuelo, la aeronave procederá a una nueva optimización a partir del siguiente *waypoint* de la ruta. Aunque este modelo de arquitectura de rutas no explora todas las posibilidades del concepto de *vuelo libre* en ruta, sí proporciona en cambio cierto grado de flexibilidad frente a la necesaria estructura de rutas convergentes en áreas terminales. Por este motivo facilita la implementación práctica de procedimientos de llegada.

Optimización basada en intervalo de tiempo

Para eliminar las restricciones de *waypoints* anteriores, este modelo introduce los conceptos de *intervalo de tiempo* y *rumbo discreto*. La técnica basada en estos conceptos está orientada a discretizar el espacio aéreo no conflictivo con el fin de hacer posible una optimización eficaz. La técnica se basa en el proceso siguiente (figura 2.16 derecha):

El sistema ATC transmite periódicamente a cada aeronave datos del entorno y del espacio aéreo no conflictivo. El período comprendido entre sucesivas transmisiones es definido como *intervalo de tiempo*. La aeronave utiliza la información actualizada para optimizar el resto de senda de vuelo comenzando desde el siguiente intervalo de tiempo. La senda de vuelo para el intervalo de tiempo actual está determinada por la ejecución previa de la optimización. El proceso de optimización está basado sobre las subtrayectorias de cada intervalo de tiempo que son mucho más cortas que las líneas entre dos *waypoints* del modelo anterior. La optimización de una subtrayectoria proporciona un rumbo potencial que es seleccionado entre un conjunto de valores discretos.

La elección del valor del intervalo de tiempo y del conjunto de rumbos discretos es, por tanto, uno de los aspectos a estudiar con el fin de que el modelo funcione adecuadamente. Si el intervalo de tiempo es demasiado largo y el conjunto de rumbos discretos es demasiado pequeño, el espacio aéreo no conflictivo discreto puede ser similar al espacio aéreo que expande la estructura de rutas actuales. En cambio si el intervalo de tiempo es pequeño se incrementará la cantidad de potenciales sendas de vuelo con el consiguiente coste computacional. En [Hu et al. 2004] se fijó un intervalo de tiempo máximo de diez minutos, mientras que el conjunto de rumbos fue discretizado en incrementos de diez grados y se consideró además el rumbo directo desde la posición de la aeronave al aeropuerto de destino. Los autores aplicaron además un algoritmo de optimización genético en un escenario de vuelo en crucero a velocidad constante donde se consideró el tiempo como parámetro a optimizar. En el algoritmo fueron introducidas un conjunto de reglas heurísticas para dirigir y mejorar el proceso de búsqueda de soluciones en ambos modelos. Los resultados mostraron la viabilidad de calcular dichas sendas excepto para distancias superiores a 2000 millas náuticas. Por otra parte, salvo las simulaciones realizadas en este trabajo, no se han presentado otros datos relativos a la adaptabilidad de los modelos anteriores a rutas de llegada con velocidades variables en los que tanto el intervalo de tiempo como la discretización de rumbos debe ser necesariamente menor.

2.2.2.2. Cálculo de trayectorias sujetas a restricciones temporales

En el modelo de intenciones descrito en la sección 2.1.4 se contemplaba un conjunto de velocidades operacionales predefinidas. Sin embargo, en el futuro ATM será cada vez más frecuente generar trayectorias basadas en restricciones temporales. Estas restriccio-

nes asocian a uno o varios *waypoints* de un plan de vuelo 3D un tiempo (o ventana de tiempo) en el que la aeronave deberá sobrevolarlos (plan de vuelo 3.5D). En este caso, las velocidades del modelo de intenciones deberán obtenerse a partir de dichas restricciones temporales¹⁴. El proceso para la síntesis de este tipo de trayectorias está esquematizado en la figura 2.17. De acuerdo a dicho esquema, en el caso de que el plan de vuelo esté sometido a restricciones 3.5D, la trayectoria es sintetizada para cada uno de los tramos del plan de vuelo cuyo extremo tenga asociada una restricción temporal. La síntesis de la trayectoria en cada tramo se realiza de forma iterativa asignando distintas velocidades con el fin de hacer converger los tiempos de llegada de la aeronave hacia los tiempos requeridos de llegada a los respectivos *waypoints* [Canino et al. 2006]. Las velocidades operacionales vienen definidas por el vector $\mathbf{v} = [v_1, \dots, v_m]$ siendo m el número de segmentos verticales de vuelo establecidas durante el descenso (o número de estados del modo discreto *capas de vuelo* definido en la página 80), donde para cada segmento i , $v_{i,min} \leq v_i \leq v_{i,max}$. Obviamente, una vez fijada las restricciones temporales, el vector de velocidad óptimo es aquel que produce el menor consumo de combustible.

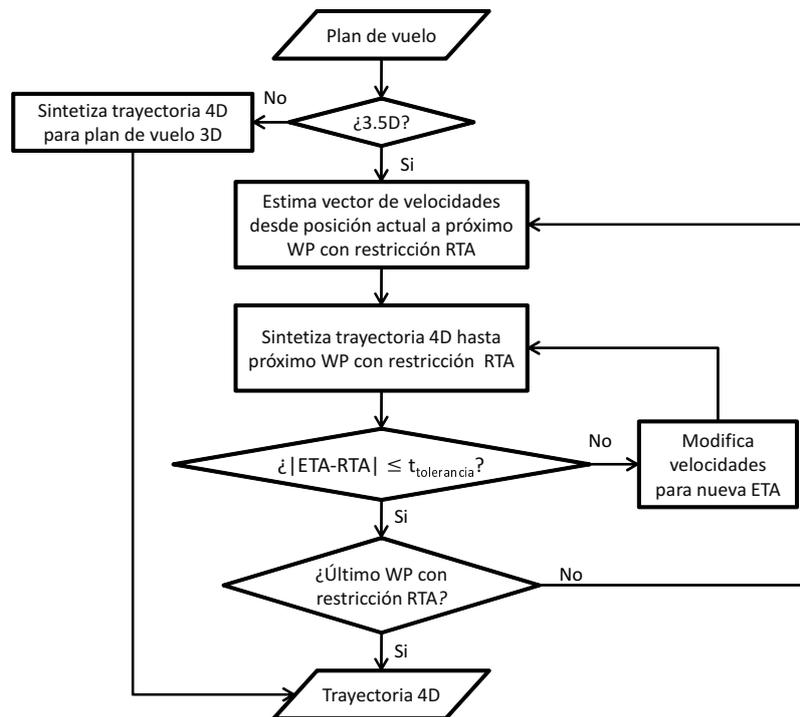


Figura 2.17: Esquema propuesto para la síntesis de trayectorias 4D bajo restricciones temporales

¹⁴De hecho las velocidades que forman parte del plan de vuelo operacional se obtienen mediante un proceso previo que calcula trayectorias óptimas considerando el *cost-index*. Cuando se imponen restricciones temporales, el proceso de optimización considera fija la variable tiempo y modifica la variable velocidad para obtener la trayectoria de menor coste de combustible.

2.3. Algoritmos para la detección de conflictos

La detección de conflictos forma parte tanto de los procesos de planificación de trayectorias como de las tareas de vigilancia y monitorización de éstas mientras se ejecutan. Por tanto el método a aplicar a la detección de conflictos dependerá de las circunstancias operacionales en las que será aplicado. En este contexto resulta útil considerar los atributos establecidos por *Kuchar y Yang* para clasificar los distintos modelos de detección de conflictos [Kuchar y Yang 1997]. A partir de la taxonomía propuesta por los autores, en esta sección se describen las características funcionales de los algoritmos de detección de conflictos basados en datos de trayectorias 4D nominales de las aeronaves. Las características de éstos últimos los hacen apropiados para llevar a cabo las tareas de planificación estratégica tanto desde la perspectiva del ATC como desde la de las aeronaves.

2.3.1. Clasificación

De acuerdo al esquema funcional propuesto en [Kuchar y Yang 1997], los distintos algoritmos para la detección de conflictos pueden clasificarse de acuerdo a tres atributos: las *dimensiones del estado* de la información, el *método empleado para la proyección temporal* de la aeronave y la *métrica* para la detección del conflicto.

Las *dimensiones del estado de la información* se refieren a la dimensión del vector de posición de la aeronave. En este sentido los modelos pueden considerar los conflictos en el plano horizontal, en el plano vertical o en ambos planos. La mayoría de los sistemas actuales se encuentran dentro de esta última categoría.

Los *métodos para la proyección temporal* del estado de la aeronave pueden ser nominales, probabilísticos o del caso peor.

Los métodos nominales proyectan el estado actual sin considerar ningún tipo de incertidumbre. Esta proyección puede estar basada en la proyección bien del estado actual de la aeronave (velocidad y rumbo) o bien puede estar basada en un modelo de predicción de trayectoria.

En los modelos probabilísticos la incertidumbre de la posición es modelada añadiendo determinados errores probabilísticos a la posición nominal. La incertidumbre en la posición futura de la aeronave se puede definir mediante intervalos de tiempo o de distancia alrededor de los valores proporcionados por la proyección nominal.

Por último en los modelos de caso peor se consideran todos los casos posibles de proyección hacia el futuro a partir de la actual posición.

Cabe destacar que tanto el método de proyección nominal como el de caso peor son casos particulares del método probabilístico. Así una proyección nominal significa que la aeronave seguirá la trayectoria obtenida con probabilidad 1, mientras que una proyección

de caso peor supone que todas las trayectorias tienen la misma posibilidad a partir de la posición actual.

Las *métricas* para determinar cuándo ocurre un conflicto son variadas. Las más simples definen un umbral de distancia de separación, mientras que otras utilizan un esquema más complejo basado en reglas para determinar los casos en los que dos aeronaves están en peligro de colisión. Algunos modelos incluso no definen el conflicto sino que tratan de capturar información para que sean otros sistemas los que evalúen la posibilidad de conflicto en base a dicha información y a la que procede de otras fuentes (por ejemplo datos del plan de vuelo de la aeronave). Estos sistemas más complejos tienen la finalidad fundamental de evitar falsas alarmas, mediante un refinamiento del conjunto de proyecciones o trayectorias conflictivas a priori, para determinar la posibilidad real de que éste se materialice.

Teniendo en cuenta la importancia que en los futuros escenarios de tráfico aéreo tienen las tareas de carácter estratégico, es evidente que los modelos centrales de los nuevos sistemas deberán ser modelos nominales basados en la proyección de la trayectoria. La métrica a utilizar en dichos algoritmos dependerá de la fase específica del vuelo. Así en crucero y descenso inicial la métrica podrá estar expresada en términos de distancia mientras que a medida que las aeronaves que se aproximen de forma secuencial estarán separadas por valores de tiempo.

2.3.2. Detección de conflictos entre trayectorias 4D

El esquema de este algoritmo ha sido propuesto en [Erzberger 1995] para el sistema CTAS y hasta la fecha actual continua siendo uno de los más eficientes desde el punto de vista computacional.

La entrada del algoritmo son las trayectorias 4 D de las aeronaves proporcionadas por un sintetizador de trayectorias y un conjunto de parámetros para definir el conflicto. La detección de conflicto entre dos trayectorias se realiza mediante el cálculo de la separación entre las trayectorias en cada intervalo discreto de tiempo.

El proceso de comparación de trayectorias por parejas para cada intervalo de tiempo puede resultar crítico cuando el conjunto de trayectorias es elevado y/o el intervalo de tiempos es reducido. Así para N trayectorias de aeronaves el número de procesos de comparación es $N(N - 1)/2$. Por eso, en una primera fase se excluyen de la detección de conflicto aquellas trayectorias cuya separación en altura sea superior al valor fijado por la métrica de detección del conflicto. La separación entre alturas, h , es un valor que dependerá únicamente de las fases de vuelo entre aeronaves. Así cuando ambas aeronaves se encuentran en vuelo de crucero la altitud se puede considerar $h=1000$ pies. En cambio si las trayectorias corresponden a tramos de descenso esta diferencia de altura deberá

incrementarse (por ejemplo $h=3000$ pies). De esta forma, a partir de la comparación de los segmentos de las trayectorias se crea una lista de segmentos delimitados por tiempo que permite especificar la separación vertical mínima. La exclusión de trayectorias basada en la medida de la separación vertical mínima supone, en general, la eliminación del 65-80 % de parejas de trayectorias durante el proceso de búsqueda de conflictos.

En una segunda fase se compara la distancia horizontal entre los puntos de las trayectorias no excluidas. La longitud del intervalo de tiempo usado para compensar dichos puntos se define en función de la fase de vuelo establecido. La selección de un intervalo de tiempo alto agiliza el cálculo, pero puede dar lugar a fallos en la detección de conflictos durante dicho intervalo. Por esta razón, también los tramos de las trayectorias son caracterizados en función de la fase del vuelo al objeto de fijar valores adecuados del intervalo temporal para el muestreo del conflicto.

Por último, se aplica un filtro de probabilidad de conflicto a aquellas trayectorias en las que se ha detectado el conflicto. La finalidad de este filtro es eliminar de la búsqueda falsos conflictos. La detección de falsos conflictos se produce debido a la incertidumbre del modelo de vientos así como de los errores debidos a las simplificaciones que introduce el modelo del sintetizador de trayectorias. La probabilidad de conflicto es determinada a partir de un modelo estadístico del error de la predicción de la trayectoria y la geometría del encuentro en el punto donde se detecta la mínima separación [Paielli y Erzberger 1997].

La evaluación de este algoritmo supuso la posibilidad de analizar más de 800 trayectorias en un periodo de 10 segundos. Estos valores hacen factible la utilización del algoritmo en procesos de planificación de trayectorias de llegada¹⁵.

Este mismo esquema de algoritmo es extrapolable a los sistemas de aeronave con la salvedad de que en este caso el número de comparaciones en un escenario de N aeronaves es $N-1$.

2.4. Algoritmos para la resolución de conflictos

Una vez detectado un conflicto el siguiente paso natural es su resolución. Los sistemas de resolución automáticos existentes actualmente proponen soluciones al ATC o al piloto para que éste las implemente a través de instrucciones o de maniobras respectivamente. Sin embargo en los futuros escenarios de tráfico aéreo la implementación de solución requerirá un proceso previo de negociación que también estará definido por un modelo de negociación. Desde esta perspectiva, el proceso de resolución de conflictos entre trayectorias se podrá considerar dividido en dos etapas. En una primera etapa se buscan soluciones

¹⁵Hay que tener en cuenta que en los procesos de planificación de trayectorias óptimas libres de conflicto, este algoritmo de detección de conflictos deberá ejecutarse repetidamente junto con los algoritmos de resolución de conflictos y de síntesis de trayectorias hasta encontrar una solución satisfactoria.

al conflicto. En una segunda etapa cada una de las soluciones obtenidas se negociarán con aquellos agentes afectados.

En esta sección se identifican en primer lugar los atributos que caracterizan a los distintos algoritmos de resolución de conflictos de acuerdo a la taxonomía propuesta en [Kuchar y Yang 1997]. Posteriormente se presenta un esquema funcional que describe el proceso de búsqueda de trayectorias libres de conflicto. Finalmente se plantea una clasificación de los procesos de solución de conflictos distribuida.

2.4.1. Clasificación

Los algoritmos de resolución de conflictos pueden clasificarse atendiendo a tres atributos [Kuchar y Yang 1997]: *el método para la resolución, dimensión de las maniobras para la resolución y gestión de conflictos con múltiples aeronaves.*

Los *métodos para la resolución* de conflictos han sido clasificados por [Kuchar y Yang, 1997] en cinco grupos: prescritos, optimizados, campos de fuerza, manuales/automáticos o sin resolución ¹⁶.

Los *métodos de resolución* prescritos proporcionan un conjunto de maniobras fijas a partir de un conjunto de procedimientos predefinidos. Tienen la ventaja de reducir el tiempo de respuesta a costa de una disminución en la eficiencia para proporcionar soluciones óptimas. También son fácilmente comprensibles y aplicables por el elemento humano, pero en cambio pueden dar lugar a situaciones de ambigüedad si las reglas no cubren todos los casos posibles.

Los *métodos optimizados*, proporcionan soluciones a partir de un proceso de optimización de diversas funciones de coste (consumo, aceleraciones no deseadas, etc.). Frente a sus evidentes ventajas, en algunos casos presentan limitaciones a la hora de ser implementados en sistemas de tiempo real [Bilimoria 2000, Menon y Sweriduk 1999, Durand et al. 1995].

Los *métodos basados en los campos de fuerza* tratan a las aeronaves como parejas de partículas cargadas y utilizan las leyes de la electrostática para determinar los cursos de las trayectorias de evasión posibles [Duong y Zeghal 1997, Zeghal y Ferber 1993]. En [Eby y Kelly 1995], los autores demuestran que esta aproximación podía resolver conflictos de forma exitosa en una situación de control centralizada en tierra. Para demostrarlo adaptaron el algoritmo que modela los campos de fuerza a los problemas del mantenimiento de la autoseparación entre aeronaves [Eby y Kelly 1999].

Los *métodos de resolución manuales* permiten a los pilotos crear posibles soluciones y disponer de información sobre la viabilidad de la acción a ejecutar. Son, por tanto, solu-

¹⁶Kuchar también incluye los métodos de resolución manuales utilizados por los pilotos a partir de la información que tienen del entorno y los sistemas que únicamente disponen de detector de conflictos.

ciones menos automatizadas y más lentas y están destinadas a proporcionar ayuda para que sea la tripulación la que implemente manualmente soluciones para evitar obstáculos debido al terreno o la meteorología. Los métodos más automatizados proporcionan un determinado rango de maniobras de evasión que van desde los virajes, movimientos verticales, cambios de velocidades, etc.

Por último [Kuchar y Yang 1997] hacen una distinción entre los modelos atendiendo al modo de *gestión de conflictos entre múltiples aeronaves*. Un modelo puede manejar de forma explícita múltiples conflictos, o bien puede aplicarse sucesivamente mediante resolución por parejas. Los autores señalan que hay algunos casos en la solución por parejas por sí sola no es suficiente para evitar el conflicto y que cualquier modelo que se utiliza en una situación real de tráfico debe tener la capacidad explícita para resolver los conflictos entre varios aviones. Esta afirmación se apoya en la idea de que la resolución de conflictos por parejas se pueden generar nuevos conflictos que deberán tenerse en cuenta, por lo que una solución simultánea entre múltiples aeronaves sería más robusta. Sin embargo hasta la fecha no se han desarrollado soluciones válidas al problema de la resolución multilateral de conflictos.

La gestión de conflictos es un aspecto central de las operaciones de tráfico aéreo del futuro. Por ello, este último atributo debe ser desarrollado con el fin de identificar las distintas opciones para gestionar las diversas soluciones que permite resolver un conflicto entre dos o más aeronaves. Por ello, y teniendo en cuenta los objetivos de esta Tesis, los algoritmos anteriores pueden clasificarse atendiendo a las características del escenario de tráfico aéreo en el que éstos son aplicados. Una primera clasificación considera el carácter centralizado o descentralizado del escenario de tráfico aéreo. En los escenarios centralizados las tareas de detección y resolución de conflicto entre un conjunto de aeronaves recaen en el ATC, mientras que en un escenario descentralizado estas tareas son llevadas a cabo por la aeronaves de forma autónoma. También es posible distinguir entre escenarios colaborativos en lo que la búsqueda de soluciones al conflicto se realiza mediante un intercambio de propuestas entre los agentes de aquellos escenarios no colaborativos y en los que no existe posibilidad de intercomunicación.

2.4.2. Gestión de conflictos entre múltiples aeronaves

La resolución automática de conflictos entre diversos agentes, supone no sólo disponer de modelos para calcular las posibles soluciones al conflicto sino además de establecer esquemas para la gestión e implementación de aquella solución que mejor se adapta a los objetivos de cada agente.

Debido a que las soluciones propuestas por los sistemas de tierra podrían no satisfacer las restricciones de la aeronave implicada o a la inversa, es necesario que cada solución

propuesta por un agente sea evaluada por aquel que la recibe. En caso de que la evaluación de la propuesta no satisfaga los requisitos del receptor se deberá continuar con un proceso de negociación entre aeronave y ATC (o entre aeronaves) para encontrar una propuesta que cumpla con dichos requisitos.

Para analizar y clasificar los distintos esquemas posibles de gestión de soluciones a conflictos, resulta útil vincularlos con las distintas etapas o circunstancias operacionales de un escenario TBO de llegada [Sorensen 2000]. Estas etapas son las siguientes:

- *Etapa 1:* Cada aeronave calcula a nivel individual su trayectoria prevista de llegada basándose en la información disponible. En este cálculo se considerarán las restricciones impuestas por el terreno, meteorología y tráfico (difundida esta última a través de ADS-B o desde los sistemas de tierra). Por tanto se trata del cálculo que realiza la aeronave de una trayectoria libre de conflicto respecto a otras aeronaves en una forma no cooperativa (aunque para ello sea preciso recabar información de otros agentes sobre las condiciones del entorno).
- *Etapa 2:* Esta trayectoria se negocia con los sistemas de tierra (resolución cooperativa centralizada en ATC). Durante dicha negociación el sistema de tierra comprobará que las trayectorias propuestas no entren en conflicto y realizará las correspondientes propuestas para evitar dicha conflictividad (empleando para ello algoritmos de resolución centralizada y no cooperativa como el que se describe en la sección siguiente).
- *Etapa 3:* Una vez negociadas las trayectorias y producida la secuencia, el ATC podrá delegar la autoseparación en las aeronaves.
- *Etapa 4:* Ante los eventos en los que las aeronaves se vean obligadas o estén interesadas en alterar la secuencia por razones no previstas en la planificación anterior, podrán negociar entre ellas la separación (resolución de conflictos cooperativa y descentralizada).

De acuerdo a este escenario de operaciones, en esta Tesis se propone la siguiente taxonomía para clasificar la gestión de las soluciones a conflictos: *a)* Soluciones centralizadas frente a soluciones descentralizadas, *b)* Soluciones no cooperativas frente a soluciones cooperativas y *c)* Soluciones estratégicas frente a soluciones tácticas.

- **Solución centralizada versus solución descentralizada.** Los algoritmos de solución centralizada deberán emplearse en los sistemas que tengan una visión global del tráfico aéreo en una región específica. En cambio los algoritmos descentralizados podrán utilizarse en las aeronaves para tareas de autoseparación.

- **Solución no cooperativa versus solución cooperativa.** En este caso, la perspectiva empleada es la misma que en la *Teoría de Juegos*. Es decir, que la solución es o no cooperativa dependiendo de que en la búsqueda de dicha solución exista o no intercomunicación entre los agentes implicados en el conflicto. En los dos casos, la aeronave deberá llevar a cabo un proceso de búsqueda de soluciones similar al que se describe en la sección siguiente.
- **Solución táctica versus solución estratégica.** Es decir, aquellas situaciones que plantean soluciones para actuar a corto plazo ante la inminencia del conflicto y aquellas otras cuyas soluciones permiten planificar la trayectoria de la aeronave con la antelación necesaria para evitar conflictos en el medio y largo plazo.

Esta taxonomía se ha propuesto en esta Tesis para diseñar las funcionalidades o capacidades de aeronave y de ATC encargadas de la búsqueda de soluciones a conflictos. Como se verá en el *capítulo 5*, los diferentes modelos de resolución de conflictos podrán implementarse como planes de agente. A su vez estos planes son disparados por planes de nivel superior que seleccionan el plan que contiene el modelo o modelos matemáticos que corresponden a la circunstancia operacional en la cual va a ser aplicado (planificación de trayectorias, monitorización y vigilancia, etc.).

En el grupo de modelos de resolución de conflictos para escenarios centralizados no cooperativos cabe citar los algoritmos utilizados en el cálculo de secuencias de tráfico de llegada. Dichos algoritmos forman parte de los modelos matemáticos de la herramienta CTAS [Green et al. 1998, Erzberger 2006] y sus parámetros característicos serán descritos en la siguiente sección. También en [Menon et al. 1999] los autores proponen un método que utiliza funciones de costes similares a las usadas para los agentes [Menon et al. 1999]. Sin embargo, en lugar de plantear esquemas de negociación entre dichos agentes, proponen métodos de cuasilinearización. Para ello, se plantea un sistema constituido por las trayectorias de las aeronaves definidas como secuencias de *waypoints* cuatridimensionales y varios métodos de parametrización. Las trayectorias óptimas se calculan a partir de una representación parametrizada de las trayectorias de las aeronaves, de las funciones de costos apropiadas y de métodos de programación cuadrática secuencial. Estas nuevas trayectorias minimizan el coste global del sistema sujeto a la restricción de que la aeronave no viole las zonas protegidas de otros aviones. El método desarrollado puede gestionar cualquier número de aeronaves en conflicto.

Entre los algoritmos centralizados cooperativos se encuentran los trabajos de [Wangerman y Stengel 1999]. En este caso los autores proponen un esquema para la resolución de conflictos entre aeronaves, pero en donde la intercomunicación existe únicamente entre las aeronaves y el sistema de control de tierra que se encarga de que las trayectorias de las aeronaves no entren en conflicto.

Dentro de los trabajos que proponen algoritmos descentralizados no cooperativos se encuentran los trabajos de *Tomlin et al.* para la resolución táctica de conflictos en los que se preserva la separación independientemente de las acciones de las otras aeronaves [Tomlin et al. 1997, Tomlin et al. 1997a, Tomlin et al. 1998]. Además *Kosecka* y otros aplicaron métodos del campo de la robótica a la gestión del tráfico aéreo [Kosecka et al. 1997]. La principal dificultad que plantea la resolución de conflictos basados en la teoría de juegos no cooperativa y en escenarios del caso peor es que, por naturaleza, no producen resoluciones óptimas. Estos algoritmos tienen su aplicación principal en situaciones tácticas y cuando previamente no ha podido encontrarse una solución estratégica.

Por eso, otras soluciones proponen la resolución de conflictos entre aeronaves de forma cooperativa. Diversos trabajos de la Universidad de Texas A&M han comenzado a centrarse en la idea de utilizar sistemas de agentes para gestionar las soluciones de conflicto a nivel de aeronave y para realizar otras tareas de asesoramiento al piloto [Shandy y Valasek 2001, Rong et al. 2002, Rong et al. 2003]. En este caso los agentes actúan como asesores que vigilan posibles situaciones conflictivas y proporcionan al piloto advertencias o recomendaciones.

2.4.3. Generación automática de soluciones para conflictos entre trayectorias 4D

El proceso de gestión de soluciones se apoya en la propuestas que cada agente implicado en la resolución calcula. Por tanto es necesario caracterizar la funcionalidad encargada de la generación de soluciones de conflictos detectados entre trayectorias 4D.

En esta sección se presenta una descripción funcional de los algoritmos que generan trayectorias que solucionan conflictos detectados en una etapa previa. Dichos algoritmos forman parte tanto de los sistemas de tierra como de los sistemas de a bordo. Esta descripción está basada en la propuesta realizada por [Erzberger 2006]. A diferencia de propuestas anteriores, el algoritmo contempla operaciones de vuelo a altitud y velocidades constantes, así como maniobras para resolver los conflictos similares a las empleadas en las modificaciones de los planes de vuelo para cada fase del vuelo. El modelo adolece aún de un conjunto de estrategias específicas para integrar la resolución de conflictos con la secuenciación óptima del tráfico de llegada. Sin embargo proporciona un esquema de bloques que permite identificar las funcionalidades de este tipo de algoritmos a la vez que sirve de base para diseños futuros.

El algoritmo está diseñado para obtener soluciones de forma unilateral por parte de la aeronave que lo ejecute, no contemplando por tanto una resolución cooperativa. Sin embargo dicho algoritmo se podría utilizar por cada aeronave como un motor de generación de propuestas de solución para ser negociadas.

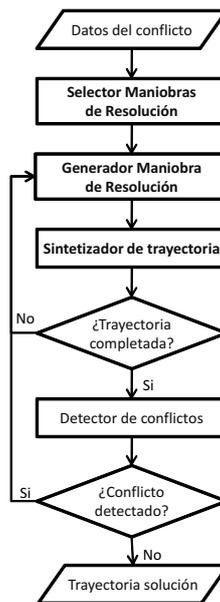


Figura 2.18: Diagrama de flujo de algoritmo de resolución

La arquitectura del algoritmo está representada en la figura 2.18. La entrada al algoritmo son los datos del conflicto entre una pareja de aeronaves procedentes de un sistema detector de conflictos. La salida es una trayectoria libre de conflicto.

La información que contiene los datos del conflicto incluye planes de vuelo de las aeronaves así como sus respectivas coordenadas, altitudes y velocidades tanto en el instante actual como en el instante en el que se producirá la pérdida de separación. El intervalo de tiempo entre el instante actual y el instante del conflicto es una variable que lógicamente juega un papel determinante a la hora de priorizar este conflicto respecto a otros.

Otras entradas del algoritmo son las restricciones de maniobras. Estas restricciones contienen maniobras que no son aplicables para la resolución debido a la proximidad de la aeronave a zonas de meteorología adversa. También se podrían aplicar restricciones a las aeronaves en función de su fase de vuelo (por ejemplo se podría excluir a una determinada aeronave de la resolución si esta se encontrara por ejemplo descendiendo y cerca de un determinado punto de llegada).

El selector de maniobras de resolución (SMR) se encarga de establecer la maniobra de resolución adecuada. Para ello identifica y clasifica el conflicto de acuerdo a una taxonomía de tipos de conflictos. Con esta información el SMR prioriza un conjunto de maniobras de resolución. Este conjunto de maniobras constituyen la entrada del Generador de Maniobras de Resolución (GMR).

El GMR contiene un conjunto de fórmulas analíticas y heurísticas destinadas a calcular los parámetros de una trayectoria de resolución simplificada para cada tipo de maniobra especificada por el selector de maniobras de resolución. También dispone el GMR de

un conjunto de reglas y procedimientos para seleccionar las coordenadas del punto del *waypoint* de retorno, entendido como un punto donde la trayectoria de resolución converge hacia la trayectoria del plan de vuelo original. Las trayectorias simplificadas son por tanto una plantilla que proporciona datos de entrada esenciales para que un sintetizador de trayectoria calcule una trayectoria 4D completa.

En el caso de que los datos proporcionados al sintetizador de trayectoria supongan sobrepasar los parámetros operacionales o de envolvente de la aeronave, la trayectoria no sería generada en el GMR y éste responde seleccionando la siguiente maniobra de resolución proporcionada por el SMR y enviando nuevos parámetros al sintetizador de trayectoria. Una vez obtenida una trayectoria, ésta se evalúa por un detector de conflictos para que compruebe que el conflicto inicial ha sido resuelto. Esta comprobación es necesaria debido a que las simplificaciones, aproximaciones y reglas empíricas usadas por el GMR podrían introducir diferencias significativas entre la maniobra de resolución de prueba y la trayectoria 4D producida por el sintetizador de trayectoria. Estas diferencias pudieran dar lugar a que el conflicto primario no estuviese totalmente resuelto con la trayectoria de resolución de prueba. La otra razón para verificar la trayectoria de resolución es que se podrían presentar conflictos secundarios respecto a una tercera aeronave. Estos conflictos secundarios son más frecuentes conforme aumenta el horizonte de tiempo para la detección de conflicto o conforme se incrementa la densidad de tráfico. Si finalmente resulta una trayectoria libre de conflictos para un horizonte de tiempo de resolución específico, el algoritmo propone la trayectoria de resolución.

Si la trayectoria libre de conflictos se obtiene por el sistema de tierra, éste envía la solución a la aeronave. Después de recibir un mensaje de la aeronave confirmando que dicha trayectoria será cumplida, el sistema de tierra actualiza la base de datos de las trayectorias aprobadas para la aeronave. En caso de que no se encuentre una resolución el GMR dispone de métodos extendidos para calcular nuevas propuestas (discutidos en [Erzberger 2006]). Si aún así el conflicto no se resuelve entonces los datos del conflicto pasan a un proceso de resolución separado para su tratamiento de forma más táctica [Erzberger 2004].

2.5. Algoritmos para la secuenciación de llegadas de aeronaves

El problema del flujo de tráfico óptimo y seguro de aeronaves de llegada puede abordarse como un problema de secuenciado de llegadas a una pista del aeropuerto para ajustar la demanda de tráfico a la capacidad del aeropuerto minimizando los retrasos.

La separación mínima entre aeronaves en el punto de llegada a pista viene definida por un determinado tiempo de separación que depende de sus respectivas características. Este tiempo de separación trata de evitar que cada aeronave se vea afectada por la estela turbulenta de la que le precede. En los demás puntos del corredor de llegadas donde las velocidades de las aeronaves y su variación relativa es mayor, los tiempos de separación se incrementan a los efectos de evitar conflictos.

Por tanto, el problema de secuenciación de aeronaves (ASP o Aircraft Sequencing Problem) puede formularse como un problema de optimización de la siguiente manera.

Sea A un conjunto de aeronaves, $A = \{1, \dots, n\}$. Asimismo los tiempos mínimos y máximos para el aterrizaje de una aeronave $i \in A$, vienen dados por F_i y L_i respectivamente.

El tiempo de separación mínimo requerido entre una aeronave i y una aeronave j cuando la aeronave i aterriza antes de la j es

$$S_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in A, \quad S_{ii} = 0 \quad \forall i \in A$$

Cada una de las soluciones al problema de la secuenciación de aeronaves a la llegada vienen especificadas mediante un tiempo de aterrizaje t_i para cada una de las aeronaves $i \in A$. Por tanto, una solución es válida si cumple las dos condiciones siguientes:

$$\forall i \in A : F_i \leq t_i \leq L_i \tag{2.47}$$

$$\forall i, j \in A : t_i \leq t_j \Rightarrow t_i + S_{ij} \leq t_j \tag{2.48}$$

La condición (2.47) asegura que el tiempo de aterrizaje de cada aeronave se encuentra dentro de una ventana específica para la aeronave. La condición (2.48) asegura que se mantienen los tiempos de separación mínimos entre aeronaves.

Considerando el coste operacional de una trayectoria definida (2.45), el coste total de una solución cualquiera $s_k = [t_1, \dots, t_n]$ viene dada por

$$\sum_{i=1}^n (J_i = \alpha_i \max \{0, T_i - t_i\} + \beta_i \max \{0, T_i - t_i\}) \tag{2.49}$$

Por tanto los algoritmos de secuenciación de aeronaves tratan de encontrar una solución que minimice el funcional (2.45). El problema puede aplicarse al caso de múltiples pistas mediante algunas ligeras variaciones [Ernst y Krishnamoorthy 2001].

2.6. Propuesta de modelo para guiado y control 4D

El modelo de guiado y control 4D (FMS4D) que se propone en esta Tesis extiende las capacidades de los actuales FMS con el fin de minimizar los errores de posición longitudinal y vertical a lo largo de la trayectoria prevista. Sus características principales son las siguientes:

1. Capacidad de guiado 4D a lo largo de trayectorias de llegada que contemplan tanto una parte de vuelo en crucero como otra parte de descenso continuado. Se establecen además los siguientes intervalos de tolerancia para el guiado espacial (figura 2.19):
 - dl_{max} que especifica la máxima desviación longitudinal
 - dh_{max} que especifica la máxima desviación de altitud respecto al perfil de descenso previsto
 - ds_{max} que indica la máxima desviación lateral permitida.
2. El modelo está diseñado como un sistema de control híbrido (ver figura 2.20) que calcula el vector de intenciones requerido por la aeronave para ajustar su trayectoria real a la trayectoria prevista inicialmente. Este sistema de control calcula además un conjunto de estados discretos que permiten identificar el comportamiento del sistema durante el proceso de control. La utilidad de dichos estados de control es múltiple: (i) son necesarios para calcular el vector de control, \mathbf{u} , de la aeronave, (ii) pueden incorporarse a los procesos de monitorización del seguimiento de trayectorias tanto por el propio sistema de la aeronave como por los sistemas de tierra y (iii) permiten identificar eventos de disparo de nuevos procesos de negociación aire-tierra en aquellos casos en que el seguimiento de trayectoria resulte impracticable.

La trayectoria de referencia utilizada por el sistema viene definida por

$$T_0 = \begin{bmatrix} t_1 & x_{0,1} & y_{0,1} & z_{0,1} & GS_{0,1} & RD_{0,1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_n & x_{0,n} & y_{0,n} & z_{0,n} & GS_{0,n} & RD_{0,n} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

donde $(x_{0,i}, y_{0,i}, z_{0,i})$ es la posición prevista para la aeronave en el instante t_i . Para dicho punto de la trayectoria, la velocidad respecto al suelo y el régimen de descenso previsto vienen dados por $GS_{0,i}$ y $RD_{0,i}$ respectivamente.

La filosofía de diseño es similar a la del sistema de control del sintetizador de trayectoria (sección 2.1), excepto que en este caso el sistema de control 4D deberá comparar el vector de estado actual no sólo respecto a su plan de vuelo 3D si no también respecto a la trayectoria T_0 . A partir de esta comparación, el sistema calcula las entradas de control,

2. Modelos y algoritmos matemáticos...

u , requeridas para mantener a la aeronave dentro de la región definida por los intervalos anteriores.

El modelo FMS4D utiliza las funcionalidades del sistema de control 3D del sintetizador de trayectorias para proporcionar guiado lateral a lo largo de la ruta horizontal del plan de vuelo y para el guiado vertical respecto a las restricciones de altitud definidas por cada *waypoint*. Sin embargo, el guiado de trayectoria 4D requiere añadir las capacidades de *guiado longitudinal* respecto al perfil horizontal en la fase de crucero/descenso y de *guiado vertical* respecto al perfil vertical durante la fase de descenso.

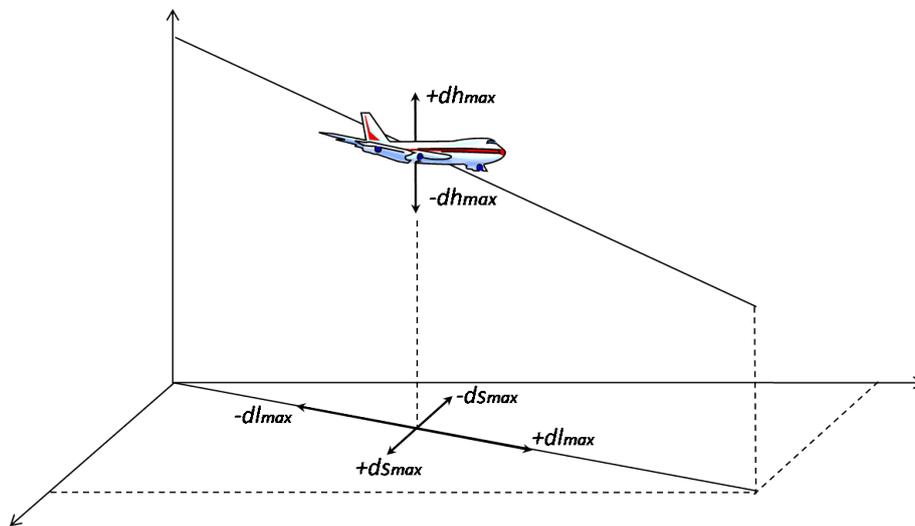


Figura 2.19: Tolerancias en el seguimiento de trayectorias 4D

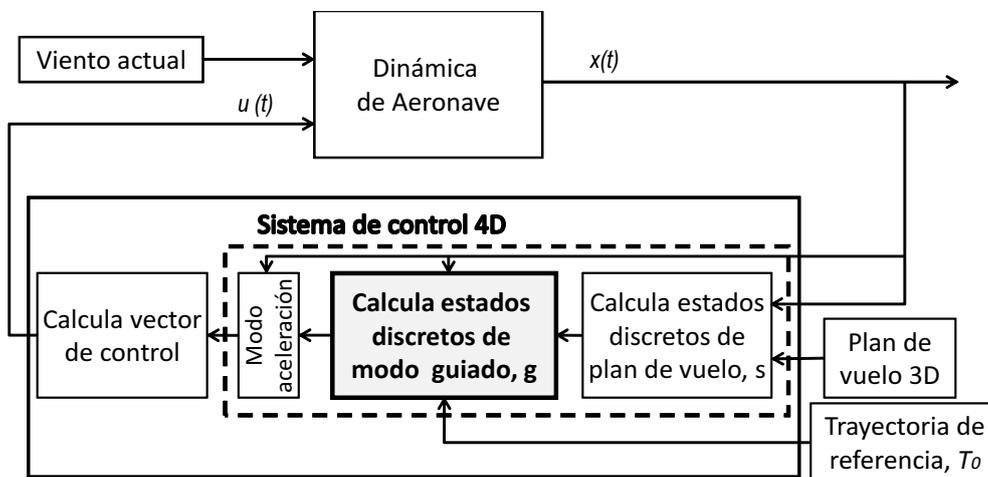


Figura 2.20: Sistema dinámico con capacidad de control 4D

El control de posición longitudinal se realiza mediante un proceso doble. En un primer paso se determina el valor de *CAS* o *Mach* (V_{gs})¹⁷ adecuado para cancelar el incremento de la *GS* actual (debida al viento real) respecto a la *GS* estimada en la trayectoria de referencia. Con ello se pretende lograr un procedimiento estable de acuerdo a los procedimientos de vuelo estándar en los que se mantienen una *CAS/Mach* constante para cada segmento o capa. Sin embargo, los valores de la velocidad constante pueden producir desviaciones longitudinales superiores al máximo permitido, dl_{max} . En este caso, en una segunda etapa se contempla el cálculo de una *GS* para corregir la desviación. Esta velocidad se mantendrá hasta que la desviación disminuya por debajo de un valor especificado, dl_{lock} . Una vez corregida la posición longitudinal para que la aeronave esté dentro del intervalo dl_{lock} , la aeronave ajusta nuevamente su *CAS/Mach* de acuerdo a la primera fase de este proceso.

En los casos en que la corrección de la desviación longitudinal requiera disminuir la velocidad por debajo de los valores de la velocidad mínima de seguridad de la aeronave, la desviación longitudinal se corregirá mediante una desviación lateral que alargue la senda de vuelo tal y como se explicará más adelante.

De modo similar el FMS4D calculará las entradas de control para efectuar correcciones en el perfil vertical de descenso manteniendo, en cada instante, la altitud de la aeronave dentro del intervalo de tolerancia fijado alrededor de la altitud de referencia¹⁸. Es decir,

$$z_{fi} \in [z_{0i} - dh_{max}^-, z_{0i} + dh_{max}^+] \quad (2.51)$$

El control de la desviación respecto al perfil vertical de descenso se realiza bien actuando sobre la potencia (para reducir o incrementar el régimen de descenso) o mediante el uso de aerofrenos (en la parte alta del descenso con el fin de incrementar la resistencia aerodinámica y por tanto el régimen de descenso). En el caso de que la reducción de potencia y/o el uso de aerofrenos dé lugar a regímenes de descenso superiores a los valores operacionales, el ajuste vertical se complementará también con una desviación lateral, análoga a la realizada para el control longitudinal.

2.6.1. Arquitectura general

El diagrama de flujo del algoritmo de control 4D está representado en la figura 2.21. Tal y como se ha comentado anteriormente, las entradas al sistema son la trayectoria T_0

¹⁷La notación V_{gs} empleada para definir la velocidad *CAS/Mach* fijada para corregir la velocidad *GS* no debe confundirse con esta última.

¹⁸Los extremos del margen de desviación vertical no necesariamente tienen que ser simétricos respecto al perfil inicial z_0 . Por esta razón se ha utilizado la notación dh_{max}^+ y dh_{max}^- para definir el margen de tolerancia por encima y por debajo respectivamente del perfil de referencia. No obstante, y sin pérdida de generalidad, se considerará en lo sucesivo que $dh_{max}^+ = dh_{max}^- = dh_{max}$.

y el plan de vuelo 3D.

En primer lugar, el modelo identifica un conjunto de estados discretos a partir del vector de estado instantáneo y del plan de vuelo 3D (*Módulo de estados del Plan de Vuelo*). Estos estados discretos son equivalentes a los estados discretos del sintetizador de trayectoria descrito en las secciones 2.1.5.1 y 2.1.5.2. En particular se identifica el índice del *waypoint* del plan de vuelo (*WI*), las correcciones de altitud en la fase de crucero (*ALM*), la capa de vuelo (*FL*) y la fase de descenso (*DP*) si lo hubiese. No obstante, las acciones de estos modos están gobernadas por los valores de otras variables discretas que serán descritas más adelante. Así por ejemplo, la acción de establecer un rumbo de acuerdo al segmento de vuelo definido por el modo *WI* o la modificación establecida por el modo *ALM* pueden quedar parcialmente bloqueadas en los casos en que sea necesario llevar a cabo una desviación lateral de la ruta para corregir desviaciones verticales o longitudinales.

Un siguiente módulo calcula estados discretos de control referidos específicamente a desviaciones longitudinales y verticales respecto a T_0 (*Estados de Guiado de Trayectoria*). Por tanto, este módulo constituye el núcleo del modelo de guiado y control 4D.

Los estados discretos obtenidos por este segundo módulo son los siguientes:

1. *Estados para el control longitudinal:*

- *Modo control longitudinal (dlTrack)* que identifica las situaciones en las que la aeronave se encuentra dentro del intervalo de tolerancia longitudinal (*dlTrack=Off*) y las que requieren llevar a cabo una corrección longitudinal (*dlTrack=On*).
- *Modo desviación lateral para corrección longitudinal (dlLatDev)*. Este modo se activa cuando la corrección de una desviación longitudinal por delante de la posición de referencia requiere un desplazamiento lateral alrededor de la ruta original para retrasar la aeronave a la posición original.
- *Modo Índice de Waypoint Lateral (LatWpIndex)*. Se utiliza para identificar los segmentos asociados a los *waypoints* insertados para realizar una desviación lateral.

2. *Estados para el control vertical:*

- *Modo control vertical (dhTrack)*. De manera similar al modo *dlTrack*, este modo identifica las situaciones en las que la aeronave se encuentra dentro o fuera del intervalo de tolerancia de altitud establecido.

- *Modo desviación lateral para corrección vertical ($dhLatDev$)*. Este modo se activa cuando la corrección de una desviación vertical por encima de la altitud de referencia requiere una desviación longitudinal para poder recuperar dicha altitud.
- *Modo Índice de Waypoint Lateral ($LatWpIndex$)*. En el modelo propuesto en esta Tesis, las desviaciones laterales para la corrección longitudinal y para la vertical no son compatibles o simultáneas, por lo que este modo tiene el mismo significado que para el modo horizontal.

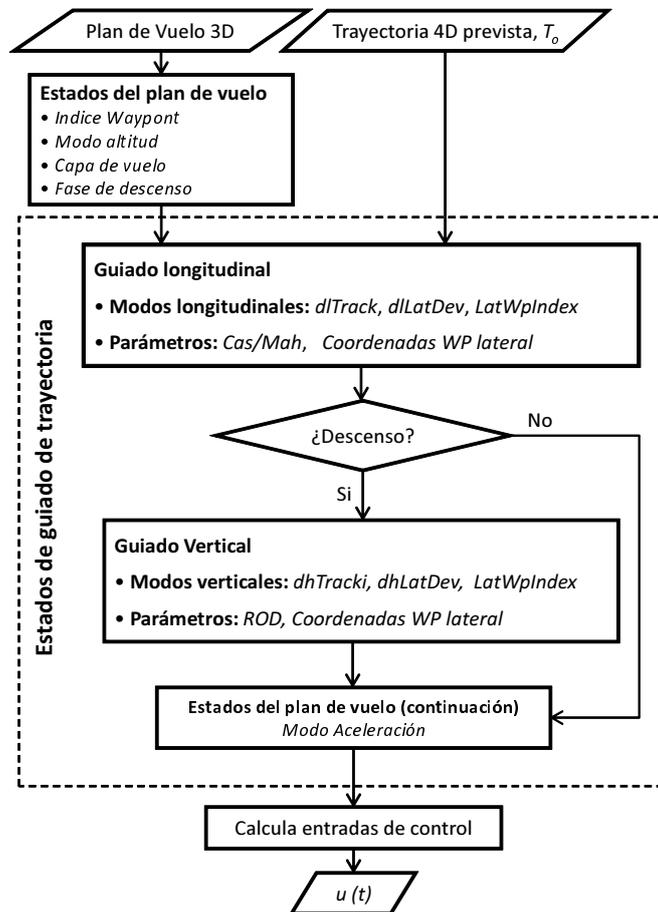


Figura 2.21: Arquitectura general del modelo de control 4D

Una vez que los estados de guiado de trayectoria han sido definidos, se calcula el estado discreto *modo aceleración* (AcM) para controlar la velocidad de la aeronave de acuerdo a la velocidad nominal calculada a partir del estado $dlTrack$.

Los estados discretos referidos al plan de vuelo, son usados finalmente por el módulo de cálculo del vector de control, u . En este sentido hay que señalar que los cálculos de este módulo dependerán del modelo dinámico empleado. Sin embargo, el proceso para

identificar los estados discretos y sus parámetros asociados son independientes del modelo dinámico de aeronave.

2.6.2. Guiado longitudinal

Para llevar a cabo el guiado longitudinal, la trayectoria 4D prevista, T_0 es comparada con la actual T_f .

Si el vector de trayectoria actual para el instante actual t_i es

$$T_f(t_i) = (x_{fi}, y_{fi}, z_{fi}, GS_{fi}, RD_{fi}) \quad (2.52)$$

La desviación longitudinal dl se mide a partir de la proyección horizontal de la posición de la aeronave sobre el segmento horizontal de la ruta del plan de vuelo (ver figura 2.22), de modo que :

$$dl = (x_{fi} - x_{oi}, y_{fi} - y_{oi}) \mathbf{a}_i \quad (2.53)$$

donde \mathbf{a}_i es el vector unitario en la dirección del segmento $WI_i - WI_{i+1}$

De modo que $dl < 0$ indica que la aeronave no ha alcanzado aún la posición requerida (posición de retraso), mientras que si $dl > 0$, la aeronave ha sobrepasado la posición prevista (posición de adelantada).

Por otra parte, en áreas terminales, las medidas de tráfico basadas en tiempo se muestran como una alternativa eficiente a la convergencia basada en distancia [Landry et al. 2005]. Por ello, y en el caso de que las tolerancias de desviación longitudinal estén definidas en términos de tiempo, dt , entonces $dt = dl/GS_f$.

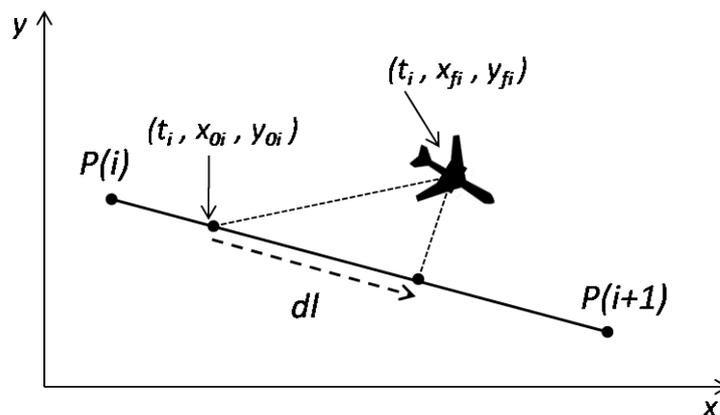


Figura 2.22: Cálculo de la desviación longitudinal

2.6.2.1. Corrección de desviación longitudinal mediante cambios de velocidad

Las acciones de control sobre la velocidad para mantener la desviación longitudinal dentro de límites están gobernadas por la variable $dlTrack$, que pasa del estado desactivado ($dlTrack=Off$) al estado activado ($dlTrack=On$) en función del estado actual y de los valores dl respecto a dl_{max} y dl_{lock} (ver figura 2.23).

Los márgenes de longitud requeridos por el sistema para absorber la inercia de la aeronave y evitar que ésta sobrepase los valores de tolerancia dl_{max} vienen dados por n_l^+ para $dl > 0$ y n_l^- para $dl < 0$.

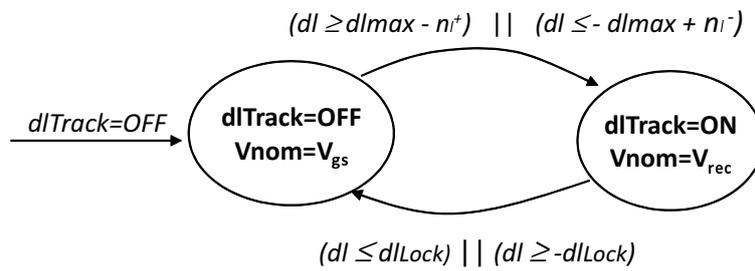


Figura 2.23: Estado discreto para el control de la velocidad

Por otra parte la velocidad respecto al suelo requerida por la aeronave, GS_f , debe ser igual a la especificada en la trayectoria prevista, GS_0 . Considerando además la relación entre los vectores velocidad verdadera, TAS , viento, W , y la velocidad respecto al suelo, GS , resulta (ver figura 2.24),

$$GS_f = GS_0 \Rightarrow TAS_0 + W_0 = TAS_f + W_f \quad (2.54)$$

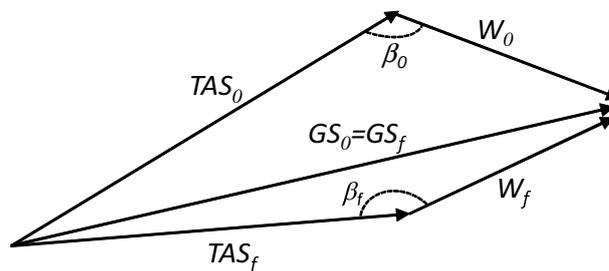


Figura 2.24: Esquema para el cálculo de la nueva TAS_f

Es decir,

$$TAS_f = \left(GS_0^2 + W_f^2 - 2GS_0W_f \cos \beta_f \right)^{1/2} \quad (2.55)$$

donde

$$\beta_f = |\psi_{\omega_f} + \psi_c| \quad (2.56)$$

siendo ψ_{ω_f} es la dirección del viento actual (en el sentido de la dirección de flujo) y ψ_c es ángulo que define la dirección de la *ground speed* (que es la misma del segmento de la ruta).

Durante el descenso, y con el fin de mantener perfiles de velocidad de descenso constante, la velocidad nominal calcula cada vez que la aeronave alcanza una nueva capa de vuelo.

Una vez calculada la TAS_f , la obtención de la CAS o el $Mach$ nominal es inmediata.

Por otra parte, desde el punto de vista operacional, resulta adecuado establecer velocidades nominales constantes para distintos segmentos de niveles de altitud. Por esta razón, podría suceder que al calcular y establecer una velocidad calibrada constante durante un segmento de descenso específico, se produzcan desviaciones longitudinales por encima de los valores permitidos. En ese caso, será necesario modificar la velocidad aerodinámica, V_{rec} , con el fin de corregir dicha desviación de la siguiente forma:

$$V_{rec} = V_{gs}(1 + k_v) \quad (2.57)$$

donde k_v representa el porcentaje de incremento/decremento sobre la velocidad operacional en el instante de inicio de la corrección. En general $k_v = f_v(dl, GS_f, k', \tau_v)$, donde k' es un factor de peso característico para tipo cada aeronave y τ_v el tiempo de recuperación establecido.

2.6.2.2. Corrección de la desviación longitudinal mediante desviación lateral

Este tipo de corrección se aplica en los casos en que la velocidad para la recuperación de una posición $dl > 0$, calculada inicialmente ($V_{rec-ini}$) es inferior a la velocidad mínima operativa, V_{min} . Este evento está representado por el modo $dlLatDev=ON$.

La corrección consiste en la inserción de uno o varios *waypoints* laterales a la ruta para sobrevolar tramos de vuelo laterales a velocidad $V_{rec} = V_{min}$.

En la figura 2.25 se ilustra el procedimiento de inserción de un *waypoint* P en el lado izquierdo del segmento de ruta. Para corregir la desviación longitudinal dl la aeronave vuela una senda lateral, d_{lat} , pasando por el punto P insertado a una distancia lateral, ds de la ruta. Considerando que el paso por dicho punto se realizará mediante un viraje *fly-past* anticipando el viraje para interceptar el segmento d_2 de vuelta al segmento de la ruta, la distancia lateral volada será

$$d_{lat} = d_1 + d_2 - \Delta_{turn} \quad (2.58)$$

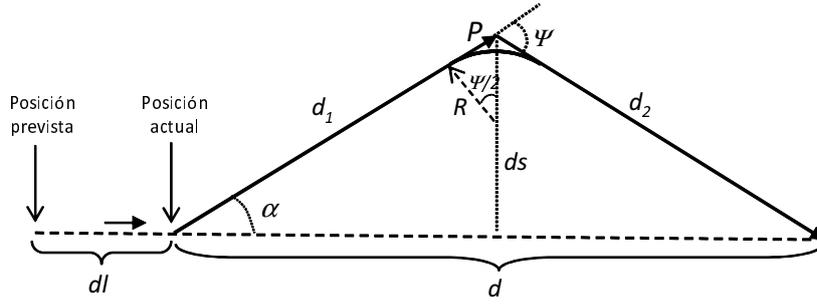


Figura 2.25: Desviación lateral para corrección longitudinal

siendo Δ_{turn} la longitud recorrida durante el viraje

$$\Delta_{turn} = 2 \cdot R \cdot \tan\left(\frac{\Delta\psi}{2}\right) - R \cdot \left(\frac{\Delta\psi}{2}\right) \quad (2.59)$$

donde el radio de viraje a la velocidad TAS constante es

$$R = \frac{TAS^2}{g \tan \phi} \quad (2.60)$$

Seleccionando un ángulo α predefinido y considerando que $d_1 = d_2$ y $dl + d = 2d_1$ el *waypoint* $P(\alpha, d_1)$ se obtiene como

$$d_1 = \frac{dl + \Delta_{turn}}{2(1 - \cos \alpha)} \quad (2.61)$$

En el caso de que $ds = d_1 \sin \alpha > ds_{max}$ se necesitará una segunda desviación en el lado opuesto del segmento. Esta situación se repetirá cada vez que la desviación lateral requerida sobrepase la máxima desviación lateral permitida. Considerando una segunda desviación longitudinal dl' , después de la primera desviación, las coordenadas del segundo *waypoint* se determinan de análoga forma al caso anterior (ver figura 2.26). Es decir,

$$dl + d - dl' = 2d_1 - \Delta_{turn} \quad (2.62)$$

donde

$$d_1 = \frac{ds_{max}}{\sin \alpha} \quad \text{y} \quad d = \frac{2ds_{max}}{\tan \alpha}$$

Durante la ejecución de la corrección, el modo *LatWpIndex* tomará valores desde 0 a N_l siendo N_l el número de *waypoints* laterales insertados. La condición $LatWpIndex = N_l$ se utiliza para desactivar el estado de desviación lateral ($dlLatDev=Off$).

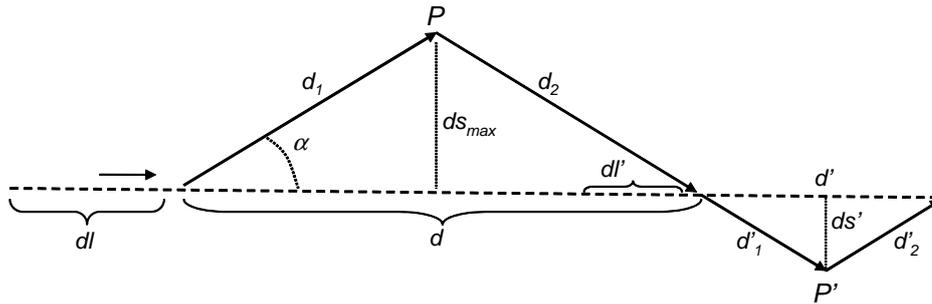


Figura 2.26: Múltiple desviación lateral para corrección longitudinal

2.6.3. Guiado vertical

En la fase de crucero, la altitud se controla a través del estado discreto CM. Sin embargo, esta opción no es aplicable para corregir desviaciones del perfil vertical de la trayectoria 4D durante la fase de descenso. Ello se debe a que la altitud de la aeronave debe mantenerse dentro de intervalos predefinidos de modo que $z_f \in [z_0 - dh_{max}^-, z_0 + dh_{max}^+]$ donde z_0 representa la altitud del perfil vertical de la trayectoria de referencia¹⁹. En el instante t_i , la desviación vertical respecto al perfil vertical viene dada por

$$dh(t_i) = z_{fi} - z_{0i}$$

El estado discreto, $dhTrack$ que controla el cálculo del régimen de descenso necesario en cada instante viene definido en el diagrama de estados de la figura 2.27.

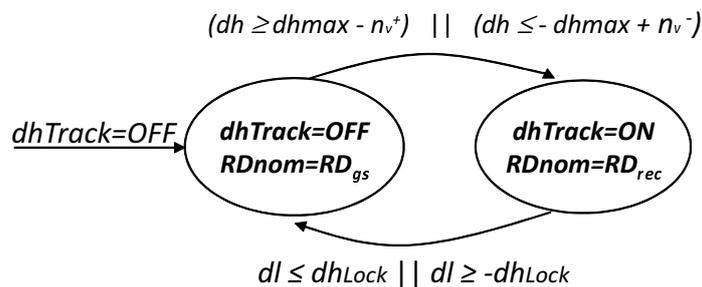


Figura 2.27: Máquina de estados finitos para el estado $dhTrack$

¹⁹Los extremos del margen de desviación vertical no necesariamente tienen que ser simétricos respecto al perfil inicial z_0 . Por esta razón se ha utilizado la notación dh_{max}^+ y dh_{max}^- para definir el margen de tolerancia por encima y por debajo respectivamente del perfil de referencia. No obstante, y sin pérdida de generalidad, se considerará en lo sucesivo que $dh_{max}^+ = dh_{max}^- = dh_{max}$.

El régimen de descenso necesario para corregir la desviación vertical se ha implementado como

$$RD_{rec} = (1 + k_r) \cdot RD_{gs} \quad (2.63)$$

donde el factor de corrección, k_r , es función de la desviación de altura, del régimen de descenso en RD_{gs} , de las características de la aeronave k'_r y del tiempo requerido τ_r para recuperar la senda de vuelo ($k_r = f_r(dh, RD_{gs}, k'_r, \tau_r)$).

De acuerdo a la expresión (2.32) el valor requerido de RD_{rec} se obtiene bien aplicando potencia (cuando $dh < 0$) o incrementando la resistencia (cuando $dh > 0$, y el descenso se realiza a mínima potencia).

El incremento de resistencia se lleva a cabo mediante la aplicación de aerofrenos (*spoilers*). En este caso, la relación entre régimen de descenso y resistencia se puede extraer a partir del modelo de energía total,

$$\dot{z} = \left(\frac{T - D}{mg} \right) \cdot TAS \cdot ESF \quad (2.64)$$

Relacionando la resistencia deseada, D_f , con la resistencia actual D_0 a través del factor de proporcionalidad k_D resulta,

$$D_f = k_D D_0 \quad (2.65)$$

y

$$\Delta \dot{z} = (D_f - D_0) \frac{T \cdot TAS \cdot ESF}{mg} \quad (2.66)$$

es decir,

$$k_D = 1 + \frac{mg}{D_0 \cdot TAS \cdot ESF} \Delta \dot{z} \quad (2.67)$$

2.6.3.1. Corrección de desviación vertical mediante desviación lateral

Si los valores D_f y $\Delta \dot{z}$ obtenidos anteriormente resultan superiores a los valores máximos operacionales entonces será necesario llevar a cabo una desviación lateral para alcanzar la altitud requerida ($dh_{LatDev} = ON$). Si la velocidad a lo largo d y d' son GS y GS' respectivamente y el régimen de descenso correspondiente a d y d' es RD y RD' , entonces las coordenadas para un determinado *waypoint* lateral se calcula de forma inmediata a partir de la figura 2.28.

La corrección longitudinal durante una desviación lateral requiere incrementar la GS (suponiendo despreciable los efectos del viento durante los cambios de dirección realizados

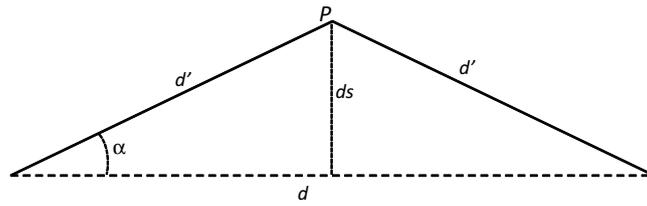


Figura 2.28: Desviación lateral para corrección vertical

durante el recorrido lateral). Por tanto en el tramo de desviación, el régimen de descenso viene dado por:

$$RD' = RD \cdot \frac{GS'}{GS} = \frac{RD}{\cos \alpha} \quad (2.68)$$

Asumiendo que RD' se expresa como

$$RD' = (1 + k_R) \cdot RD \quad (2.69)$$

donde k_R es una constante con significado análogo a la constante k_r definida en la expresión (2.63).

Considerando que la diferencia entre las altitudes finales de descenso para cada senda es

$$\Delta z = h' - h = RD' \cdot \left(\frac{2 \cdot d' - \Delta_{turn}}{GS'} \right) - \frac{RD \cdot d}{GS} \quad (2.70)$$

Finalmente teniendo en cuenta la expresión (2.68) y que $d = 2 d' \cos \alpha$, resulta

$$d' = \frac{\Delta z GS - RD \Delta_{turn}}{2 RD (1 - \cos \alpha)} \quad (2.71)$$

Una vez que los parámetros anteriores hayan sido calculados, si resultase que

$ds = d' \sin \alpha > ds_{max}$ entonces el tramo d' sería fijado en el valor $d' = s_{max} / \sin \alpha$ y nuevas interacciones serían necesarias de acuerdo al esquema idéntico al expuesto en la sección 2.6.2.2.

Si el número de *waypoints* insertados para realizar una corrección vertical es N_h entonces durante la ejecución de dicha corrección $LatWpIndex = \{0, \dots, N_n\}$.

2.6.4. Ejemplo

Para ilustrar el modo de operación del modelo FMS4D propuesto, éste ha sido implementado para efectuar el control de una trayectoria de referencia T_0 .

La trayectoria ha sido calculada con el modelo de síntesis de trayectoria descrito en

el apartado 2.2 y para un modelo APM de Boeing 737-700 de la base de datos BADA. También se ha considerado condiciones de viento nulo y atmósfera ISA. La trayectoria contiene una primera parte realizada a nivel de vuelo 300 (30000 pies) para posteriormente comenzar un descenso continuado hasta el FAF^{20} establecido a 2000 pies. Posteriormente las condiciones de viento han sido modificadas a los efectos de verificar el funcionamiento del sistema FMS4D. Para este ejemplo experimental se han considerado dos escenarios de viento distintos a los previstos inicialmente. En uno de ellos la componente de viento es frontal, mientras que en el segundo se trata de una componente de viento de cola.

El modelo dinámico de Boeing 737-700 utilizado para el análisis del comportamiento del modelo FMS4D es el mismo que el utilizado para la síntesis de la trayectoria de referencia. Esto equivale a considerar que las desviaciones de trayectoria real respecto a la original se deben únicamente a la variación de las condiciones de viento, siendo despreciables las desviaciones de trayectoria debidas al modelo de generador utilizado durante la síntesis. Tampoco han sido tenidos en cuenta las componentes de viento laterales debido a que las correcciones laterales son realizadas por el módulo de estados de plan de vuelo. Del mismo modo no se consideran los efectos de la variación de la temperatura y densidad debido a que éstos son despreciables frente a los efectos de la componente longitudinal de viento sobre el perfil vertical.

En la figura 2.29 se comparan los perfiles verticales en función de la distancia y del tiempo de la trayectoria prevista y de la trayectoria real realizada por la aeronave con componentes de vientos distintas a las previstas inicialmente.

La figura 2.30 muestra los errores longitudinales y verticales de las trayectorias reales respecto a la prevista. Los valores de dichos errores son inferiores a los prefijados de antemano (0.5 *mn* y 500 pies respectivamente). En la figura 2.31(a) se muestra la velocidad CAS prevista de acuerdo a los procedimientos de compañía así como la velocidad CAS y TAS instantánea previstas durante el descenso. Además la TAS y GS coinciden al existir viento nulo.

Considerando la GS prevista y las condiciones de viento reales, el modelo calcula las nuevas velocidades CAS nominales que la aeronave debería alcanzar para corregir los efectos del viento. En la figura 2.31(b) se muestra la CAS nominal así como las velocidades CAS, TAS y GS nominales para el caso de viento de cola de 40 *Kts*.

De los resultados presentados se deduce que el modelo es capaz de hacer un seguimiento de trayectoria manteniendo un control de velocidad basado en procedimientos de CAS/Mach constante principalmente en la parte alta del descenso. Las inestabilidades presentadas en la parte más baja del sistema pueden resolverse a partir de un estudio más

²⁰ *FAF* o *Final Approach Fix* es el punto donde se considera que acaba la fase de aproximación inicial e intermedia al aeropuerto y comienza la fase final para el aterrizaje.

detallado de estabilidad que permita definir los coeficientes para la corrección de velocidad y/o régimen de descenso. Otra solución podría consistir en la implementación de un modelo de control continuo. Independientemente de los factores de estabilidad citados, el estado de la aeronave durante el seguimiento de la trayectoria queda suficientemente definido a través del modelo presentado.

A los efectos de obtener un prototipo FMS4D, este modelo requiere futuros estudios que consideren los siguientes aspectos:

- Análisis de su estabilidad numérica frente a modelos de viento no estacionario aplicados sobre modelos aerodinámicos de seis grados de libertad.
- Análisis de los efectos en las estimaciones debidos a la incertidumbre sobre la posición espacial de la aeronave.
- Extensión del modelo de sendas laterales para incluir correcciones longitudinales y verticales de forma simultánea, así como desviaciones laterales durante el viraje en los *waypoints* de la ruta.

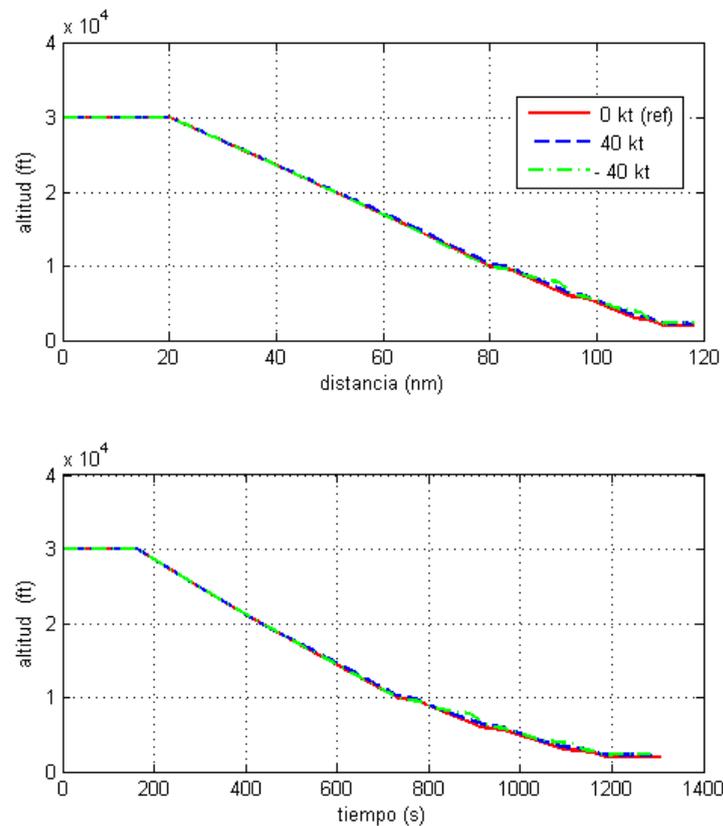


Figura 2.29: Perfil de descenso

2.6. Propuesta de modelo para guiado y control 4D

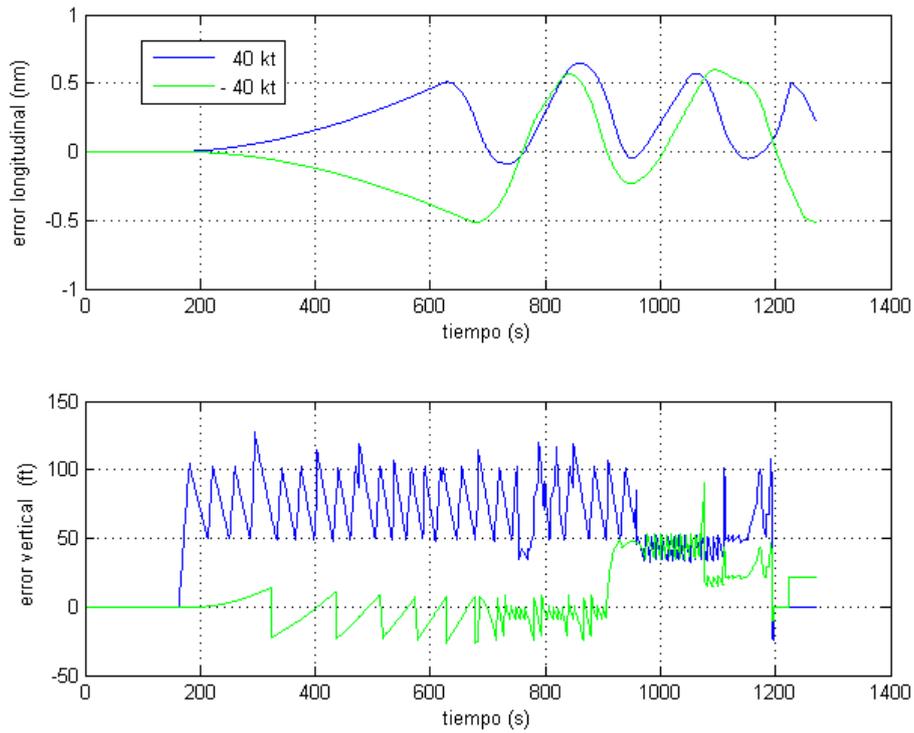


Figura 2.30: Error longitudinal y vertical para componentes de viento frontal y de cola

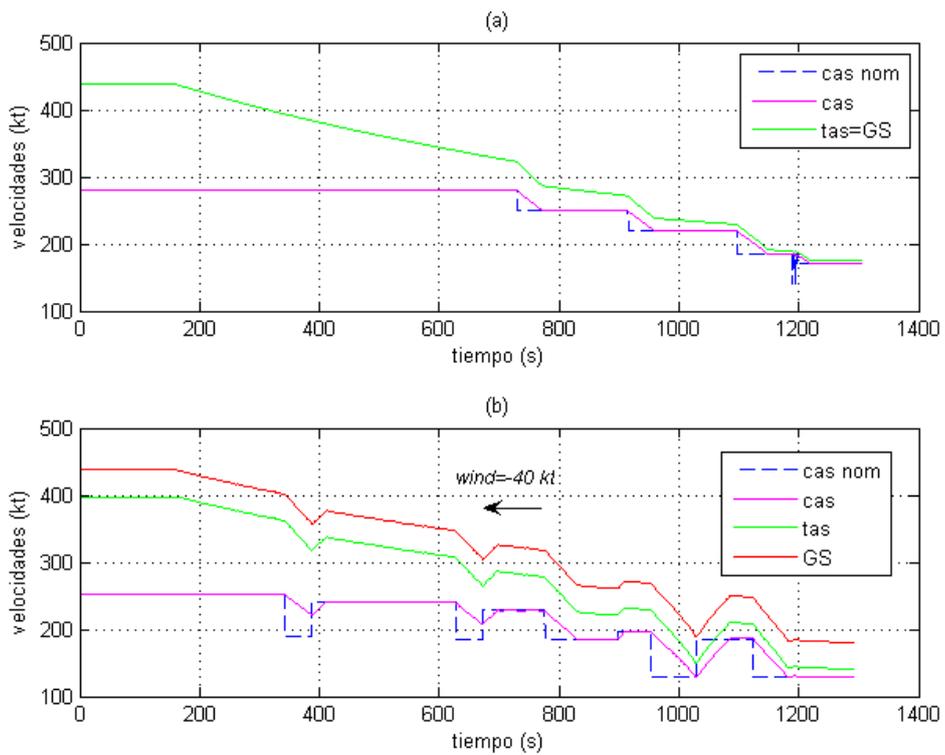


Figura 2.31: Perfil de velocidades para: (a) trayectoria prevista con viento nulo, (b) trayectoria real con componente frontal de 40 kts.

2.7. Interoperabilidad de sistemas y datos de trayectoria

La necesaria interoperabilidad de los sistemas de aeronave y de ATC hacen necesario desarrollar especificaciones para facilitar el intercambio de los datos de trayectoria entre dichos sistemas. Estas especificaciones deben recoger los diversos parámetros asociados a la trayectoria así como un lenguaje de alto nivel que haga comprensible al elemento humano el contexto en el cual se realiza este intercambio de información.

En el modelo desarrollado en esta Tesis se incluye el diseño de protocolos de negociación de trayectoria en la que ésta es definida como un continuo 4D o bien mediante restricciones espacio-temporales. Sin embargo, el modelo podrá incorporar en el futuro esquemas más complejos en los que se incluya la detección de incoherencias sintácticas o de contenido de las propuestas.

2.7.1. Datos de trayectoria

El análisis funcional de los modelos y algoritmos realizados en este capítulo permite identificar un conjunto de datos que son requeridos para definir una trayectoria 4D. Dichos datos deberán ser capaces de expresar la trayectoria 4D tanto en términos de preferencia de aeronave como en términos de restricciones ATC. Además deberán facilitar que los sistemas de aeronave y de tierra puedan generar y evaluar las propuestas de trayectorias de una forma unívoca y precisa a partir de su contenido.

Por tanto la trayectoria 4D puede considerarse como una *unidad básica de información* que contenga los siguientes tipos de datos:

- Datos del procedimiento.

Estos datos expresan el contexto operacional (o procedimiento) al que está referida la trayectoria. Es decir, fase de vuelo (salida, ruta, llegada, etc.), su estado del proceso (planificación y etapa de la planificación, ejecución, etc.).

- Preferencias de usuario de aeronave propia/ajena.

Estas preferencias incluyen la trayectoria expresada como secuencia de puntos 4D, los valores de tolerancia del sistema de seguimiento de trayectoria, las trayectorias de mínimo y máximo tiempo (incluidas las restricciones del ATC si se producen). También puede incluir los argumentos básicos que justifiquen las preferencias de usuario (definidas por ejemplo a través de un intervalo de tiempo de llegada y/o por un designador que clasifique posibles emergencias de la aeronave).

- Restricciones/instrucciones de ATC.

Representa la información que deberá incluirse en el modelo de intenciones de la aeronave para ejecutar la trayectoria. Según el formato de lenguaje empleado y el estado del procedimiento en negociación/ejecución, esta información puede ser un simple vector de intenciones de vuelo, una secuencia de ventanas con restricciones espacio-temporales sobre ruta 2D o una secuencia de puntos 4D con indicación del intervalo de tolerancia. En general, y con el fin de lograr la máxima flexibilidad de las trayectorias, las restricciones/instrucciones ATC expresadas como secuencia de puntos 4D quedarían reservadas para situaciones críticas de seguridad²¹.

- Datos del sistema de aeronave propia/ajena.

Proporcionan información del modelo dinámico empleado por la aeronave para calcular la trayectoria así como del modelo de intenciones. Dentro de este modelo de intenciones se podrá especificar el nivel de abstracción del lenguaje en el que expresan las intenciones.

- Datos del sistema de ATC.

Dan información sobre el tipo de lenguaje empleado para especificar las restricciones/instrucciones de ATC. También informan sobre el tipo y características del modelo dinámico empleado para la síntesis de trayectoria.

2.7.2. Lenguaje de alto nivel

El desarrollo de *lenguaje de alto nivel* permite el intercambio de información en los procesos de negociación de trayectoria para que sea comprensible al elemento humano [Lee et al. 2004, Weber y Cruck 2007]. También facilita el desarrollo de ontologías que permitan analizar los aspectos sintácticos de la comunicación entre sistemas para identificar posibles incoherencias.

En el programa PHARE, se propuso el concepto de *Objetos Generadores de Trayectoria* para los sistemas de tierra y de aeronave de forma que dichos sistemas pudieran intercambiar datos que formaban parte de estos objetos. Dichos datos incluían términos semánticos (por ejemplo con definiciones sobre nivel, altitud, peso, etc.) que podrían ser analizados para detectar incoherencias durante su intercambio entre sistemas muy heterogéneos entre sí. Posteriormente en [Lopez-Leones et al. 2007] se ha propuesto el metalenguaje AIDL (Aircraft Intent Description Lenguaje) para facilitar el intercambio

²¹Hay que recordar que, de acuerdo a los trabajos de [Idris et al. 2007, Idris et al. 2007] citados en la sección 1.1.3.2, la flexibilidad de la trayectoria entendida como capacidad para minimizar los conflictos ante cambios no previstos, se incrementa conforme se minimizan las restricciones ATC.

de información de la trayectoria 4D entre los sistemas aire-tierra y tierra-tierra en un formato común. El lenguaje AIDL establece un método para expresar en términos de un lenguaje formal, las restricciones requeridas por la formulación matemática del proceso de cálculo de la trayectoria 4D. El lenguaje captura en una estructura flexible y simple los aspectos matemáticos subyacentes de dicho proceso con la finalidad de que tanto el operador humano (piloto y controlador) como los subsistemas que gestionan la trayectoria, puedan definir y describir estrategias de operación coherentes sin necesidad de comprender el modelo matemático subyacente. Además el AIDL permite expresar el formato de intenciones de aeronave a distintos niveles para ser usado por los distintos subsistemas que constituyen la infraestructura de cálculo de trayectorias.

2.8. Conclusiones

El análisis de modelos y algoritmos desarrollado en este capítulo ha permitido caracterizar las principales funcionalidades que requerirán los sistemas de aeronave y de ATC para llevar a cabo operaciones TBO. Esta caracterización está expresada en términos de finalidad de la misma, datos usados y producidos, así como cálculos y procesos que llevan a cabo. Esta información, es necesaria para definir en el siguiente capítulo las especificaciones del modelo que se propone esta Tesis.

Los modelos analizados realizan funciones relativas a la síntesis de trayectoria, la detección y resolución de conflictos, la secuenciación de llegadas de aeronave y el guiado y control 4D. Estas funciones son propias de los sistemas de aeronave y de ATC, excepto el secuenciado de aeronaves que corresponde al ATC y el modelo de guiado y control de trayectorias 4D que pertenece a los sistemas de aeronave.

La caracterización de los sintetizadores de trayectoria está basada en el modelo propuesto por *Glover y Ligeros* que los considera como sistemas de control dinámico híbrido para el seguimiento de rutas 3D [Glover y Ligeros 2004]. A partir de este modelo se propuso un esquema de optimización para determinar las velocidades operativas requeridas para sintetizar trayectorias sujetas a restricciones temporales en cada uno de los puntos de la ruta 3D.

La caracterización de los detectores de conflictos entre trayectorias se realizó a partir de los modelos que emplean métodos nominales basados en síntesis de trayectoria para la proyección temporal del estado de la aeronave. Este modelo representa el núcleo de los sistemas de detección de conflictos requeridos para la planificación a largo y medio plazo de la navegación y el control del tráfico. Además, el resto de modelos recogidos en la taxonomía propuesta en [Kuchar y Yang 1997] tienen cabida en los sistemas similares a los utilizados actualmente para la vigilancia y la detección y resolución táctica de conflictos

inmediatos a nivel de aeronave (TCAS, GPWS, etc.) o nivel de ATC.

También se consideró la clasificación de los modelos de resolución propuesta en [Kuchar y Yang 1997] para vincularlas a la resolución de conflictos en diversas circunstancias operacionales (planificación de trayectorias, resolución táctica frente a contingencias, etc.). A partir de esta clasificación se presentó una descripción funcional de los modelos que calculan soluciones a conflictos entre trayectoria. También se extendió la taxonomía recogida en [Kuchar y Yang 1997] para clasificar los modelos de resolución de conflictos de acuerdo al esquema de gestión de las soluciones. Con dicha propuesta se logra separar la gestión de resolución de conflictos en dos etapas. En la primera de ellas, los sistemas implicados calculan un conjunto ordenado de acuerdo a sus preferencias de las soluciones al conflicto. En la segunda etapa, las soluciones anteriores son negociadas entre los agentes. De esta forma se logra una especificación de la funcionalidad de resolución de conflictos que considera a las condiciones operacionales en la que éstos se producen (control centralizado en ATC o descentralizado, solución estratégica o táctica, resolución cooperativa o no cooperativa).

El análisis de los modelos anteriores para la síntesis de trayectorias y para la detección y resolución de conflictos, permitió además caracterizar los procesos de evaluación de trayectoria tanto desde la perspectiva de la aeronave como desde el ATC. En el primer caso un sistema evaluador de trayectoria mide su coste operacional durante el proceso de generación de una trayectoria óptima. En el segundo caso los evaluadores miden la eficiencia del flujo de tráfico que vuela trayectorias libres de conflicto y están por tanto asociados al problema de resolución óptima de conflictos.

Respecto a la descripción funcional de los sistemas de guiado y control se constató la escasez de propuestas sobre modelos de guiado 4D a partir de una trayectoria de referencia, particularmente para la fase de descenso. Por esta razón y con el fin de completar las especificaciones de esta funcionalidad, se desarrolló un modelo de guiado y control 4D para este tipo de operaciones.

El modelo propuesto está particularizado para la fase de descenso puesto que es esta etapa la que presenta mayores dificultades para el guiado y control. Se trata de un modelo de control híbrido inspirado en el modelo de síntesis de trayectoria de [Glover y Ligeros 2004] en el que se incorporan nuevos estados lógicos para caracterizar las desviaciones longitudinales y desviaciones verticales alrededor de una trayectoria 4D de referencia.

Los estados discretos definidos en el modelo anterior describen las actuaciones de la aeronave a partir de las restricciones espacio-temporales que impone la trayectoria de referencia. Dichos estados se tendrán en cuenta en posteriores capítulos al incluirlos como parte de la información que describe el estado de los procedimientos de las aeronaves (en concreto aquella parte del procedimiento que se refiere a la ejecución

2. Modelos y algoritmos matemáticos...

de la trayectoria). Esta información es además enviada al ATC complementando así la información utilizada por este agente para las tareas de monitorización de trayectorias.

Por último, y considerando el necesario intercambio de los datos de trayectoria producidos entre los modelos anteriores, se identificaron aquellos datos que deberán formar parte de la unidad básica de información de una trayectoria 4D.

Capítulo 3

Modelado orientado a agentes del escenario de tráfico de llegada: especificaciones y arquitectura del sistema

Una vez caracterizadas en el capítulo anterior las funcionalidades de más bajo nivel requeridas en operaciones TBO se dispone de la información suficiente para iniciar el diseño de un modelo conceptual que describa dichas operaciones.

Como se ha comentado en el *capítulo 1*, el esquema metodológico empleado en esta Tesis para obtener dicho modelo se basa en la metodología *Prometheus*. Este esquema está representado en la figura 3.1, en la que se indican los distintos elementos que se generan en cada una de las etapas de diseño. *Prometheus* distingue entre los elementos de diseño final y los elementos de diseño intermedio a partir de los cuales se obtienen los primeros. Los elementos de diseño final se muestran en la figura 3.1 a través de rectángulos de bordes redondeados (escenarios, objetivos, protocolos, procesos, diagramas de arquitectura del sistema o de arquitectura de agente, etc.). Todos estos elementos proporcionan una estructura jerárquica del modelo con varios niveles de abstracción.

La figura 3.1 muestra una adaptación del esquema propuesto por la propia metodología [Padgham y Winikoff 2004] y representado en la figura 1.10 de la página 50. Esta adaptación tiene la finalidad de poner de relieve los aspectos dinámicos y estructurales del modelo así como omitir aquellos elementos intermedios que no tienen aplicación directa en nuestro diseño. *La diferenciación de las características dinámicas y estructurales del modelo resulta útil porque la perspectiva dinámica recoge los aspectos procedimentales de las operaciones de tráfico, mientras que la perspectiva estructural proporciona una visión estática de la organización de las entidades de tráfico aéreo y de la arquitectura de sus*

3. Modelado orientado a agentes del escenario de tráfico de llegada...

respectivos sistemas.

Por otra parte, en la notación *Prometheus* tanto los eventos internos de cada agente como los mensajes de comunicación entre éstos se tratan como mensajes. Con ello se simplifican los aspectos de implementación del modelo conceptual. Sin embargo, y a los efectos de que esta notación no de lugar a equívocos en la fase del diseño de la arquitectura, en la figura 3.1 se han distinguido ambos tipos de elementos y su procedencia.

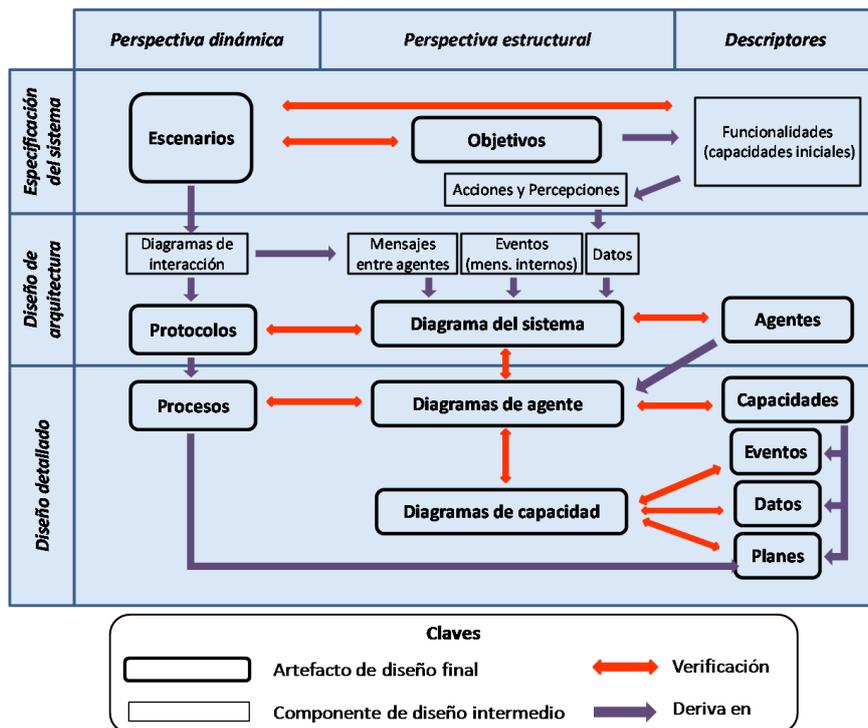


Figura 3.1: Fases de la metodología Prometheus

Como se aprecia en la figura, la fase de *especificación del sistema* consiste en identificar los objetivos del sistema, describiendo además las funcionalidades requeridas para lograrlos así como sus percepciones y acciones.

La identificación de estos objetos se realiza a partir de la definición previa de un conjunto de escenarios de casos de uso que recojan los distintos aspectos operacionales del sistema. Cada escenario está constituido por una secuencia de pasos descritos a través de objetivos, acciones o percepciones. La definición de escenarios y la especificación de los objetivos se realiza, en general, de una forma iterativa e incremental. Los objetivos principales habitualmente tienen un carácter abstracto, y por ello se precisa definir nuevos sub-objetivos de nivel inferior que aporten información sobre el modo concreto de lograrlos. A partir de esta información se pueden identificar las distintas funcionalidades que se requieren para alcanzarlos.

De este modo, las funcionalidades aportan información sobre las principales acciones,

percepciones y datos manejados por el sistema. La especificación formal de estas acciones, percepciones y datos se apoya en los modelos matemáticos y algoritmos analizados en el capítulo anterior. Las funcionalidades también facilitan la posterior identificación y diseño de las capacidades de los agentes durante la fase de diseño detallado de éstos¹.

La fase *diseño de arquitectura* se apoya en la información obtenida en la fase de especificación anterior para diseñar el diagrama general de la arquitectura del sistema y los protocolos de interacción entre sus agentes.

El diagrama del sistema muestra la interrelación entre los agentes y entre éstos y el entorno. Los agentes se relacionan entre sí a través de mensajes de comunicación. La comunicación entre agentes y medio se realiza a través de acciones y percepciones. En ocasiones las percepciones del medio pueden ser transformadas en eventos específicos². También se definen en esta etapa tanto los datos externos persistentes como los datos compartidos internamente por el sistema. El diagrama del sistema recoge, por consiguiente, su estructura general (o perspectiva estática) mostrando a los agentes e indicando los datos usados por éstos así como sus percepciones, acciones y protocolos de interacción.

Los protocolos describen de manera detallada los procesos de comunicación entre agentes. Por lo tanto, a través de éstos se recoge el comportamiento dinámico del sistema.

Por último, en la fase de *diseño detallado de los agentes* se desarrolla la arquitectura interna de cada uno de éstos. Esta arquitectura permite al agente llevar a cabo las tareas y procesos destinados a lograr sus objetivos (es decir, actualizar sus creencias, realizar cálculos y evaluaciones, tomar decisiones, etc.).

En este *capítulo 3* se lleva a cabo la especificación del sistema así como el diseño de su arquitectura desde el punto de vista estructural. Posteriormente en el *capítulo 4* se presentan los aspectos dinámicos de esta arquitectura mediante el desarrollo de los protocolos de comunicación más significativos dentro de las operaciones de llegada.

¹En la metodología *Prometheus*, la identificación de los agentes se apoya en el análisis y agrupamiento de las distintas funcionalidades. Sin embargo en nuestro caso, ha resultado más adecuado aplicar el principio de racionalidad de *Newel* para la identificación de agentes durante la especificación de los escenarios y objetivos. Según dicho principio, los agentes son todas aquellas entidades autónomas que llevan a cabo tareas destinadas al logro de sus objetivos particulares [Newell 1982].

²Por ejemplo, el radar meteorológico a bordo de la aeronave puede proporcionar datos sobre las condiciones de las precipitaciones atmosféricas en el exterior en forma de percepciones. Sin embargo estos datos también pueden ser tratados para generar eventos cuando se produzcan valores críticos para determinadas operaciones. Apreciaciones similares se pueden hacer respecto a los datos del TCAS, radar de tráfico de ATC, sensores de temperatura y presión de la aeronave, etc.

3.1. Especificación del sistema

3.1.1. Requisitos

El escenario general a partir del cual se desarrolla nuestro modelo parte de la propuesta DAG-TM CE-11 [Sorensen 2000] descrita en la sección 1.1.3.2.

Desde un punto de vista estructural, este escenario de tráfico aéreo está constituido por el conjunto de entidades que se muestran en la figura 3.2. Estas entidades se han clasificado en dos categorías diferentes en función de que su carácter sea proactivo o no (es decir si pretenden alcanzar objetivos y realizan tareas para lograrlos). En el grupo de las *entidades no proactivas* se encuentra el *entorno operacional* en el que se desarrollan las operaciones de vuelo. En el grupo de las *entidades proactivas* se encuentran las aeronaves en vuelo, los proveedores de servicios de tránsito aéreo y el control operacional de aerolíneas.

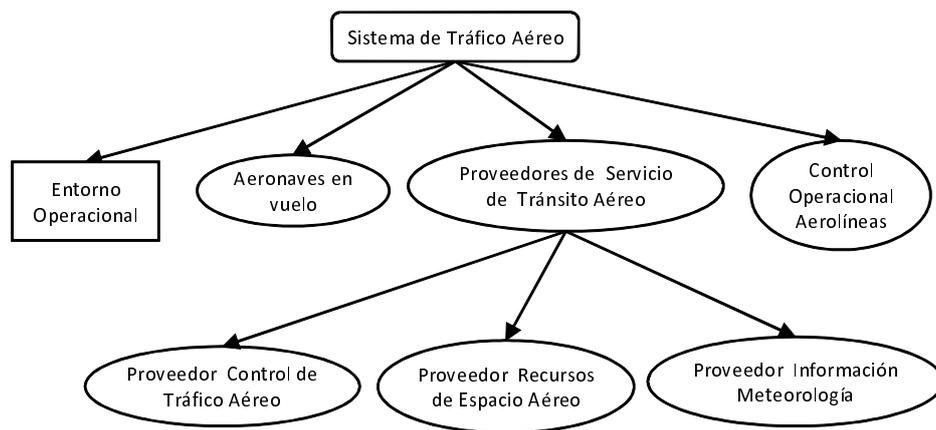


Figura 3.2: Entidades del sistema de tráfico aéreo

El entorno operacional (figura 3.3) se caracteriza por los parámetros atmosféricos de la región de estudio así como por los recursos y restricciones del espacio aéreo bajo consideración.

Desde el punto de vista dinámico, el escenario de tráfico aéreo se caracteriza por la evolución temporal del entorno operacional, tanto por su actividad propia (condiciones meteorológicas principalmente), como por la actividad de las entidades proactivas (trayectorias de las aeronaves y áreas de seguridad asociadas, configuración del espacio aéreo, etc.). A su vez, el comportamiento dinámico de las entidades proactivas está condicionado por el entorno operacional y por las demás entidades.

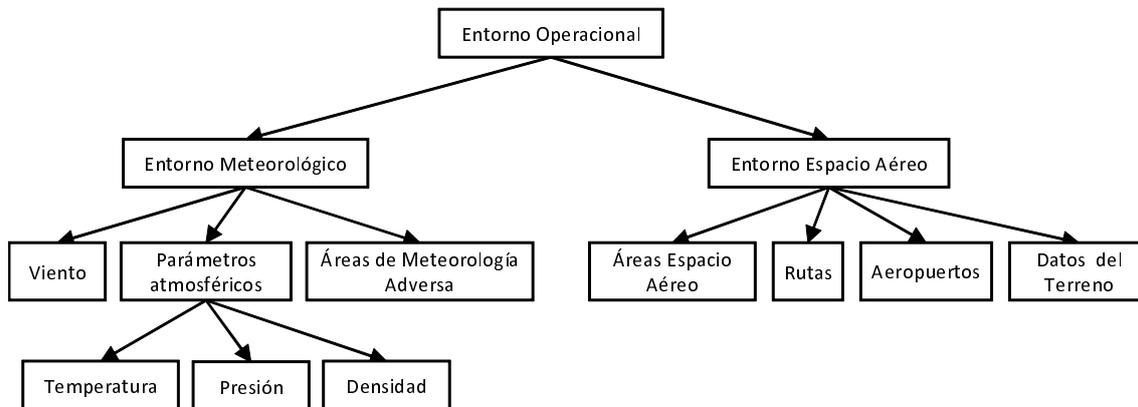


Figura 3.3: Parámetros del entorno operacional

A partir de esta descripción, nuestro trabajo consiste en diseñar un modelo de las operaciones de tráfico que cumpla con los siguientes requisitos:

1. Que represente escenarios de tráfico aéreo realistas en los que se contemplen el uso de las capacidades CNS/ATM. Ello significa, entre otras posibilidades, que las aeronaves pueden intercambiar información relativa a su estado e intenciones tanto con el ATC como con otras aeronaves [De Mata 2002].
2. Que incorpore procedimientos y sistemas específicos para automatizar las operaciones basadas en trayectoria.

Los procedimientos describen el conjunto de tareas que lleva a cabo cada entidad proactiva. Estas tareas tienen la finalidad de establecer las trayectorias que deberán volar las aeronaves, monitorizar el vuelo a lo largo de dichas trayectorias, corregir posibles desviaciones de la mismas y adoptar soluciones alternativas en los casos en que resulta imposible el seguimiento de la trayectoria asignada. Dichas actividades se llevan a cabo bien de forma individual o bien de manera coordinada entre dos o más entidades. Para ello, el sistema deberá implementar al menos un protocolo específico para la negociación aire-tierra de trayectorias 4D preferentes de usuario (*TPUs*) así como otro protocolo de negociación aire-aire para el caso en que la separación de las aeronaves les sea delegada a éstas por el ATC.

Por otra parte, tanto ATC como aeronave deben disponer de sistemas que les permitan llevar a cabo las tareas individuales de cada procedimiento. Así los sistemas de tierra tendrán capacidad para sintetizar trayectorias libres de conflicto, detectar conflictos y obtener soluciones al mismo, etc. Las aeronaves dispondrán de sistemas para sintetizar y evaluar trayectorias 4D a partir de las restricciones impuestas por

el sistema. También se supone a las aeronaves equipadas con sistemas FMS 4D de características similares al modelo propuesto en la sección 2.6.

3. Que contemple la intervención del elemento humano tanto en el proceso de toma de decisiones durante la planificación y ejecución de los procedimientos como en la supervisión de los mismos. Esto implica que el diseño deberá considerar las percepciones y acciones del sistema a través de interfaces persona-máquina en los procesos de automatización de las tareas de navegación y control de tráfico.

3.1.2. Escenarios

Los escenarios ilustran los aspectos esenciales de la operación del sistema durante las operaciones de vuelo. Como se ha comentado anteriormente, a partir de la identificación de varios escenarios se obtienen objetivos y a partir de éstos funcionalidades, acciones y percepciones. En general los escenarios contienen una secuencia de pasos consistentes cada uno de ellos en un objetivo, una acción o una percepción. También pueden incluir referencias a otro u otros sub-escenarios. Este proceso es iterativo hasta lograr un refinado completo de los objetivos del sistema.

La estructura de escenarios que se propone en esta Tesis permite identificar y describir las distintas etapas que constituyen los procedimientos de navegación y de control de tráfico. También facilita la incorporación de nuevos procedimientos para otras fases del vuelo o para resolver situaciones más complejas de la navegación y control del tráfico.

Para diseñar dicha estructura hemos considerado las operaciones de vuelo desde las diferentes perspectivas que ofrecen las entidades proactivas descritas en la sección anterior. Las actuaciones de las entidades están recogidas en los procedimientos. *Para definir los distintos escenarios, se ha considerado que cada procedimiento contiene actuaciones para planificar y ejecutar trayectorias en una determinada fase del vuelo así como para modificar dichas trayectorias en función de las contingencias que se produzcan durante la ejecución de la trayectoria (fallos en los sistemas de a bordo, incidencias de otros tráficos, etc.)*³.

Desde el punto de vista de la aeronave, la ejecución de un vuelo de origen a destino puede considerarse como la ejecución secuencial de un conjunto de procedimientos de navegación [OACI 2007]. Básicamente esta secuencia consiste en un procedimiento para la

³El hecho de que las operaciones de llegada no estén aisladas del resto de las operaciones de tráfico, hace necesario no obstante describir otros aspectos comunes a todas las operaciones de tráfico aéreo (y no únicamente las de llegada y aproximación). Un ejemplo evidente de esta interdependencia entre las distintas fases del vuelo es el hecho de que las acciones de planificación y negociación de trayectorias de llegada se llevan a cabo durante la ejecución de los procedimientos de navegación previos (por ejemplo durante la navegación en-ruta de la aeronave).

salida, otro para la navegación en ruta y otro para la llegada y aproximación al aeropuerto⁴. Por ello la planificación de las trayectorias puede realizarse para diferentes intervalos espacio-temporales dando lugar así a distintos tipos de planificación: *(i)* planificación del vuelo desde origen a destino, *(ii)* planificación de una determinada etapa del vuelo (por ejemplo para la salida, la navegación en ruta, para la etapa de llegada y aproximación, etc.) o *(iii)* planificación para modificar parcialmente la etapa o procedimiento de vuelo que se esté ejecutando en un instante dado.

En el caso de las operaciones de llegada, la planificación de la trayectoria de llegada podrá realizarse cuantas veces se requiera (en función de la variabilidad del entorno operacional) pero siempre antes de alcanzar el punto de inicio del citado procedimiento. Una vez que la aeronave se encuentre ejecutando la trayectoria de llegada sólo cabe contemplar la planificación y modificación de aspectos parciales de ésta (por ejemplo una desviación de la ruta, una modificación del tiempo asignado de llegada a un punto específico, etc.).

Por otra parte, los procedimientos también pueden ser vistos desde la perspectiva del ATC. De este modo cada agente ATC lleva a cabo tareas destinadas a planificar, monitorizar y/o modificar las trayectorias del tráfico que tenga asignado en función de la región y fase del vuelo en el que se encuentre. En nuestro caso, el tráfico de llegada estará asignado a un único ATC. Estas tareas están agrupadas en un único procedimiento ATC de llegadas.

Finalmente, se considerarán en dichos escenarios las otras entidades que facilitan o condicionan las tareas anteriores.

De este modo, se han definido cinco escenarios raíz a partir de los cuales se generan todos los demás. Estos escenarios están representados en la figura 3.4. En dicha figura se distinguen los siguientes escenarios raíz: *(i)* *Gestión de aeronave*, *(ii)* *Gestión de ATC*, *(iii)* *Gestión operacional de compañía*, *(iv)* *Suministro de recursos de espacio aéreo en área terminal*, *(v)* *Suministro de información meteorológica*.

Los escenarios anteriores constan a su vez de otros escenarios más específicos, cada uno de los cuales tiene asignado un objetivo con el mismo nombre⁵. La estructura de escenarios desarrollada a partir de los escenarios anteriores se describe en los siguientes apartados.

⁴Estos procedimientos no necesariamente tienen que coincidir con los procedimientos operacionales de ascenso en ruta, crucero y descenso en ruta. Así por ejemplo, si el TOD (*Top Of Descent*) se encuentra después del punto de inicio de la trayectoria de llegada, el procedimiento de llegada podrá tener una fase de crucero y otra de descenso. En cambio si el TOD está ubicado antes del punto de inicio de la trayectoria de llegada, el descenso se iniciará obviamente durante el procedimiento de navegación en ruta. También es posible definir otros procedimientos para el caso de emergencias y situaciones anormales durante la navegación.

⁵Para distinguir un escenario de un objetivo con su mismo nombre, la herramienta PDT de *Prometheus* añade el designador *scenario* a los escenarios tal y como se muestra en la correspondiente figura.

3.1.2.1. Escenario gestión de aeronave

Este escenario contiene los cuatro sub-escenarios siguientes: *actualizar información de entorno de aeronave*, *gestionar procedimiento de navegación*, *gestionar vigilancia a bordo* y *gestionar contingencias de aeronave*.

1. Escenario actualizar información de entorno de aeronave

Este escenario recoge las tareas destinadas a mantener actualizados los datos relativos a meteorología, terreno, tráfico aéreo y recursos disponibles para la navegación. La información anterior se obtiene a través de tres vías diferentes: los sensores de la aeronave (sistemas radar, sensores meteorológicos, etc.), las base de datos propias de la aeronave (por ejemplo base de datos del terreno) y los mensajes informativos proporcionados por los proveedores de servicios de tránsito aéreo.

2. Escenario gestionar procedimientos de navegación

Contiene los procesos destinados a planificar, ejecutar y modificar las trayectorias en cada fase del vuelo considerando además las contingencias sobrevenidas durante la ejecución de éstas⁶. Se trata, por tanto, de un escenario fundamental que recoge los aspectos relacionados con la automatización de las operaciones TBO. Este escenario está constituido por los cuatro sub-escenarios siguientes, los cuales recogen con mayor detalle dichos procesos:

- a) *Escenario planificar vuelo*, en el cual se incluyen las tareas de planificación de origen a destino. La síntesis de estas trayectorias se realiza de acuerdo a los mecanismos descritos en el *Capítulo 2*. Para ello es necesario una actualización previa de la información de entorno (recogida en el anterior escenario). Asimismo, las restricciones impuestas por los servicios de tránsito aéreo se negocian durante este proceso de planificación. A partir de este escenario se obtiene una lista de procedimientos para cada fase del vuelo. Cada procedimiento contiene el tramo de trayectoria planificada en este escenario para cada fase. También contiene los puntos y los instantes (o intervalos) dentro de los cuales la aeronave deberá actualizar los datos de trayectoria 4D correspondientes al procedimiento para la siguiente fase del vuelo. Esta actualización se lleva a cabo mediante un protocolo de negociación específico que confirme dichos datos o sugiera una modificación de éstos.

⁶Por extensión, en esta Tesis el término procedimiento hace referencia no solo a las tareas estandarizadas para planificar, monitorizar y modificar trayectorias, sino también a los atributos de dicho procedimiento. Los atributos están constituidos por la propia trayectoria y las restricciones del entorno operacional que la definen.

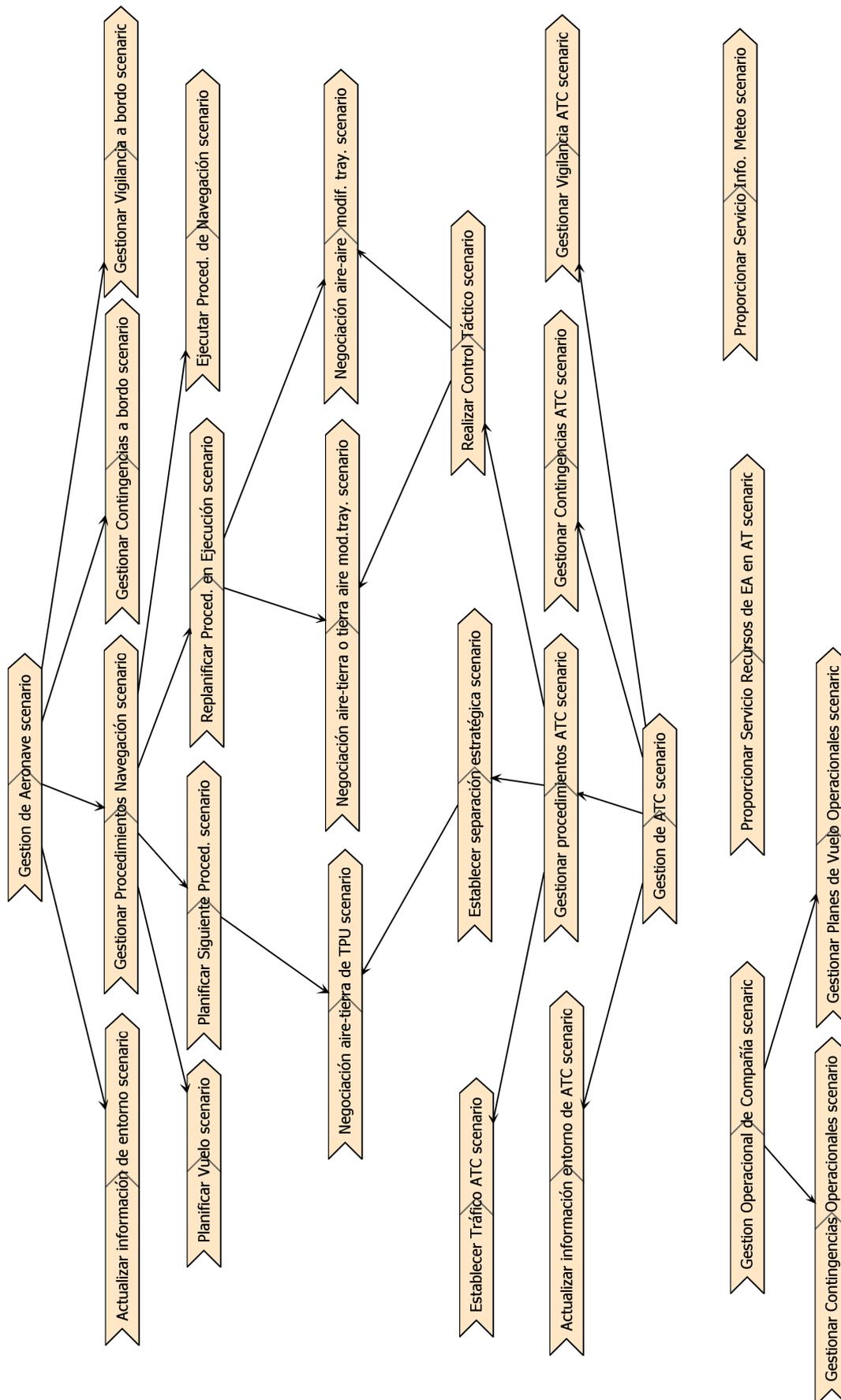


Figura 3.4: Escenarios

3. Modelado orientado a agentes del escenario de tráfico de llegada...

- b) *Escenario planificar siguiente procedimiento.* Como su nombre indica, se refiere a la planificación de un procedimiento cuya trayectoria asociada se ejecutará una vez finalizada la ejecución de la trayectoria que en un instante dado tenga asignada la aeronave. Esta planificación conlleva el cálculo de la trayectoria preferente de usuario y su negociación con el ATC. A su vez, la negociación implica la evaluación de propuestas realizadas por el ATC.

Como resultado de esta planificación resulta una nueva trayectoria que estará vinculada al siguiente procedimiento de navegación. También se definen otros atributos del procedimiento (por ejemplo puntos o instantes en los que deberá iniciarse el procedimiento, puntos obligatorios de paso, perímetros de áreas operacionales, etc.). Por tanto, dentro de este escenario se encuentran todos aquellos que describan protocolos de negociación aire-tierra para la negociación de trayectorias para cada fase del vuelo. Se trata de procesos de negociación multi-bilateral en la que múltiples aeronaves negocian sus respectivas TPUs de llegada con el ATC. En concreto en esta Tesis se desarrolla un escenario de negociación aire-tierra para la fase de llegada y aproximación. En este caso la aeronave inicia la negociación en un punto específico antes de incorporarse al Área Terminal. Obviamente este escenario también forma parte del escenario de gestión de ATC tal y como se muestra en la figura 3.4.

- c) *Escenario replanificar procedimiento en ejecución.* Este escenario contiene los procesos destinados a modificar las características de una trayectoria que se encuentre en ejecución (es decir, tareas para planificar una desviación de trayectoria para evitar un conflicto, una modificación del tiempo asignado de llegada a un determinado punto, etc.). En definitiva, este escenario de replanificación está orientado a planificar la modificación de una parte del procedimiento en ejecución, mientras que en el escenario *planificar siguiente procedimiento* descrito anteriormente se planifica el procedimiento completo antes de que se inicie la ejecución de su trayectoria. El escenario podría constar de varios sub-escenarios que recojan las respuestas a distintos tipos de contingencias. En este caso se señalan dos: (i) *escenario de negociación aire-tierra o tierra-aire de modificaciones de trayectoria*⁷ y (ii) *escenario de negociación aire-aire de modificación de trayectoria.*

⁷Realmente este escenario estaría constituido por dos escenarios distintos de negociación: uno de ellos que contemple las negociaciones iniciadas por el ATC para modificar las trayectorias y el otro contendría las negociaciones iniciadas por la Aeronave para el mismo propósito. Se han agrupado con la finalidad de simplificar la exposición, considerando además que en esta Tesis se desarrollarán los protocolos de negociación *Aire-Tierra de Negociación de TPU* y la *negociación Aire-Aire de Modificación de Trayectorias*,

En esta Tesis se ha desarrollado un escenario de negociación aire-aire que ilustra el proceso de negociación entre aeronaves para modificar la trayectoria. En este caso, el mantenimiento de la separación se supone que está delegado en las aeronaves mientras que el ATC solo interviene para autorizar y supervisar la negociación.

- d) *Escenario ejecutar procedimiento de navegación.* Esencialmente consiste en ejecutar la trayectoria asociada al procedimiento. Por otra parte, y teniendo en cuenta que las tareas de planificación del siguiente procedimiento deberán completarse antes de que finalice el procedimiento en ejecución, en este escenario también se recoge la generación de eventos para disparar dicha planificación. Estos eventos se generan durante la ejecución del procedimiento comparando la posición instantánea de la aeronave con los datos del escenario operacional del siguiente procedimiento de la lista (por ejemplo, puntos de inicio de negociación, puertas de entrada en el área terminal, etc.).

Los tres primeros sub-escenarios de planificación anteriores tienen además la particularidad de que son a su vez sub-escenarios que también proceden del escenario gestión de ATC.

3. *Escenario gestionar vigilancia a bordo*

Este escenario recoge las actuaciones llevadas a cabo para monitorizar el estado y las intenciones del tráfico circundante así como la posición de la propia aeronave respecto a áreas restringidas. A partir de esta vigilancia se detectarán los posibles conflictos y se calculará un conjunto de soluciones priorizadas a los efectos de ejecutarlas y/o negociarlas. En este escenario se generan además los eventos de contingencia de vigilancia. Dichos eventos están constituidos por mensajes que contienen información sobre la contingencia producida y sus posibles soluciones. Estos eventos, junto con otros eventos de contingencia procedentes de otros escenarios, se gestionan dentro del *escenario gestionar contingencias a bordo* que se describe a continuación.

4. *Escenario gestionar contingencias a bordo*

Se refiere a los procesos mediante los cuales se tipifican los distintos eventos de contingencia que se producen a bordo y se deciden las acciones que es necesario llevar a cabo respecto a la gestión de procedimientos de navegación. Entre los distintos tipos de contingencia a considerar caben citar las siguientes: conflicto (con aeronaves, terreno, a medio/largo plazo, etc.), fallo de sistemas, requerimientos operacionales (combustible, altitud, potencia, velocidad, régimen de descenso), meteorología adversa, incidencia de la tripulación, incidencia de pasaje, requerimientos de compañía,

3. Modelado orientado a agentes del escenario de tráfico de llegada...

etc. La respuesta a la contingencia viene determinada por sus características, el estado del procedimiento de navegación que se esté ejecutando en el instante en el que se produce y el rol asignado a la aeronave en dicha fase. De este modo, a partir de estas contingencias se decidirá el tipo de acción a tomar: modificar trayectoria para evitar conflicto, aumentar/disminuir velocidad para seguimiento de trayectoria 4D, disminuir al mínimo el tiempo de llegada a destino, etc.

3.1.2.2. Escenario gestión de ATC

Este escenario raíz está constituido por los cuatro sub-escenarios siguientes: *actualizar información de entorno de ATC*, *gestionar procedimientos de ATC*, *gestionar contingencias ATC* y *gestionar vigilancia de ATC*.

1. Escenario actualizar información de entorno de ATC

Contiene los procesos mediante los cuales el ATC mantiene actualizada la información relativa al estado e intenciones de las aeronaves en vuelo y a los recursos de espacio aéreo (incluyendo las áreas restringidas al vuelo). También incluye las tareas de adquisición de información en tiempo real de las condiciones meteorológicas en el área ATC y de modo particular en el entorno más próximo de la aeronave. La información sobre el estado de la aeronaves, sus intenciones y los datos meteorológicos se pueden obtener a partir de la propia aeronave (vía mensajes ADS-B/C). Los datos sobre los recursos de espacio aéreo se pueden obtener mediante información difundida o por informes específicos procedentes del agente encargado de planificar dichos recursos. Dentro de esta información de recursos de espacio aéreo se encuentra la información sobre áreas restringidas que a su vez indica las áreas restringidas por meteorología adversa.

2. Escenario gestionar procedimientos de ATC

Incluye los procesos vinculados al mantenimiento de la separación de las aeronaves para lograr un tráfico eficiente y fluido. Dichos procesos se han agrupado en cuatro sub-escenarios:

- a) *Escenario establecer tráfico ATC*: conlleva las acciones de recepcionar el tráfico que llega al área terminal así como las de transferir al ATC del aeropuerto el tráfico que haya alcanzado el punto de aproximación final y se disponga a realizar el aterrizaje.
- b) *Escenario establecer separación estratégica de las aeronaves*. Está ligado a los escenarios de *planificación de siguiente procedimiento* de cada aeronave a través del escenario de *negociación aire-tierra de TPU*. Es por tanto un escenario

clave en el modelado de las operaciones TBO. En este escenario el ATC calcula el secuenciado de aeronaves y trayectorias 4D libres de conflicto basándose en las propuestas de trayectoria realizadas por las aeronaves. El cálculo de trayectorias a asignar a cada aeronave se realizará en forma continuada entre todas aquellas propuestas que se reciben de las aeronaves dentro de una ventana de tiempo específica. Esta ventana de tiempo comienza cada vez que acabe la asignación definitiva de trayectorias a un conjunto de aeronaves anteriores o cuando una primera aeronave solicite autorización para ejecutar la trayectoria que proponga (lo que ocurra más tarde). Dentro de este escenario se encuentra el escenario de *negociación aire-tierra de trayectorias* descrito anteriormente y que es común al escenario raíz *gestión de aeronave*.

- c) *Escenario asignar roles de separación a cada aeronave*. Dentro de la gestión distribuida aire-tierra este escenario está orientado a generar eventos en los cuales el ATC asume el control de la separación o bien lo delega en un conjunto de aeronaves. La generación de estos eventos se basará en un conjunto de reglas de control de tráfico que tienen en cuenta el estado de los procedimientos y otras condiciones operacionales. En el caso del procedimiento de llegada desarrollado en esta Tesis, el ATC delega la separación en la aeronaves una vez finalizada la negociación aire-tierra para la asignación de sus respectivas trayectorias.
- d) *Escenario establecer separación táctica*. Está ligado a las tareas destinadas a modificar las trayectorias durante su ejecución debido a contingencias sobrevenidas y no previstas en la fase de planificación estratégica. Obviamente es un escenario que en lo posible se trata de evitar a través de los procesos que corresponden al escenario *establecer separación estratégica*. Las tareas realizadas en este escenario tienen una doble finalidad: (i) coordinar y autorizar procesos de negociación de autoseparación entre aeronaves cuando éstas tengan delegadas el control de la separación y (ii) activar protocolos de instrucciones específicas para lograr la separación de aeronaves en situaciones extremas de conflictos de corto alcance.

3. *Escenario gestionar vigilancia ATC*

Este escenario contiene los procesos de monitorización de la evolución del tráfico aéreo para identificar posibles desviaciones de los procedimientos de navegación acordados o posibles conflictos con otras aeronaves u obstáculos. También deberá proponer soluciones para corregir estas anomalías y activar los mecanismos encargados de implementarlas.

3. Modelado orientado a agentes del escenario de tráfico de llegada...

4. Escenario gestionar contingencias ATC

Este escenario recoge las tareas relativas a la identificación de las contingencias de tráfico aéreo y las circunstancias en las que se producen. También incluye los procesos de toma de decisión sobre las acciones a llevar a cabo respecto a la gestión de los procedimientos de control de tráfico.

3.1.2.3. Otros escenarios

Los otros tres escenarios raíz contemplan las intervenciones de las compañías aéreas y de las entidades que proporcionan servicios para el tráfico aéreo. Estos escenarios son los siguientes:

1. *Escenario operacional de compañía:* consta de los sub-escenarios *gestionar contingencias operacionales* y *gestionar planes de vuelo operacionales*.
2. *Escenario suministrar información de recursos de espacio aéreo en área terminal.*

Este escenario se refiere a las tareas de generación y distribución de la información relativa a los recursos de espacio aéreo que se requieren para la navegación y el control del tráfico aéreo en el área terminal. Esta información está contenida en informes *difundidos* con carácter general para todos los agentes del área terminal o bien en informes específicos *suministrados* a aquellos agentes que lo soliciten.

3. *Escenario suministrar servicio de información meteorológica.*

Este escenario es similar al anterior excepto que en este caso la información tratada es de tipo meteorológico. El hecho de no centralizar en un único escenario el suministro de información meteorológica y de recursos de espacio aéreo, se debe a que los procesos de comunicación con las fuentes que proporcionan la información y los procesos de elaboración de la misma son marcadamente diferentes en cada caso. Por ello se ha optado definir un escenario específico cuyo objetivo consista en gestionar y procesar la información meteorológica procedente tanto de bases de datos externas al sistema como de los propios sensores de los sistemas de tierra y de aeronaves.

3.1.3. Objetivos

Los objetivos del sistema constituyen la parte central de sus especificaciones. Su identificación y organización se apoya en los escenarios propuestos en la sección anterior. De este modo se obtiene una estructura de objetivos definida en varios niveles de abstracción a través de un diagrama de árbol.

La estructura de escenarios planteada hace posible que los objetivos del sistema de tráfico aéreo se pueden expresar mediante la superposición de los objetivos de cada una de las entidades proactivas que lo constituyen.

3.1.3.1. Objetivos de las aeronaves

El objetivo general de cualquier aeronave consiste en realizar una operación de vuelo eficiente y segura desde su posición inicial en el escenario hasta el punto de aproximación final para el aterrizaje⁸.

Este objetivo general se logra a través de cuatro objetivos específicos, cada uno de los cuales está ligado a los escenarios que forman parte del escenario *gestión de aeronave*. Por tanto estos objetivos son: *Actualizar información de entorno*, *Gestionar navegación*, *Gestionar vigilancia a bordo* y *Gestionar contingencias a bordo*. A su vez cada uno de estos objetivos se alcanzan a través de nuevos sub-objetivos (ver figura 3.5) que corresponden a los sub-escenarios de los escenarios anteriores. Una vez definidos los objetivos correspondientes a los escenarios de nivel más bajo se han especificado nuevos sub-objetivos para dar respuesta a cómo lograr el objetivo del que proceden.

De acuerdo a la figura 3.5 se observa que los escenarios de negociación aire-tierra de TPU han sido desglosados en nuevos objetivos que identifican procesos definidos para el cálculo de TPU, evaluación de propuesta TPU así como procesos de comunicación para solicitar TPU al ATC o para recibir propuestas del ATC.

Del mismo modo, el objetivo negociación aire-aire para modificar el procedimiento en ejecución es descrito con más detalle a través de sub-objetivos que definen los procesos principales que forman parte de dicha negociación.

Consideraciones similares se pueden hacer para el resto de objetivos.

⁸De acuerdo a lo indicado en el *Capítulo 2*, la eficiencia se mide en términos de coste de la operación del vuelo mientras que la seguridad se mide en términos de mantenimiento de la adecuada separación respecto a otras aeronaves o a áreas peligrosas para el vuelo.

3. Modelado orientado a agentes del escenario de tráfico de llegada...

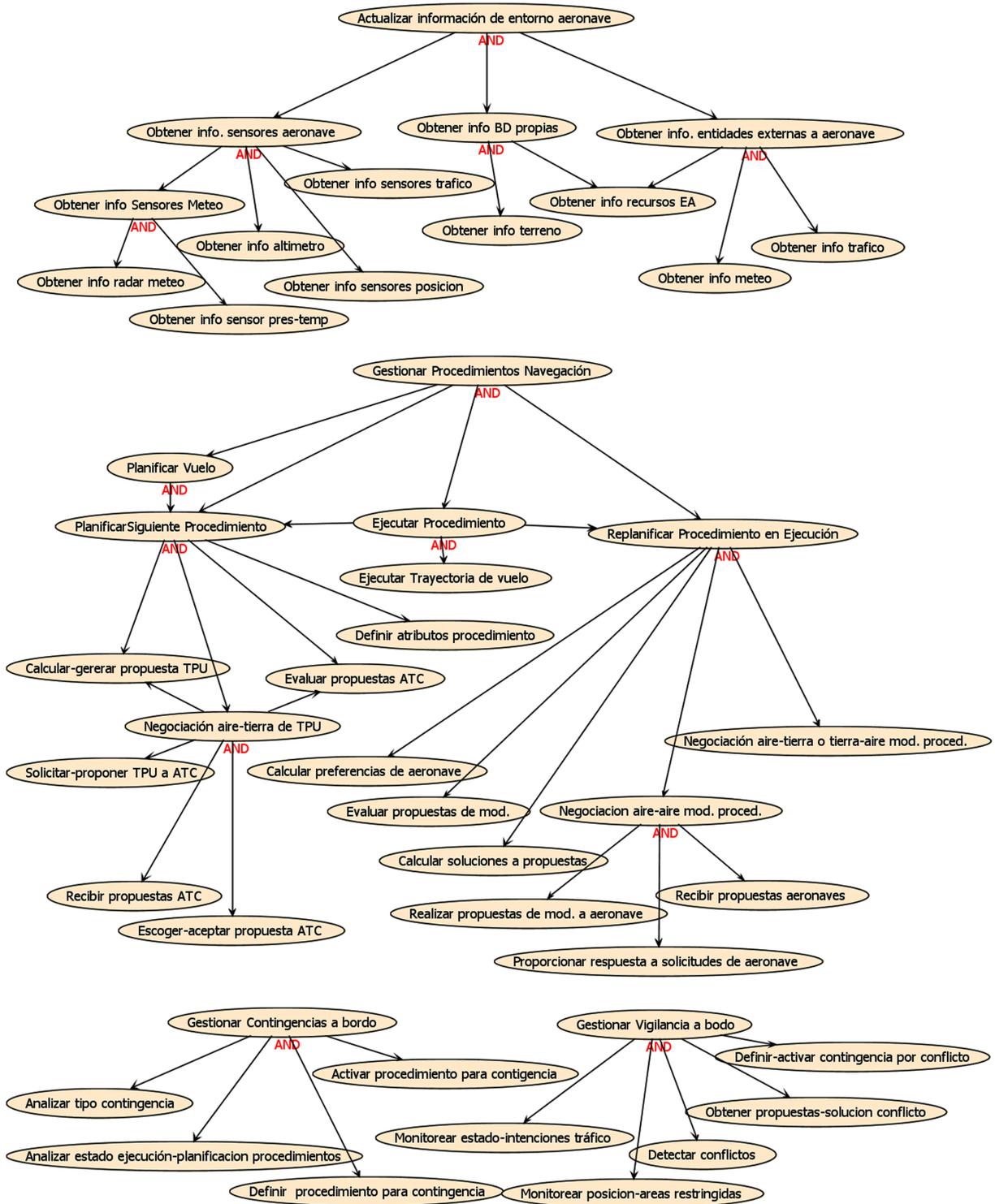


Figura 3.5: Objetivos de las Aeronaves

3.1.3.2. Objetivos del Control de Tráfico Aéreo

Como ya se ha comentado, el objetivo general del Control de Tráfico Aéreo es mantener un flujo eficiente y seguro de tráfico aéreo de acuerdo a las preferencias manifestadas por las aeronaves y las restricciones operativas del espacio aéreo. De acuerdo a la arquitectura de escenarios de la sección anterior, este objetivo se puede desglosar en los cuatro objetivos específicos siguientes: *Gestionar la información de ATC en área terminal*, *Gestionar Procedimientos ATC*, *Gestionar Vigilancia* y *Gestionar Contingencias de ATC*. Al igual que en el caso de las aeronaves, cada uno de estos sub-objetivos es descrito a través de un árbol de nuevos sub-objetivos que permiten identificar los subprocesos que corresponden a funcionalidades específicas.

3.1.3.3. Objetivos del Control de Operaciones de Compañía

El objetivo general del Control de Operaciones de Compañía durante la ejecución del vuelo consiste en minimizar el coste operacional del plan de vuelo autorizado por el ATFM, proponiendo la modificación de sus parámetros en tiempo real (tiempo de llegada, ruta, nivel de vuelo, etc.). Este objetivo se alcanza a través de los siguientes sub-objetivos (ver figura 3.7):

1. *Gestionar los planes de vuelo operacionales de la compañía*. A su vez esto se logra a través del cálculo de planes de vuelo, la negociación de dichos planes con el ATM y la asignación de dichos planes de vuelo. Los procesos destinados a gestionar los planes de vuelo operacionales requieren además que la información operacional sea actualizada continuamente.
2. *Gestionar las contingencias operacionales*

Consiste en identificar las diversas circunstancias operacionales que afectan a determinadas operaciones de vuelo y en establecer las modificaciones que se requieran sobre dichas operaciones. Entre las eventualidades que pueden afectar a las operaciones de vuelo cabe citar las siguientes: conexión entre vuelos, coordinación de tripulaciones de vuelo, contingencias notificadas por aeronaves, por ATC y/o por el Servicio de Información Meteorológica. Basándose en estas contingencias se generan la información y los eventos necesarios para definir y activar el correspondiente procedimiento operacional de la compañía. Este procedimiento operacional recogerá las actuaciones de coordinación con el ATM, el ATC o la propia aeronave.

3. Modelado orientado a agentes del escenario de tráfico de llegada...

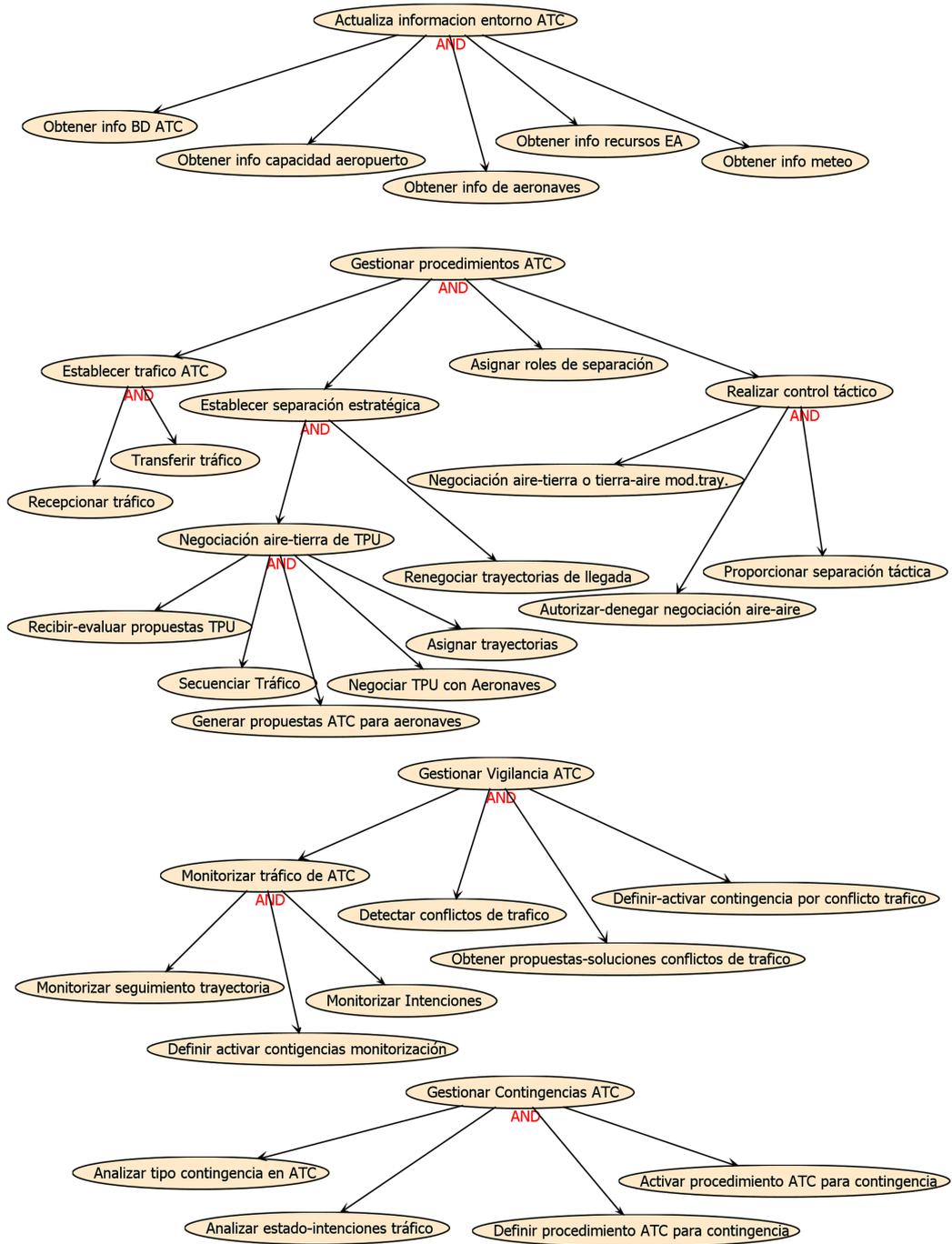


Figura 3.6: Objetivos del Control de Tráfico Aéreo

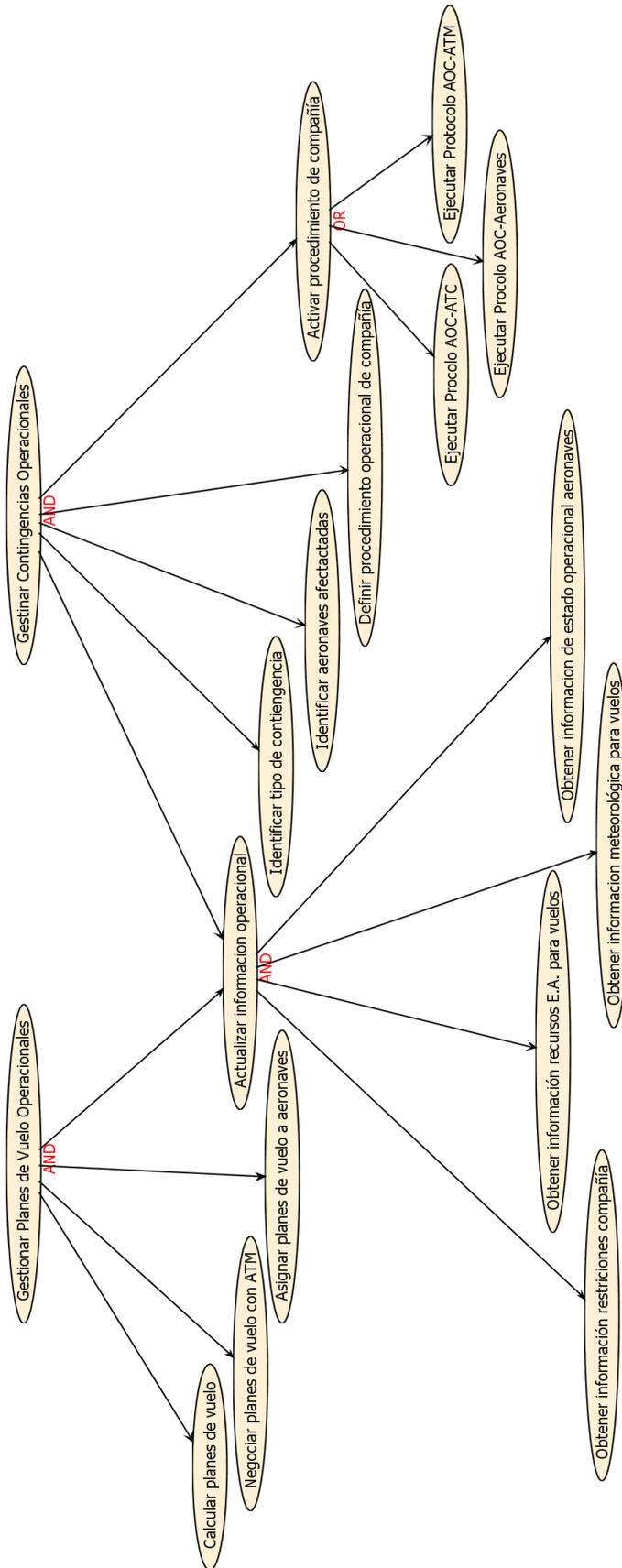


Figura 3.7: Objetivos del Control de Operaciones de Compañía

3.1.3.4. Objetivos del Proveedor de Recursos de Espacio Aéreo

Los objetivos del Proveedor de Recursos de Espacio Aéreo son los siguientes (figura 3.8):

1. *Actualizar información en Área Terminal.* Esta actualización se logra mediante el establecimiento de la capacidad de tráfico aéreo admisible en el Área Terminal así como la obtención de información meteorológica y de aquella otra relativa al estado e intenciones de las aeronaves que en un instante dado operan en el área terminal. A partir de la actualización periódica de esta información, el proveedor de recursos de espacio aéreo es capaz de cumplir con los dos objetivos siguientes: establecer recursos de espacio aéreo e informar de recursos de espacio aéreo.
2. *Establecer recursos de espacio aéreo* (fundamentalmente rutas-pasillos de llegada, puertas de entrada y áreas de espacio aéreo) e informar de recursos de espacio aéreo.
3. *Informar de los recursos de espacio aéreo.* Traslada a los agentes información bien en forma de difusión o bien a requerimiento de alguno de éstos.

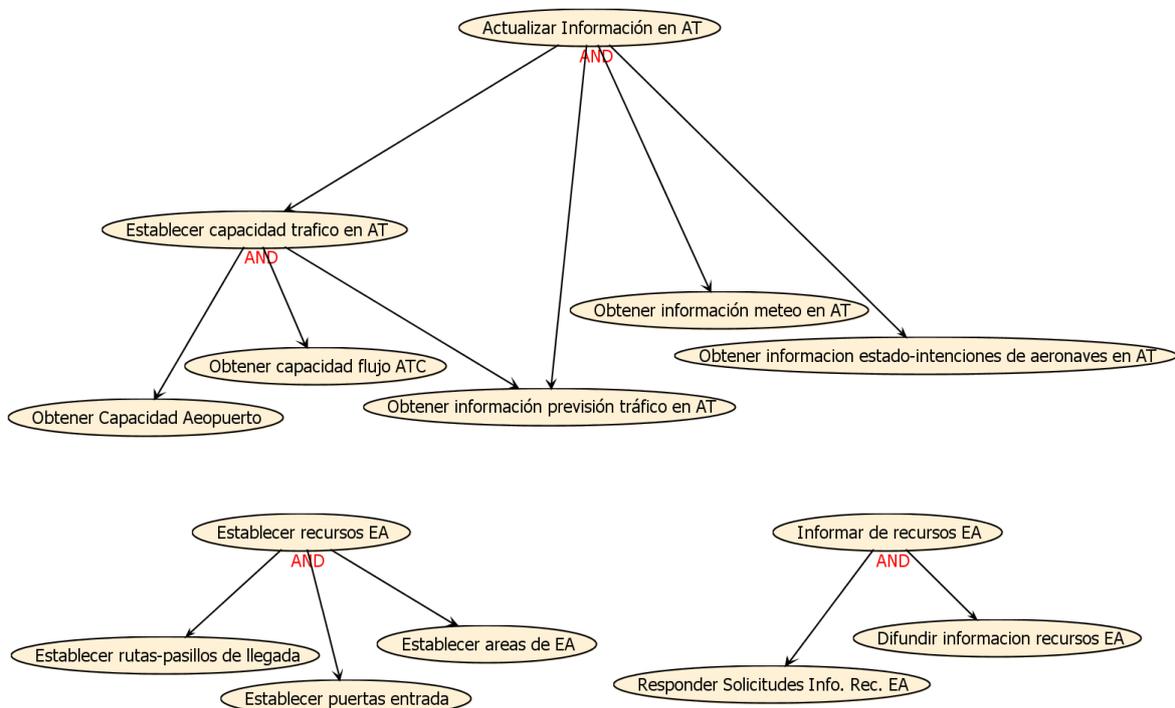


Figura 3.8: Objetivos del Proveedor de Recursos de Espacio Aéreo

3.1.3.5. Objetivos del Proveedor de Información Meteorológica

Los dos objetivos principales de este proveedor de información consisten por un lado en elaborar y actualizar los datos sobre información meteorológica y por otro en suministrar dicha información a las aeronaves, al ATC y al Proveedor de Recursos de Espacio Aéreo (véase figura 3.9). Al igual que en el caso del Proveedor de Información de Recursos de Espacio Aéreo, esta información se suministra bien en forma de radiodifusión o bien a requerimiento de los agentes que lo soliciten.

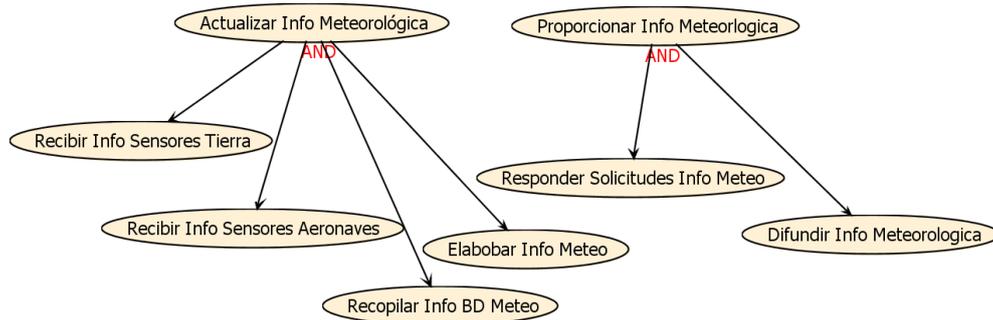


Figura 3.9: Objetivos del Proveedor de Servicios de Información Meteorológica

3.1.4. Funcionalidades

Como ya se comentó al comienzo de este capítulo, las funcionalidades constituyen un medio para lograr determinados objetivos de nivel medio e inferior pertenecientes a la estructura de objetivos descritos en la sección anterior. Por tanto recogen partes de comportamientos destinados a lograr uno o varios objetivos. A través de ellas también se pueden identificar las percepciones, acciones asociadas a éstas así como los datos que usan o producen.

La metodología *Prometheus* sugiere identificar funcionalidades (o roles) del SMA con el fin de:

1. Realizar un proceso “top-down” de refinado y reorganización de los objetivos.
2. Identificar aquellos procesos del sistema que reciben percepciones y/o que producen acciones.
3. Definir los distintos tipos de datos usados y producidos por el sistema.
4. Identificar los diferentes agentes que constituyen el sistema a partir de la agrupación de funcionalidades afines.
5. Utilizar las funcionalidades asociadas a cada agente como punto de referencia para el diseño detallado de su arquitectura interna.

Dado que los agentes han sido identificados incluso antes de definir los objetivos, en este caso concreto no es necesario llevar a cabo una agrupación de funcionalidades afines para identificar los tipos de agentes (punto 4 anterior). En cambio las funcionalidades identificadas en esta fase del diseño han permitido refinar la estructura de objetivos planteados anteriormente y reconocer las acciones, percepciones y datos que más adelante se describen. También se utilizan en el *capítulo 5* de esta Tesis como referencia para definir las capacidades que constituyen la arquitectura interna de los agentes.

Las funcionalidades siguientes se han agrupado de acuerdo a los objetivos que pretenden lograr. Aquellas funcionalidades asociadas a la generación de trayectoria o al tratamiento de datos de trayectoria implementan los modelos y algoritmos analizados o desarrollados en el *capítulo 2*.

3.1.4.1. Funcionalidades de las aeronaves

Las funcionalidades requeridas por las aeronaves para lograr sus objetivos son las siguientes (véase figura 3.10):

1. Asociadas a la información del entorno

- *Gestor de información de entorno de aeronave.* Esta funcionalidad mantiene actualizada la información de entorno de la aeronave. Para ello recibe percepciones del entorno vía sensores tales como receptores de los distintos sistemas de posicionamiento, altímetro, radar de tráfico (TCAS), radar meteorológico y sensores de temperatura y presión. La funcionalidad integra además la información procedente de los correspondientes proveedores de servicios de tránsito aéreo. Dado que esta última información no constituye una percepción no se representa como tal en la figura 3.10. También utiliza datos procedentes de una base de datos del terreno propia. Los datos producidos por esta funcionalidad son los siguientes: (i) *posición instantánea de la aeronave*, (ii) *recursos de espacio aéreo*, (iii) *áreas restringidas*, (iv) *predicciones meteorológicas* y (v) *vector de estado e intenciones del tráfico circundante*.

De esta forma todas las percepciones requeridas por el resto de funcionalidades que más adelante se describen pueden sustituirse por los datos generados por esta funcionalidad.

2. Asociadas a la monitorización y vigilancia activa del entorno

- *Detector de conflictos de navegación.* Proporciona información del conflicto a los efectos de que pueda ser evaluado por el sistema de resolución de conflictos.

Contiene distintos modelos de detección de conflicto así como un sistema de fusión de los datos proporcionados para cada modelo. Aunque no se ha representado, es posible asociar una percepción a esta funcionalidad con el fin de seleccionar, a voluntad de la tripulación, los parámetros de los modelos de detección de conflictos a utilizar en función de la fase de vuelo. Esto permite una adaptación del detector a distintas situaciones de tráfico para resolver manualmente problemas derivados de las falsas alarmas.

El detector de conflictos utiliza los datos producidos por la funcionalidad *Gestor de información de entorno de aeronave*. A su vez, produce datos de conflicto y un mensaje interno de evento de conflicto destinado a disparar la funcionalidad encargada de la resolución de conflictos que se describe a continuación.

- *Sistema de resolución de conflictos navegación*. Contiene los distintos modelos para obtener soluciones a los conflictos detectados por la funcionalidad anterior. La salida del sistema consiste en un conjunto de propuestas jerarquizadas por orden de preferencia para negociar la resolución.

3. Asociadas a la trayectoria

- *Generador-evaluador de TPU*. Sintetiza trayectorias 4D a partir de restricciones espacio-temporales a la vez que evalúa el coste de éstas en términos de tiempo-consumo y viabilidad operacional. Utiliza el modelo de *performance* de la aeronave (incluyendo datos actualizados de su masa) y las condiciones atmosféricas y de viento previsto.
- *Sistema de control de trayectoria*. Permite el seguimiento automático de trayectorias 4D y/o vectores de navegación. Las opciones de control automático de vuelo pueden ser activadas/desactivadas por el piloto (percepción comando Control Automático de Vuelo de la consola de control del piloto). En el caso de que la opción de control automático elegida sea el de seguimiento de vectores de navegación, el piloto deberá introducir manualmente los valores del vector de navegación (percepción comando vector navegación). El sistema de control de trayectoria calcula y aplica las entradas de control aerodinámico que son aplicadas a la dinámica de aeronave. También proporciona información de estados del seguimiento de la trayectoria de acuerdo al modelo propuesto en esta Tesis y descrito en la sección 2.6.
- *Sistema dinámico de aeronave*. Esta funcionalidad implementa la respuesta aerodinámica de la aeronave a las entradas de control de vuelo primario. Cuando el sistema de control de trayectoria está deshabilitado, las acciones de control proceden de la actuación del piloto sobre los mandos de vuelo y potencia.

3. Modelado orientado a agentes del escenario de tráfico de llegada...

4. Asociadas a la gestión de procedimientos de navegación

- *Planificador de procedimientos*. Esta funcionalidad actualiza y ordena la lista de procedimientos que la aeronave deberá planificar y ejecutar de forma secuencial durante el vuelo. La lista de procedimientos de navegación de la aeronave se encuentra almacenada en una base de datos específica. La elección y planificación se puede activar de forma automática a partir de la ejecución del procedimiento actual o bien de forma manual mediante el comando (percepción) *Inicia Gestión Navegación*. La selección automática de un procedimiento específico también depende del estado e intenciones de la aeronave.
- *Sistema de control de procedimiento de navegación*. Se encarga de ejecutar un procedimiento específico que se le proporciona como dato de entrada. Dicho procedimiento contiene los datos del escenario operacional a partir del cual esta funcionalidad genera los eventos de disparo de las acciones a realizar en función del estado e intenciones de la aeronave. Entre estos eventos se encuentran aquellos que disparan acciones para la planificación de trayectorias o para la ejecución de trayectorias por el correspondiente sistema de control de trayectoria.
- *Modificador de procedimientos*. Genera eventos que indican las acciones destinadas a establecer la modificación de un procedimiento de navegación que está en ejecución replanificando parcialmente la trayectoria contenida en el mismo.

5. Asociadas a la gestión de contingencias

- *Gestor de alarmas a bordo*. Caracteriza el tipo de alarma a partir de las alarmas de los sensores de los sistemas de aeronave. Esta caracterización se concreta en un evento de contingencia de a bordo específico.
- *Gestor de contingencias a bordo*. Es un sistema que, de acuerdo a un conjunto de reglas, determina las acciones procedimentales que es necesario llevar a cabo a partir de los eventos de contingencias que llegan a dicho sistema. Entre estos eventos de contingencias se encuentra aquellas activadas manualmente por el piloto (Percepción Contingencia Tripulación-pasaje). La inclusión del elemento humano en la toma de decisiones sobre la elección de la solución a adoptar para la resolución de la contingencia es posible a través de un menú de opciones (Percepción Menú opciones solución a contingencia).

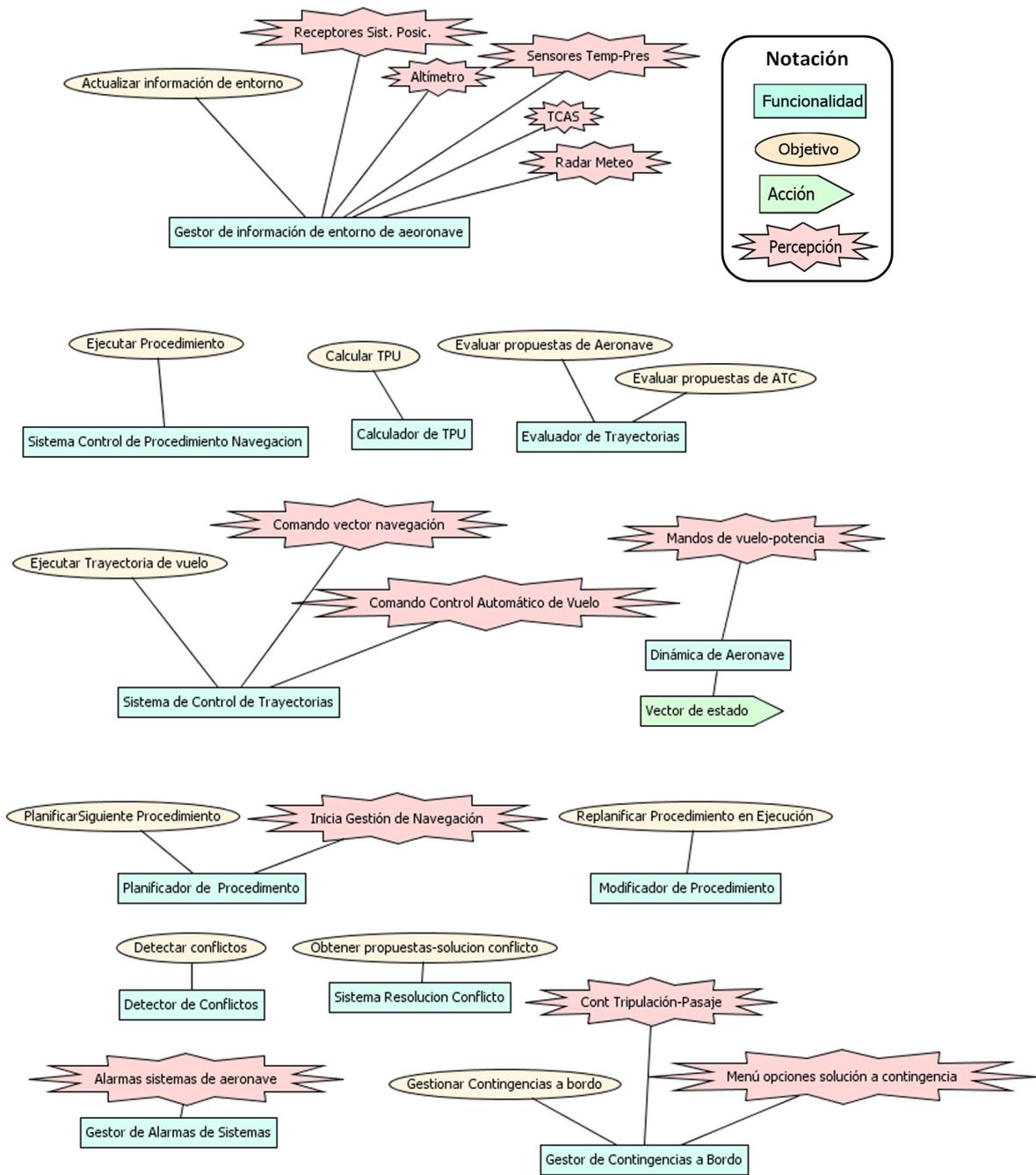


Figura 3.10: Diagrama de funcionalidades asociadas a las aeronaves

3.1.4.2. Funcionalidades del ATC

Las funcionalidades requeridas por el ATC son las siguientes:

1. Asociadas a la información del entorno

- *Gestor de información de tráfico en área.* Esta funcionalidad agrupa a todos los sub-sistemas del ATC que mantienen actualizada la información del tráfico y su entorno en una región de espacio aéreo determinada (en este caso el Área Terminal). Las entradas a esta funcionalidad provienen fundamentalmente de las propias aeronaves así como de los servicios de recursos de espacio aéreo. La información meteorológica también es accesible a este sistema. Los datos que proporciona esta funcionalidad son los siguientes: trayectorias previstas de aeronave, áreas restringidas con identificación de su tipo y arquitectura funcional de la región de espacio aéreo.

2. Asociadas a la monitorización y vigilancia activa del entorno⁹

- *Detector de conflictos de tráfico.* Identifica y tipifica los conflictos detectados durante los procesos de planificación de trayectorias o de monitorización de la evolución de éstas.
- *Sistema de resolución de tráfico.* Proporciona soluciones a conflictos de tráfico detectados tanto en la fase de planificación de trayectorias como en los procesos de vigilancia. La elección de la solución a implementar corresponde a otras funcionalidades encargadas de la gestión de procedimientos ATC.

3. Asociadas a la trayectoria

- *Evaluador TPU-Generador de restricciones.* Esta funcionalidad recibe peticiones TPU de las aeronaves y genera restricciones para cada una de ellas.
- *Secuenciador de trayectorias.* Similar a la funcionalidad anterior, pero utilizada únicamente para la planificación de trayectorias de llegada.

4. Asociadas a la gestión de procedimientos de ATC

⁹Las dos funcionalidades asociadas a la monitorización y a la vigilancia activa del entorno ATC son similares a las citadas la sección 3.1.4.1 para las aeronaves. En ambos casos se generan eventos de contingencia que contienen información sobre los datos del conflicto y sus posibles soluciones. También en ambos casos los eventos se tratan por los correspondientes sistemas de gestión de contingencias. Por tanto en estos sistemas están contenidas las funcionalidades que implementan los esquemas de toma de decisión y coordinación de tareas entre aeronaves o entre éstas y ATC para acordar y ejecutar la solución final al conflicto. El diseño específico de esta funcionalidad, y otras similares, está fuera del objetivo de esta Tesis. En cambio sí es necesario especificar los datos que usa y produce, así como su papel dentro de la arquitectura de nuestro modelo.

- *Planificador de procedimientos de tráfico.* Ejecuta las acciones iniciar y ejecutar la planificación de un procedimiento de tráfico.
- *Sistema de Control de Procedimiento ATC.* Se encarga de ejecutar el procedimiento. Entre las acciones desarrolladas por el sistema de control de procedimientos está la de enviar a la aeronave las restricciones contenidas en el procedimiento.
- *Modificador de procedimientos de tráfico.* Ejecuta las acciones destinadas a establecer la modificación de un procedimiento de ATC que está en ejecución replanificando parcialmente la trayectoria contenida en el mismo.

5. Asociadas a la gestión de contingencias

- *Gestor de alarmas de tráfico.* Caracteriza desde el punto de vista del tráfico las alarmas recibidas de las aeronaves o bien de los sistemas de vigilancia. Esta caracterización es concretada en un evento de contingencia de tráfico específico.
- *Gestor de contingencias de tráfico.* Esta funcionalidad determina las acciones procedimentales a ejecutar por el ATC de acuerdo al análisis de los eventos de contingencias que llegan a dicho sistema.

3.1.4.3. Otras funcionalidades.

Las funcionalidades del resto de entidades se extraen directamente a partir de los objetivos propuestos en las secciones 3.1.2.3 a 3.1.2.5.

Las funcionalidades del Proveedor de Recursos de Espacio Aéreo son básicamente dos:

- *Gestor de información de espacio aéreo.* Esta funcionalidad actualiza la información de espacio aéreo (en este caso en el área terminal) y traslada dicha información a las demás entidades. La misma podrá subdividirse en otras más simples para lograr los objetivos descritos en las secciones 3.1.2.4 referidos a obtener información sobre la previsión y la capacidad de admisión de tráfico, la meteorología y el estado e intenciones de aeronaves en el área terminal.
- *Planificador de recursos de espacio aéreo.* A partir de los datos proporcionados por la funcionalidad anterior y otros tales como los datos del terreno y de áreas restringidas, esta funcionalidad cubre el objetivo de establecer los recursos de espacio aéreo en el área terminal. Los datos que debe proporcionar el planificador son por tanto: las rutas y pasillos de llegada, la puertas de entrada al Área Terminal y las distintas áreas operacionales¹⁰ incluidas en esta última.

¹⁰Las áreas operacionales del Área Terminal, serán definidas en el *capítulo 4*. Tienen la finalidad de

Las funcionalidades del Proveedor de Servicio de Meteorología y del Control Operacional de Compañía también son inmediatas a partir de sus respectivos objetivos.

3.1.5. Acciones y percepciones

Las acciones del sistema son básicamente las salidas de datos hacia los interfaces gráficos de usuario. Además de éstas, hay que considerar el desplazamiento de la aeronave definido a través de su vector de estado.

Las percepciones son las entradas del sistema procedentes del entorno. Estas entradas corresponden a los distintos sistemas sensores que tiene el sistema así como de diferentes interfaces de usuario: interfaces de aviónica, de ATC, de proveedores de servicio de tránsito y de control operacional de compañía. Los interfaces críticos que requieren una especificación más detallada son los de aviónica y de ATC en la medida en que son éstos los utilizados por pilotos y controladores respectivamente. Los demás sólo tienen la finalidad de permitir la configuración de los servicios a prestar o de las comunicaciones con las demás entidades.

3.1.5.1. Acciones y percepciones de aeronave

Las acciones de las aeronaves proyectan la siguiente información sobre el interfaz gráfico del piloto: estado de alarmas, contingencia y actuaciones propuestas para su resolución, información de entorno, estado de los procedimientos, estados del proceso negociador, estado del seguimiento de trayectoria, vector de estado de la aeronave.

Las percepciones de las aeronaves se clasifican en dos grupos de acuerdo a su procedencia:

- *Percepciones procedentes de sensores:* sensores de temperatura y presión, altímetro, receptores de sistemas de posicionamiento, TCAS, radar meteorológico, alarmas de sistemas de aeronave.
- *Percepciones de interfaz persona-máquina:* mandos de vuelo y potencia, comandos de vector de navegación, comando de control automático de vuelo, opciones de monitorización a bordo, selector de soluciones de conflictos a bordo, ajuste de parámetros de protocolo de navegación, comando inicio de gestión navegación, menú definición de contingencia tripulación-pasaje, menú opciones solución a contingencia de a bordo.

establecer el tipo de acciones procedimentales que se llevan a cabo durante la planificación y ejecución del procedimiento.

3.1.5.2. Acciones y percepciones de ATC

Las acciones del ATC proyectan sobre su correspondiente interfaz gráfico la información relativa a estado de alarmas de tráfico, contingencias, conflictos y resolución, negociación con aeronaves y seguimientos de trayectoria de las aeronaves.

Las percepciones del ATC también se clasifican en los grupos siguientes:

- *Percepciones procedentes de sensores.* Datos procedentes de los sistemas radar de tráfico aéreo y receptores WAM.
- *Percepciones procedentes de interfaz hombre-máquina:* opciones de monitorización de tráfico, selector de soluciones de conflictos de tráfico, ajuste de parámetros de protocolo tráfico, menú definición de contingencia ATC, menú opciones solución a contingencia de a bordo, etc.

3.1.5.3. Otras acciones y percepciones

Las acciones de los proveedores de información meteorológica y de recursos de espacio aéreo también consisten en la proyección de información sobre sus respectivos interfaces gráfico de usuario. Estas acciones no requieren una consideración especial en el modelo objeto de esta Tesis.

Las percepciones del proveedor de servicios de meteorología están constituidas por los datos procedentes de sus propios sistemas con sensores. También tiene otras percepciones similares a las de el ATC.

Obsérvese además que los datos que proceden de los servicios meteorológicos externos al sistema o de los sensores de las aeronaves, no forman parte de las percepciones del proveedor de servicio de meteorología ni del proveedor de recursos de espacio aéreo.

3.1.6. Datos

Teniendo en cuenta las funcionalidades descritas en la sección 3.1.4, los datos usados o producidos por el sistema son los siguientes:

- Base de datos del terreno. Esta base de datos se utiliza por todas las entidades. Físicamente podría estar ubicada en la entidad que presta servicios de recursos de espacio aéreo, desde donde las demás entidades tienen acceso a dichos datos. Sin embargo, por una cuestión de redundancia y con el fin de evitar problemas derivados de la comunicación, cada entidad tendrá su propia base de datos. La información referida a la versión actualizada de dicha base de datos la proporciona el proveedor de servicios de tránsito aéreo.

3. Modelado orientado a agentes del escenario de tráfico de llegada...

- Base de datos de áreas restringidas en espacio aéreo. Al igual que la anterior, es gestionada por defecto por el proveedor de recursos de espacio aéreo. Sin embargo tanto ATC como aeronaves podrán realizar sus cálculos a partir de versiones propias y actualizadas de dichas bases de datos.
- Base de datos de performance de aeronaves. Se encuentra ubicada en las dependencias ATC. Es accesible también al proveedor de recursos de espacio aéreo. También las aeronaves, además de los datos de performance correspondientes a su modelo propio modelo, dispondrán de datos correspondientes otros modelos los efectos de utilizarlos en los procesos de negociación aire-aire de trayectorias.
- Datos de estado e intenciones de aeronave propia. Los datos de estado vienen dados por el vector de estado aerodinámico y el vector de estado del procedimiento. Este último vector de definirá en la la sección 4.3 después de abordar los procesos de negociación. Los datos de intenciones vienen expresadas de acuerdo a los formatos descritos en las sección 2.1.4.
- Datos de estado e intenciones de tráfico circundante. Son similares en cada una de las aeronaves circundantes a una aeronave considerada como propia. Estos datos son obtenidos por la funcionalidad *gestor de información de entorno* de la aeronave a partir de la recepción ADS-B de otras aeronaves.
- Datos de estado e intenciones de tráfico en Área Terminal. En este caso los datos son obtenidos por el Proveedor de Recursos de Espacio Aéreo a través de mensajes ADS-B/C y difundidos por éste mediante mensajes TIS-B.
- Datos de conflicto a bordo y datos de soluciones de aeronave. Los datos de conflicto caracterizan el conflicto detectado por los sistemas de a bordo (plazo temporal, aeronaves implicadas, área o zona de conflicto, etc.). Los datos sobre soluciones al conflicto consisten en una lista priorizada de intenciones de vuelo. Este conjunto de soluciones servirá para establecer una correspondiente negociación aire-tierra o aire-aire para su resolución.
- Datos de conflicto de tráfico y datos de soluciones de ATC. Los datos del conflicto y sus soluciones tienen un formato similar a los datos de las aeronaves. Sin embargo en este caso son las funcionalidades del ATC las que obtienen esta información a partir de los datos de trayectoria suministrados por las aeronaves.
- Datos de estado meteorológico y predicción meteorológica en área terminal. Estos datos son generados por la correspondiente entidad. El formato de estos datos es similar a los actuales formatos de METAR y TAF.

- Datos de recursos de espacio aéreo en área terminal. Corresponden a los datos de salida del planificador de recursos de espacio aéreo en área terminal. Contiene información sobre rutas, puntos de entrada al área terminal, dimensiones de las distintas áreas operacionales, etc.
- Datos de capacidad de aeropuerto y área terminal. Estos datos indican el número de aeronaves por unidad de tiempo que es capaz de admitir el aeropuerto o el área terminal.
- Datos de solicitudes TPU, expresados mediante una trayectoria 4D y/o mediante atributos sobre preferencias de usuario.
- Datos de restricciones ATC para TPUs.
- Base de datos de procedimientos de navegación y base de datos de procedimientos ATC. El formato de los procedimientos se describirá en el *capítulo 4* (sección 4.3). Estas bases de datos incluyen también los procedimientos de contingencia de aeronave y de contingencia de ATC respectivamente.

3.2. Diseño de la arquitectura: diagrama del sistema

Como ya se ha comentado, el *diseño de la arquitectura* corresponde a la segunda etapa del proceso metodológico *Prometheus* empleado en esta Tesis. En esta fase se diseñan los aspectos estructurales del sistema así como su comportamiento dinámico. El diseño de la arquitectura se recoge en un diagrama de arquitectura del sistema. La notación empleada para representar a los diferentes elementos que forman parte de dicho diagrama está representada en la figura 3.11. El diagrama de arquitectura de nuestro modelo se muestra en la figura 3.12. En él se señalan los agentes así como las principales interacciones de éstos con el entorno y con los demás agentes. Las interacciones entre agentes están constituidas tanto por mensajes individuales como por grupos de mensajes organizados en forma de protocolos de comunicación. En esta sección se describen los aspectos estructurales del diseño recogidos en el diagrama de arquitectura del sistema. Posteriormente, en el *capítulo 4* se lleva a cabo el diseño detallado de los principales protocolos que caracterizan su comportamiento dinámico.

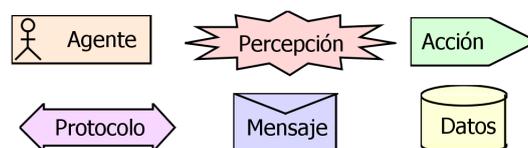


Figura 3.11: Notación empleada en el diagrama de arquitectura del sistema

3.2.1. Especificación de tipos de agentes

De acuerdo a los objetivos y funcionalidades descritos en las sesiones anteriores, los agentes más directamente implicados en el tráfico de una determinada región del espacio aéreo son los siguientes (véase figura 3.12):

- *Agente Aeronave*
- *Agente ATC-Llegadas*
- *Agente Proveedor de Recursos de Espacio Aéreo*
- *Agente Proveedor de Información de Meteorología*
- *Agente Control de Operación de Compañía*

Considerando que la región de Área Terminal limita con otras regiones de espacio aéreo adyacentes y con la zona del tráfico del aeropuerto, conviene diferenciar las acciones del agente ATC en dicha región con respecto a las acciones en otras áreas. Además en el Área Terminal coexisten las operaciones de llegada y salida. Por ello, el agente *ATC-Llegadas* deberá llevar a cabo diversas otras tareas de coordinación con otros agentes tales como:

- *ATC-Salidas*: que realizaría funciones ATC para el tráfico de salida en Áreas Terminales.
- *ATC-Ruta*: responsable del tráfico previo al Área Terminal. Una posible ampliación del modelo actual a escenarios de tráfico aéreo puerta a puerta al sistema de tráfico aéreo global, requiere definir una determinada estructura de agentes ATC-Ruta que coordinan sus actividades. Por otra parte, las funciones de gestión de la información de flujo de tráfico aéreo pueden ser llevadas a cabo por uno o varios agente ATM en función del modelo de distribución de tareas propuesto.
- *ATC-Aeropuerto*: que asume el control en la zona de tráfico del aeropuerto de destino.

Por otra parte, se ha definido un agente específico ATM (Air Traffic Manager) encargado de gestionar la información relativa al estado y las previsiones de tráfico aéreo en los distintos sectores ATC. La información sobre predicción de tráfico se utiliza tanto por los agentes ATC como por el agente Recursos de Espacio Aéreo para llevar a cabo sus respectivas acciones de planificación de tráfico y de espacio aéreo.

Teniendo en cuenta que en esta Tesis el modelo está centrado en las operaciones de llegada, los agentes anteriores tienen una función secundaria en nuestro diseño. De este modo las tareas de coordinación con estos agentes se centran en aquellas que están

destinadas a proporcionar la información requerida por los demás agentes del sistema. En particular esta información es la siguiente:

- Predicción del flujo de tráfico entrante al Área Terminal. Se trata de información requerida por el Agente Proveedor de Recursos de Espacio Aéreo para planificar las rutas de llegada. La misma es proporcionada fundamentalmente por el agente ATM.
- Información de la capacidad del aeropuerto. Información proporcionada por el agente Aeropuerto y usada tanto por el Agente Proveedor de Recursos de Espacio Aéreo como por el agente ATC.

3.2.2. Descriptores de agente

Las características de cada uno de los agentes que forman parte de este sistema se recogen a través de descriptores que contienen la información que más adelante se indica. Algunas de estas características (por ejemplo las que se refieren a la inicialización y desaparición de los agentes) son requeridas únicamente en la fase de implementación *software* del modelo conceptual. Los descriptores de los agentes contienen los siguientes campos:

- Descripción del agente. Corresponde a la descripción realizada en los apartados anteriores de cada una de las entidades proactivas del escenario de tráfico.
- Cardinalidad mínima y máxima del agente. El rango de cardinalidad de los agentes aeronave viene dado por $C_{acf} = \{0, N_{max}\}$, donde N_{max} representa la capacidad máxima de admisión de tráfico del área terminal en un instante dado. El agente Control Operacional de Compañía tiene un rango de cardinalidad $C_{aoc} = \{0, M_{max}\}$. Lógicamente, en cada instante el número de aeronaves en vuelo será mayor o igual al número de agentes de Control Operacional de Compañía. El agente ATC¹¹ y los demás agentes del modelo tienen cardinalidad 1.
- El tiempo de vida de cada agente o periodo en el que existen como tales dentro del sistema. En nuestro caso los agentes existen permanentemente, excepto los agentes aeronave cuyo tiempo de vida corresponde al tiempo que tardan en atravesar el Área Terminal. Más concretamente, un agente aeronave se inicializa en un determinado punto o instante previo al inicio de la trayectoria de llegada. Asimismo, el instante de desaparición de dicho agente tendrá lugar cuando éste alcance el punto de aproximación final para el aterrizaje (o cualquier otro punto acordado para la transferencia del tráfico al agente ATC-Aeropuerto).

¹¹El hecho de que el ATC de llegadas tenga cardinalidad 1 implica que no se aplica ningún tipo de sectorización para el control de tráfico de llegadas.

3. Modelado orientado a agentes del escenario de tráfico de llegada...

- Inicialización o acciones realizadas al comienzo de su creación. La inicialización de los agentes tiene particular importancia cuando éste se ejecuta en un entorno de simulación. En este caso, dado un escenario inicial de tráfico definido a través de sus correspondientes estados e intenciones, las tareas a realizar por el agente ATC y el agente Aeronave consistirán en ejecutar sus respectivos procedimientos de navegación y de control de tráfico. Los demás agentes realizan sus actividades de forma periódica o a demanda, con lo cual su inicialización deberá contemplar la lectura de los datos de entorno definidos en las condiciones iniciales.
- Las funcionalidades, acciones, percepciones y datos que usa o producen los agentes y que han sido enumerados en las secciones anteriores.
- Los protocolos de interacción entre los agentes. Estos protocolos describen el comportamiento dinámico del sistema tal y como se describe a continuación.

3.2. Diseño de la arquitectura: diagrama del sistema

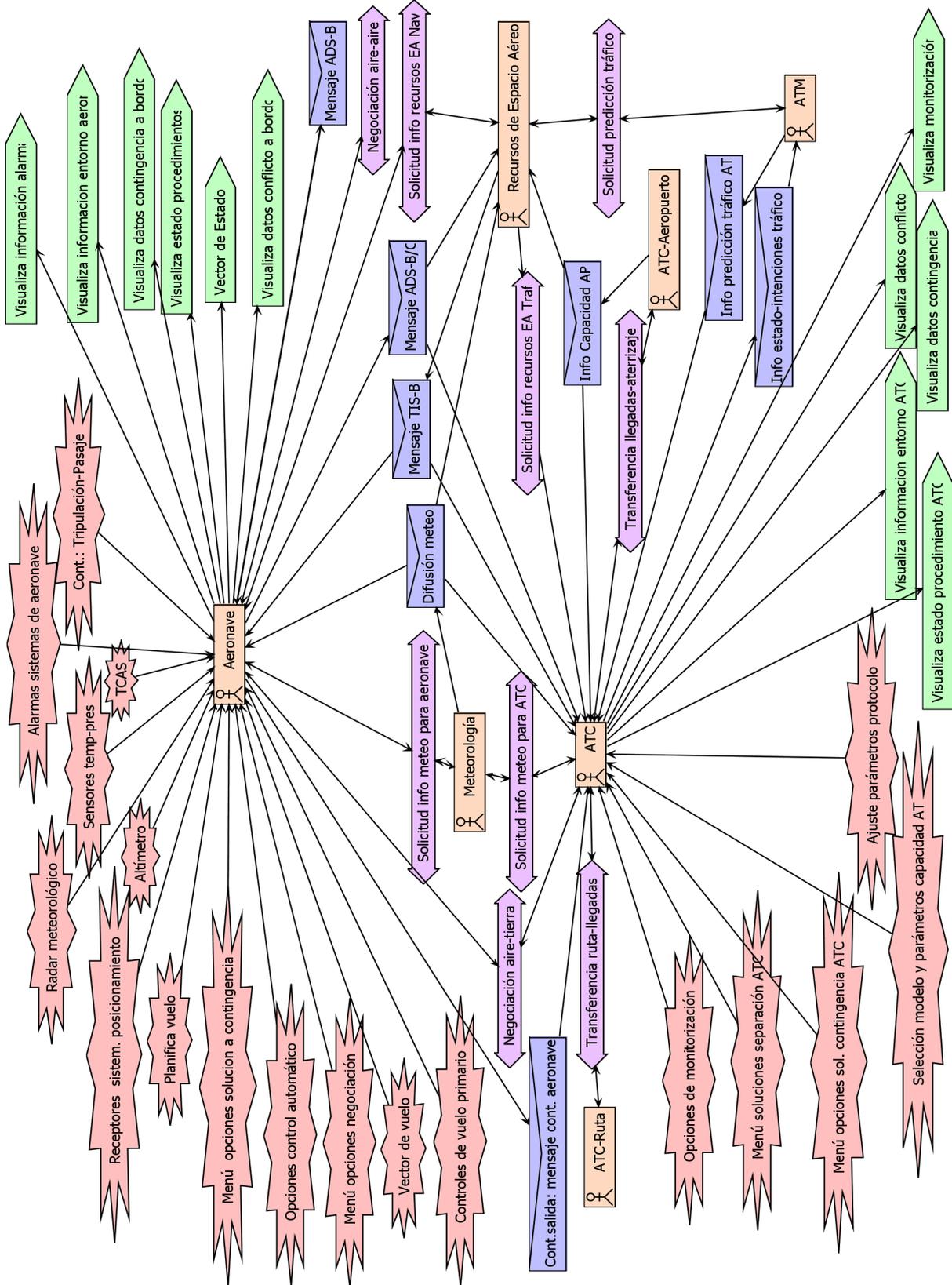


Figura 3.12: Arquitectura del sistema

3.2.3. Comunicación entre los agentes: mensajes y protocolos

El comportamiento dinámico del sistema está definido por un conjunto de interacciones mediante las cuales los agentes se comunican entre sí.

Esta comunicación entre agentes se realiza bien a través de mensajes individuales de carácter puntual o periódico o bien a través de secuencias estructuradas de mensajes (protocolos) entre dos o más agentes.

Los mensajes individuales tienen la finalidad de incrementar la base de datos de conocimientos de los agentes receptores. Tienen carácter unidireccional desde un emisor a uno o varios receptores.

Los protocolos se utilizan para organizar las comunicaciones en las que se negocian soluciones aceptables para dos o más agentes, en las que se solicita y se recibe información y/o en las que se coordinan las responsabilidades de los agentes.

La identificación de mensajes y protocolos entre los agentes recogidos en la figura 3.12 se ha realizado a partir de la inspección de los escenarios descritos en la sección 3.1.2 y de los diferentes datos usados y producidos por cada agente.

3.2.3.1. Mensajes

Los mensajes salientes de cada uno de los agentes son los siguientes:

1. Mensajes enviados por los agentes Aeronave:
 - Mensajes ADS-B enviados a otras aeronave que contienen datos sobre su estado e intenciones. También se podrán incluir en estos mensajes los datos atmosféricos recogidos por los sensores de la aeronave.
 - Mensajes ADS-B/C enviados a ATC y Proveedor de Recursos de Espacio Aéreo.
2. Mensajes enviados por el agente ATC-Aeropuerto al Agente ATC (de llegadas en Área Terminal). Éstos contienen datos de la capacidad de admisión de tráfico del aeropuerto.
3. Mensajes enviados por el agente ATM al Agente ATC. Contienen datos sobre la predicción de tráfico en el Área Terminal.
4. Mensajes enviados por el agente ATC al Agente ATM con información sobre el estado e intenciones del tráfico del Área Terminal.
5. Mensajes TIS-B enviados por el agente Proveedor de Recursos de Espacio Aéreo a aeronaves y ATC proporcionando información operacional en el área terminal.

6. Mensajes enviados por el Agente Meteorología a aeronaves, proveedor de recursos de espacio aéreo y ATC informando sobre condiciones meteorológicas actuales y previsiones.

3.2.3.2. Protocolos

Los protocolos del sistema se pueden clasificar en tres categorías:

- Protocolos para la negociación durante la planificación o modificación de las trayectorias:
 - Protocolos de negociación aire-tierra entre Aeronave y ATC. Son aquellos que inicia la aeronave con el fin de planificar la trayectoria correspondiente a una fase de vuelo posterior a la actual o bien para renegociar una modificación de la trayectoria actual.
 - Protocolos de negociación tierra-aire entre ATC y Aeronave para la renegociación de modificaciones sobre acuerdos anteriores.
 - Protocolos de negociación aire-aire entre aeronaves, para el mantenimiento de la autoseparación, cuando ésta ha sido delegada en las aeronaves.
- Los protocolos de solicitud de información para la planificación:
 - Protocolos de solicitud de información a requerimiento de la aeronave: *(i)* protocolo para la solicitud de información meteorológica y *(ii)* protocolo para la solicitud de información sobre recursos de espacio aéreo para la navegación.
 - Protocolo de solicitud de información de recursos de espacio aéreo en el Área Terminal a requerimiento del ATC
 - Protocolo de solicitud de predicción de tráfico aéreo a requerimiento del agente Proveedor de Recursos de Espacio Aéreo.
- Protocolos para la coordinación de actividades entre dependencias ATC. En este grupo se encuentran los protocolos para la coordinación de transferencia de tráfico desde el ATC de ruta al ATC de Llegadas y desde éste al ATC de Aeropuerto.

El diseño de la arquitectura del sistema se completa con el diseño de los protocolos anteriores definiendo así el comportamiento dinámico del sistema. A la hora de proponer un diseño detallado de los mismos, en esta Tesis se han escogido aquellos que recogen los procesos internos que tienen lugar en aeronaves y en el ATC durante los procedimientos de planificación y/o modificación de trayectorias de llegada. De este modo, en

el capítulo siguiente, se propone el diseño de dos protocolos específicos: (i) un protocolo de negociación aire-tierra para planificar la trayectoria de llegada y (ii) un protocolo de negociación aire-aire para la modificación de trayectorias cuando la separación ha sido delegada en las aeronaves.

3.3. Conclusiones

En este capítulo se ha desarrollado la especificación y la arquitectura del modelo propuesto en esta Tesis.

La especificación se apoya en un conjunto estructurado de objetivos que deben lograr cada una de las entidades proactivas que forman parte del sistema de tráfico. Dentro de esta estructura, algunos objetivos se logran a través de la coordinación de tareas entre dichas entidades. En cambio, otros objetivos de nivel inferior se logran a través de procesos que deben llevarse a cabo por medio de funcionalidades específicas. La descripción de estas funcionalidades así como de los datos que usan o producen, está basada en el análisis de modelos matemáticos y algoritmos para las operaciones TBO presentado en el *capítulo 2*.

Los objetivos anteriores se han identificado a partir de un conjunto de escenarios igualmente estructurados que describen el comportamiento operacional de un entorno de tráfico TBO. A su vez, los escenarios fueron definidos a partir de un escenario general en el que convergen los aspectos de gestión distribuida del concepto DAG-TM y de navegación y control de tráfico del concepto TBO. En este contexto se consideraron las perspectivas que tienen de este escenario general las distintas entidades proactivas que forman parte del mismo. Se obtuvo así una estructura de escenarios y sub-escenarios que es válida para todas las fases del vuelo, independientemente de que en esta Tesis se desarrollen los escenarios de negociación para las operaciones de llegada.

Para el caso de aeronaves y de ATC se consideraron escenarios específicos para la gestión de sus respectivos procedimientos y para la gestión de las contingencias que pudieran alterarlos. También se tuvieron en cuenta los escenarios destinados a mantener actualizada la base de conocimientos que estos agentes tienen del entorno así como los escenarios que generan eventos que informan de las contingencias que afectan a la seguridad del vuelo (detección de conflictos, fallos de sistemas, meteorología adversa, etc.).

La definición de un esquema de gestión automatizada de los procedimientos permitió además desarrollar el escenario de gestión de procedimientos a través de nuevos sub-escenarios específicos. Entre estos sub-escenarios se encuentran aquellos que recogen la planificación estratégica de trayectorias para un intervalo espacio-temporal determinado y la planificación de modificaciones tácticas de éstas en caso de que surjan contingencias no previstas. Los escenarios para la planificación estratégica de trayectorias están constituidos

por nuevos escenarios referidos a la negociación aire-tierra los cuales contienen las tareas de coordinación entre aeronaves y ATC. La planificación de modificaciones tácticas se desarrolla tanto a través de negociación aire-aire como aire-tierra, dependiendo de qué agente tenga asumida la responsabilidad de la separación.

Por otro lado, la arquitectura del sistema presentada en este capítulo está constituida por las diversas entidades autónomas y proactivas (o agentes) que forman parte del escenario operacional: aeronaves, ATC, compañías aéreas, etc.

Dentro de esta arquitectura los dos agentes críticos del sistema son las aeronaves y el ATC, ya que son éstos los que con mayor frecuencia deben conciliar sus respectivos objetivos mediante la negociación.

Sin embargo, la toma de decisiones de dichos agentes les exige una base de conocimiento del entorno más completa y actualizada que no siempre es accesible a través de sus respectivos sensores o mediante el intercambio de información entre ellos. Por este motivo se incluye en la arquitectura a los agentes Proveedor de Recursos de Espacio Aéreo y Proveedor de Información de Meteorología como agentes encargados de obtener, gestionar y proveer de información a los agentes que lo requieran. A su vez éstos agentes pueden obtener parte de la información que gestionan tanto de los sensores de las aeronaves (por ejemplo datos meteorológicos) como de los sistemas de ATC (por ejemplo trayectorias de tráfico asignadas a las aeronaves). Al estar nuestro modelo centrado en las tareas de gestión de procedimientos, éstos agentes han sido tenidos en cuenta únicamente como elementos proveedores de información, bien difundida con carácter general, o bien proporcionada a requerimiento de aeronaves y ATC. De esta forma la arquitectura propuesta puede utilizarse para incorporar nuevos procedimientos de distribución de información entre agentes. Del mismo modo, se identificaron otros agentes con el fin de poder extender este modelo a todas las operaciones puerta-a-puerta. Estos agentes son el agente Control de Operación de Compañía (que define en cada instante los objetivos de las aeronaves adscritas a la compañía) y diversos agentes ATC destinados a coordinar las tareas de transferencia y recepción de tráfico de llegada y de información con el ATC-Llegadas (ATC-Rutas, ATC-Aeropuerto, ATC-Salidas, etc.).

El diseño de la arquitectura no sólo describe los roles de los agentes anteriores, sino que además recoge las interacciones que se producen entre éstos a través de la comunicación. Estas interacciones también han sido identificadas y clasificadas en este capítulo.

3. Modelado orientado a agentes del escenario de tráfico de llegada...

Capítulo 4

Diseño de los protocolos de negociación

El diseño de la arquitectura del sistema a modelar se completa con la descripción de su comportamiento dinámico. A su vez, este comportamiento dinámico se modela a través de protocolos de comunicación que describen de manera detallada las interacciones entre agentes que fueron identificadas en la sección 3.2.3.

Teniendo en cuenta los escenarios desarrollados en la sección 3.1.2, en este capítulo se propone un diseño detallado de aquellos protocolos que forman parte de los procesos de planificación estratégica de las trayectorias de llegada o de la modificación parcial de trayectorias previamente asignadas. De acuerdo a los mencionados escenarios, la planificación de procedimientos (o de sus trayectorias asociadas) lleva aparejada la realización de un conjunto de tareas que exigen la intercomunicación entre agentes. Estas tareas consisten en: *(i)* la identificación de las restricciones del entorno operacional para calcular la trayectoria y *(ii)* la negociación de las trayectorias preferentes de cada aeronave con el ATC o con otras aeronaves con el fin de compatibilizar sus preferencias con los requisitos de seguridad y eficiencia del tráfico.

Para llevar a cabo estas tareas hemos propuesto dos protocolos de negociación que representan el núcleo de las actuaciones procedimentales de llegada y aproximación. Esta propuesta también incluye el diseño de los procesos de toma de decisión internos de los agentes durante la ejecución de dichos protocolos. Los dos protocolos desarrollados son los siguientes:

- Protocolo de negociación aire-tierra de trayectorias preferentes de usuario

Desde la perspectiva de la aeronave, este protocolo se utiliza para planificar el procedimiento de llegada de acuerdo a sus preferencias¹. Desde la perspectiva del ATC,

¹Obviamente, en el caso de que la trayectoria de llegada se hubiese planificado con anterioridad (por ejemplo en la fase inicial del vuelo), la negociación aire-tierra no sería necesaria, salvo que durante la ejecución del vuelo se hubiesen producido nuevos incidentes que hiciera necesario actualizar los datos de la trayectoria de llegada.

4. *Diseño de los protocolos de negociación*

esta negociación forma parte de las tareas de planificación estratégica de un conjunto de trayectorias de llegada [Canino et al. 2008a].

- Protocolo de negociación aire-aire para modificación de la trayectoria .

El objeto de esta negociación consiste en modificar la secuencia de llegadas cuando surgen contingencias una vez que se ha iniciado la ejecución de la trayectoria negociada. La negociación aire-aire ilustra este procedimiento de carácter táctico en los casos de separación delegada en aeronaves [Canino et al. 2008b].

Ambos protocolos se consideran procesos automáticos realizados entre los sistemas de aeronaves y entre éstos y los sistemas de tierra². Sin embargo en su diseño se ha tenido en cuenta la posibilidad de intervención de pilotos y controladores de tráfico aéreo bien para supervisar la evolución del proceso o bien para participar en la toma de decisiones introduciendo preferencias y/o restricciones. Por tanto, el concepto de roles de los agentes hace referencia indistintamente a las responsabilidades asignadas tanto a los sistemas del agente como a su operador.

El diseño de los protocolos anteriores incluye la especificación de los siguientes elementos:

- El escenario operacional en el que se lleva a cabo la negociación. Este escenario está descrito por un conjunto de parámetros que definen el contexto físico y las restricciones espacio-temporales en las que se realiza la negociación.
- Los roles de los agentes que intervienen en la negociación y las reglas de encuentro que establecen los criterios para comenzar o finalizar la negociación, para elegir la solución, etc.
- Los protocolos de comunicación entre los agentes.
- Los procesos de toma de decisión de aeronaves y ATC. Estos procesos de toma de decisión se realizan de acuerdo al esquema de evaluación-generación de propuestas de los agentes negociadores.

Los parámetros del escenario operacional dependen de la extensión temporal del protocolo. Lógicamente, este rango temporal a su vez depende de las características del protocolo de comunicaciones y de los procesos de toma de decisión. Por esta razón, y con el fin de determinar los valores característicos de los parámetros del escenario operacional en el que se produce la planificación de las trayectorias de llegada, se ha analizado la extensión

²Recuérdese que uno de los principales objetivos de los procedimientos de navegación y control basados en el concepto TBO consiste en resolver situaciones que surjan dinámicamente mediante protocolos automatizados.

temporal del protocolo aire-tierra. Dicho análisis se realizó a partir de la simulación de los diversos escenarios de negociación caracterizados por los índices de aceptación de propuestas de aeronaves y de ATC.

Por último hay que resaltar la *evidente coincidencia entre los elementos que forman parte de los protocolos de negociación y los componentes esenciales de los procedimientos de vuelo o de control de tráfico*. De este modo, los procedimientos de navegación y de control de tráfico pueden ser modelados desde el punto de vista metodológico de *Prometheus* mediante protocolos y sus procesos asociados (perspectiva dinámica del sistema). A su vez, el diseño interno de los agentes a partir de dichos procesos (perspectiva estática o estructural) constituye una técnica de modelado de los sistemas de navegación y control de tráfico que son necesarios para llevar a cabo dichos procedimientos.

4.1. Protocolo de negociación aire-tierra

Como ya se ha señalado, el objeto de esta negociación es asignar trayectorias de llegada y aproximación a las aeronaves. Dichas trayectorias comienzan en un punto inicial de entrada y finalizan en el umbral de pista.

4.1.1. Escenario operacional

El escenario operacional propuesto para este protocolo está constituido por un conjunto de rutas de llegada y por un conjunto de áreas operacionales.

La estructura de rutas es similar a la de los recientes procedimientos de llegada de navegación de área (*Arrival RNAV*) [FAA 2005, FAA 2007]. En los procedimientos *Arrival RNAV* (figura 4.1), las actuales rutas de llegada *STARs*³ se extienden hasta superponerse sobre el circuito de tráfico del aeropuerto, eliminándose así el tramo habitual del procedimiento de aproximación que va desde el *IAF* (*Initial Approach Fix*) al *FAF* (*Final Approach Fix*).

Las áreas operacionales son regiones del espacio aéreo atravesadas por las rutas de llegada. Las regiones que forman parte de dicho escenario son las siguientes (ver figura 4.2): Área de aproximación, Área de llegadas y Área de acuerdos.

- *Área de aproximación*: es una región interna de espacio aéreo similar a la zona de aproximación en las operaciones de vuelo actuales (o comparable a la zona *TRACON* del sistema *CTAS*) [NASA 2009, Isaacson y Erzberge 1997]. Los límites de esta región están definidos por un radio de 25-50 *MN* alrededor del aeropuerto y una altitud de unos 10000-18000 pies. El *área de aproximación* tiene asignados diver-

³*STAR*: *Standard Terminal Arrival Route*

esos puntos de entrada que pueden establecerse de forma dinámica. Sus dimensiones obedecen a que en este área las aeronaves son configuradas para la aproximación y a que el rango de diferencia entre las velocidades operativas de aeronaves de distintas categorías es menor que fuera de ésta. Por lo tanto, en dicha región se presupone que las aeronaves ejecutarán la trayectoria de acuerdo a lo negociado previamente y sólo se producirán cambios en casos de contingencias no previstas que así lo exijan.

- *Área de llegadas*: corresponde al área en la que habitualmente se inicia la fase de descenso y donde las velocidades características de los distintos tipos de aeronave (reactores y turbo-hélices) pueden dar lugar a adelantamientos entre éstas. El *área de llegadas* está limitada horizontalmente por un radio que puede variar entre los 50 y 200 MN en función de las características del tráfico de llegada (por ejemplo los niveles de vuelo en crucero habituales del tráfico de llegada y la correspondiente distancia del punto de inicio de descenso respecto al aeropuerto). La entrada a este área se realiza a través de puntos de entrada específicos que se fijan de forma dinámica por el proveedor de servicios de recursos de espacio aéreo en función de la demanda de tráfico. Además en ella se podrán establecer rutas paralelas para separar los tráficos con distintas velocidades.
- *Área de acuerdos*: este área ha sido propuesta en esta Tesis para llevar a cabo la negociación de las trayectorias de llegada. Los límites externos de la misma se definen en términos de tiempo de llegada a los puntos de entrada al *área de llegadas*. Este tiempo debe considerar: (i) el tiempo requerido para la negociación, (ii) un tiempo equivalente al anterior en el que debe culminar cualquier otra negociación aire-tierra que se haya iniciado con anterioridad a la petición de trayectoria por parte de la aeronave y (iii) el tiempo requerido por las aeronaves para adaptar su estado a la trayectoria acordada.

Dentro del *área de acuerdos* hemos propuesto los siguientes tiempos e intervalos temporales (figura 4.3):

- *Tiempo Límite para Solicitar Trayectoria (TLST)*. Representa la frontera externa del *área de acuerdos*. Todas las aeronaves deberán enviar al ATC sus predicciones de trayectorias antes de alcanzar este punto. De no hacerlo, el ATC incluirá a la aeronave en el proceso de secuenciación y le asignará una trayectoria.
- *Segmento de Negociación (SN)*. Este segmento representa el intervalo temporal dentro del cual debe completarse la negociación aire-tierra. El punto inicial del SN (*PI-SN*) es usado por el ATC como la referencia de tiempo límite para la asignación inicial de la trayectoria a la aeronave. El punto final del SN (*PF-SN*) representa el

4. Diseño de los protocolos de negociación

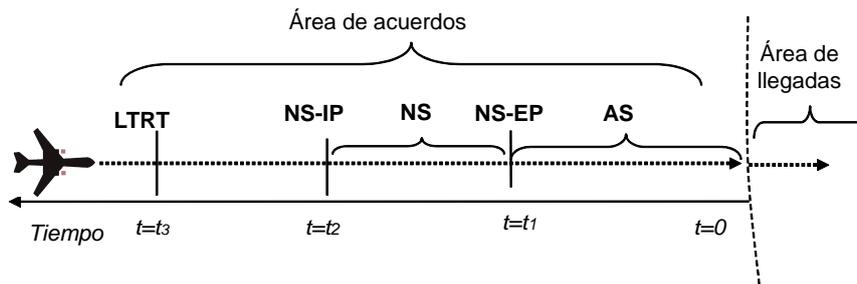


Figura 4.3: Sub-regiones del área de acuerdos

límite de tiempo para finalizar la negociación. Con el fin de evitar la superposición de negociación aire-tierra con diferentes grupos de aeronaves, la duración de este segmento debe ser igual o menor al tiempo de espera del grupo de aeronaves antes de iniciar la negociación; es decir, $t_2 - t_1 \leq t_3 - t_2$.

- *Segmento de Adaptación (SA)*. Este segmento está localizado a continuación del segmento de negociación y finaliza en el punto de entrada al área de llegadas. El segmento de adaptación se utiliza por la aeronave para modificar su velocidad con la finalidad de alcanzar el punto de entrada al área de llegadas en el instante especificado en la trayectoria 4D de llegada acordada. La duración temporal de este segmento es directamente proporcional a la variación longitudinal exigida a la aeronave respecto a su trayectoria 4D original e inversamente proporcional a la variación de su velocidad operacional establecida para cumplir con la nueva trayectoria. Considerando una desviación longitudinal máxima exigible respecto a la trayectoria original igual a la separación mínima entre dos aeronaves (es decir, $\Delta l = 5 \text{ MN}$) y una variación máxima de velocidad exigible de 20 Kts , entonces el tiempo requerido para lograr dicha desviación longitudinal es $\Delta t = \Delta l / \Delta v = 5/20 = 1/4 \text{ hora}$. Por tanto, teniendo en cuenta esta duración del segmento de adaptación y de acuerdo a las estimaciones sobre la duración del protocolo que se realiza en la sección 4.1.5, se ha establecido un perímetro temporal para *área de acuerdos* que oscila entre 20-75 minutos.

Por otra parte, aunque no es objeto de este apartado abordar la negociación de modificaciones en las trayectorias que se encuentren en fase de ejecución, hay que señalar que el escenario operacional descrito en los párrafos anteriores también es válido para llevar a cabo dichos procesos. La toma de decisiones automática para realizar estas acciones de control táctico es una cuestión no suficientemente resuelta actualmente. Algunos autores (por ejemplo [Robinson III et al. 1997]) han propuesto acciones tácticas basadas en aproximaciones de lógica difusa. Sin embargo, con el fin de minimizar el control táctico

en la zona de aproximación, se sugiere la necesidad de desarrollar nuevas estrategias por medio de un segundo proceso de negociación (*Negociación de Aproximación*) realizado antes de la llegada de la aeronave a la zona de aproximación.

En este caso, y de acuerdo a trabajos previos sobre la planificación dentro de la *zona de aproximación*, se podría incluir una nueva frontera de tiempo (*Horizonte de congelación* o *Freeze Horizon* [Erzberger 1995]). El horizonte de congelación establece un nuevo tiempo límite dentro del cual el control ATC podría iniciar una negociación tierra-aire con el fin de alterar los tiempos de llegadas programados (*STAs*) a los puntos de entrada del área de aproximación y/o a otros puntos internos de dicho área. Esta negociación de aproximación también podría ser necesaria en los casos en los que la aeronave proceda de un aeropuerto cercano y ubicado después del punto límite de solicitud de trayectoria.

4.1.2. Roles de agentes y reglas de encuentro

Los roles y las reglas de encuentro de los agentes se recogen en la secuencia de tareas que se describe a continuación.

Antes de iniciar la negociación, la aeronave debe definir su trayectoria preferente. En el cálculo de ésta se tendrá en cuenta la información más reciente sobre las condiciones meteorológicas y los datos del escenario operacional de llegada (rutas activas, puntos de entrada, TLST, etc.). Como ya se adelantó en la fase de especificación del sistema, esta información se puede obtener a partir de los servicios de meteorología aeronáutica y los servicios de recursos para la navegación aérea. La solicitud de autorización al ATC para llevar a cabo la trayectoria anterior deberá realizarse antes de que la aeronave alcance el punto límite TLST. El mensaje de solicitud deberá incorporar los datos de la trayectoria expresada como un continuo 4D, junto con las restricciones y los argumentos de dichas preferencias.

Por su parte, el ATC deberá responder a las distintas solicitudes realizadas por las aeronaves antes de que éstas alcancen el punto inicial del segmento temporal de negociación. El tipo de respuesta del ATC dependerá del cálculo que éste haga de la secuencia óptima de llegadas a partir de las peticiones anteriores. Si como consecuencia de este cálculo, distintas aeronaves deben modificar sus respectivas propuestas de trayectoria (por ejemplo alterando sus *ETAs*⁴ a distintos *waypoints* de la ruta para adaptarlos a los tiempos *STAs*⁵ definidos por la secuenciación óptima de llegada), el ATC propondrá soluciones alternativas a cada una de éstas. En general, estas soluciones se expresarán a través de un conjunto de restricciones *STA* (suponiendo las restricciones espaciales definidas por las rutas de llegada). También podrán incluir un conjunto de ventanas de tiempos asociadas

⁴ETA: Estimated Time of Arrival

⁵STA: Scheduled Time of Arrival

4. Diseño de los protocolos de negociación

a cada *STA*.

Las alternativas del ATC serán evaluadas por la aeronave a los efectos de determinar si ésta es operacionalmente aceptable o mejorable. En caso afirmativo, la aeronave aceptará. En caso contrario, la aeronave enviará una segunda propuesta que volverá a ser negociada. Estas contrapropuestas serán nuevamente evaluadas por el ATC, el cual aceptará aquellas que cumplan con las restricciones de trayectorias alternativas o sugerirá, de forma provisional, una nueva trayectoria. La provisionalidad de estas propuestas del ATC se debe a que las mismas se realizan bajo la suposición de que todas las aeronaves las aceptarán.

Si esta última propuesta del ATC no es aceptada por alguna aeronave, ésta deberá ejecutar una trayectoria sujeta a las restricciones impuestas en la primera propuesta del ATC, salvo que en la última propuesta se hayan incluido restricciones más relajadas para este caso de no aceptación.

Finalmente, el ATC evalúa los mensajes de respuestas de aeronaves relativos al rechazo o la aceptación de su última propuesta. De acuerdo a estas respuestas, el ATC confirmará o denegará las propuestas que hayan sido aceptadas por las aeronaves en esta ronda de negociaciones.

4.1.3. Protocolo de comunicaciones

El protocolo de comunicación que corresponde a la secuencia de tareas descrita en la sección anterior se muestra en el diagrama AUML de la figura 4.4. En el gráfico del protocolo se ha utilizado la notación anglosajona con el fin de ilustrar el proceso de comunicación basado en las especificaciones FIPA-ACL.

Junto a este protocolo se han representado los módulos que realizan los cálculos y evaluaciones a partir de los cuales los agentes toman decisiones. Los cálculos y evaluaciones a bordo están representados por los módulos que se encuentran a la izquierda de la línea de vida del agente aeronave. Del mismo modo, los cálculos realizados por el agente ATC están representados en la parte derecha de su línea de vida. A la derecha del proceso de cálculo del ATC se encuentra otra línea de vida que corresponde a otros agentes aeronaves que intervienen igualmente en dicha negociación.

Los actos comunicativos entre agentes se basan en las especificaciones FIPA-ACL. En este caso, la solicitud de información sobre meteorología y recursos de espacio aéreo, realizada por las aeronaves para calcular su trayectoria inicial antes de comenzar la negociación, puede realizarse mediante protocolos de comunicación FIPA (protocolo *FIPA-Request-Interaction-Protocol*). Por lo tanto no es necesario un diseño específico de estos protocolos. En cambio el protocolo de negociación de trayectoria requiere un diseño *ad hoc* a partir de los mensajes FIPA-ACL.

El protocolo de negociación de llegada consta de dos fases, cada una de las cuales contiene una ronda de negociación iniciada por las aeronaves.

La primera de ellas comienza con las solicitudes de trayectoria realizadas por las aeronaves antes de alcanzar el TLST y termina con la aceptación de las posibles contrapropuestas que realice el ATC ante las solicitudes de las aeronaves.

La segunda fase se lleva a cabo cuando existan aeronaves que deseen mejorar la propuesta realizada por el agente ATC en la fase anterior. La finalización de esta fase es ligeramente diferente a la anterior en la medida en que las aeronaves no podrán plantear nuevas contrapropuestas al ATC.

En cada una estas fases se producen los siguientes mensajes:

- Fase 1: Antes de alcanzar el TLST

En esta fase la aeronave calcula su trayectoria preferente de usuario, Tr_0 . Como

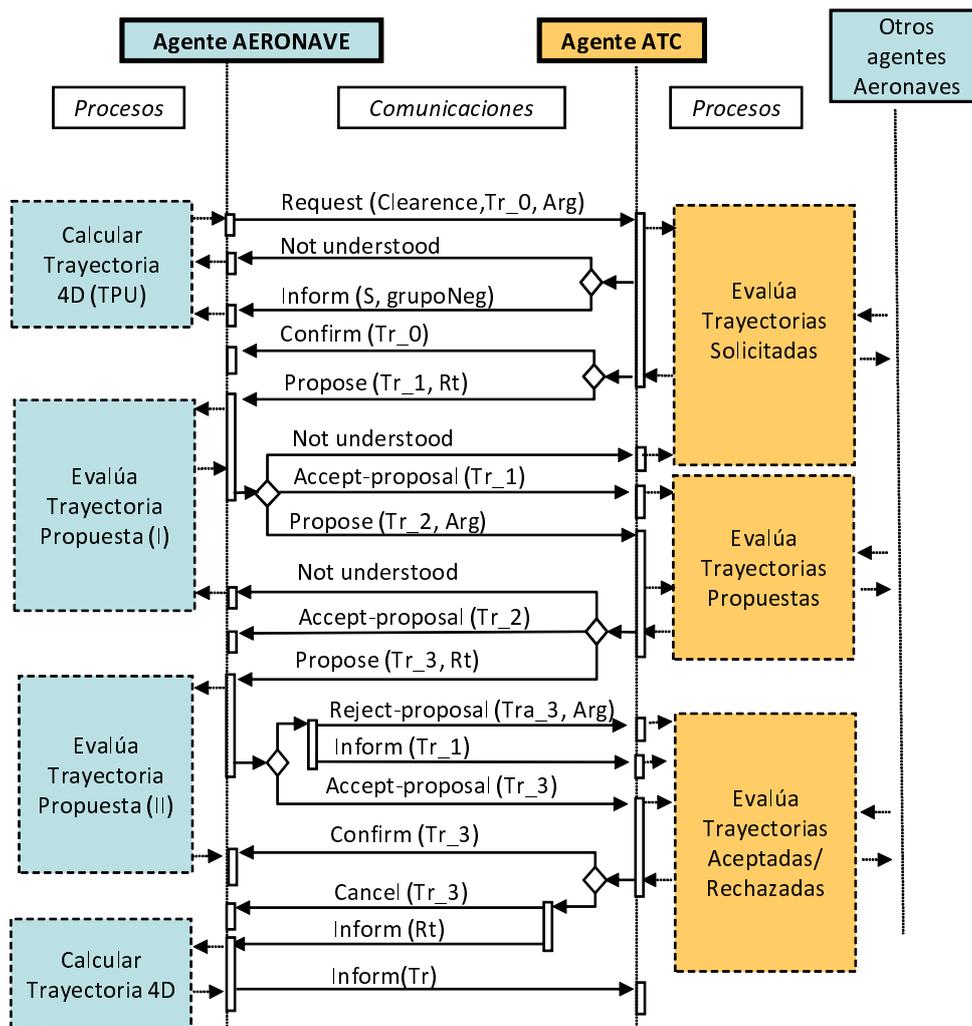


Figura 4.4: Protocolo de comunicación aire-tierra

4. Diseño de los protocolos de negociación

ya se comentó, para ello utiliza la información actualizada sobre las condiciones meteorológicas y el escenario operacional. Esta información se obtiene a través de protocolos de comunicación previos con los agentes de Meteorología y de Recursos de Espacio Aéreo (véase figura 3.12 de la página 161).

La negociación comienza cuando cada aeronave solicita autorización para implementar su TPU ($Request(Clearance, Tr_0, Arg)$).

El agente ATC recibe los mensajes de solicitud de trayectoria procedentes de distintas aeronaves, confirma su recepción y los procesa periódicamente por lotes. Esta confirmación se realiza a través de un mensaje tipo $Inform()$. Igualmente en aquellos casos en que un agente envíe un mensaje solicitando o proponiendo una trayectoria, y el contenido de dicha trayectoria no pueda ser analizado por los sistemas del otro agente, éste último genera el mensaje *Not-understood* con el fin de que el mensaje inicial sea corregido y reenviado.

A partir de este conjunto de solicitudes, el ATC comprueba si las trayectorias están libres de conflicto entre sí. Aquellas trayectorias que no presenten conflicto serán contestadas con el mensaje $Confirm(Tr_0)$. En cambio las que requieran modificaciones serán contestadas mediante una nueva propuesta de trayectoria que incluye además las restricciones, Rt , que debe cumplir ($Propose(Tr_1, Rt)$).

En el caso de que la aeronave esté de acuerdo con la trayectoria Tr_1 ésta envía el correspondiente mensaje de aceptación ($Accept-proposal(Tr_1)$) y el proceso de negociación finaliza para dicha aeronave. Aquellas aeronaves que deseen mejorar las propuestas del ATC, iniciarán la segunda fase del protocolo negociación.

■ Fase 2: Llamada para propuesta

Esta fase comienza con una propuesta de aeronave ($Propose(Tr_2, arg)$) para lograr una trayectoria mejor a la ofrecida por el ATC en la fase anterior.

La respuesta del ATC a dicha propuesta puede consistir bien en la aceptación de la trayectoria Tr_2 (finalizando así el proceso para la aeronave en cuestión) o en una propuesta alternativa Tr_3 sujeta a nuevas restricciones, Rt . Esta nueva trayectoria puede ser rechazada ($Reject(Tr_3)$) o aceptada ($Accept(Tr_3)$) por la aeronave. Las aeronaves que rechacen la propuesta del ATC deberán además añadir un nuevo mensaje para informar al ATC de la trayectoria que escogen de acuerdo a la propuesta inicial de ATC y a las restricciones más actualizadas ($Inform(Tr_1, Rt)$). Por las razones ya apuntadas en la sección 4.1.2, las aeronaves que acepten la propuesta de ATC deberán esperar un mensaje de confirmación ($Confirm(Tr_3)$) o de cancelación ($Cancel(Tr_3, Rt)$) de la misma. El mensaje de cancelación también incluye

	Puntos de salida del protocolo	Mensaje de fin de negociación	Agente emisor del mensaje
Fase 1	0	<i>Confirm (Tr0)</i>	ATC
	1	<i>Accept (Tr1)</i>	Aeronave
Fase 2	2	<i>Accept (Tr2)</i>	Aeronave
	3	<i>Reject (Tr3)</i>	Aeronave
	4	<i>Confirm (Tr3)</i>	ATC
	5	<i>Inform (Tr)</i>	Aeronave

Tabla 4.1: Puntos de salida del protocolo de negociación

información sobre las restricciones actualizadas a partir de las cuales las aeronaves podrán calcular sus trayectorias. En este caso, las aeronaves terminan esta segunda fase de negociación enviando al ATC un mensaje *Inform(Tr)* en el cual especifican la trayectoria finalmente escogida por éstas de acuerdo a las últimas restricciones recibidas.

Desde la perspectiva de cada aeronave, el protocolo anterior presenta seis posibles puntos de salida en los que se puede concluir la negociación. Estos puntos de salida del protocolo se muestran en la tabla 4.1 enumerados del 0 al 5 y vinculados al tipo de mensaje con el que se da por concluida la negociación entre ATC y aeronave. Desde la perspectiva del ATC el protocolo anterior finaliza cuando haya completado la negociación con todas las aeronaves que participan en la misma.

4.1.4. Procesos

Los procesos de los agentes se representan mediante diagramas de flujo que vinculan los mensajes del protocolo con los cálculos internos destinados a evaluar las propuestas y a generar contrapropuestas⁶. Sobre este diagrama también se muestran los diferentes estados que se han establecido en esta Tesis para describir las distintas fases del proceso de negociación tanto desde la perspectiva del agente ATC como desde la de la aeronave. *Los estados de negociación tienen la finalidad de hacer compatible la automatización de los procesos de negociación con la necesaria comprensión de su evolución por parte de pilotos y controladores durante las tareas de monitorización y/o de toma de decisiones.*

La notación empleada en los diagramas de procesos está representada en la figura 4.5.

⁶De acuerdo a las recomendaciones de la metodología *Prometheus*, la notación empleada en los esquemas de proceso es ligeramente diferente a la notación UML de forma que, en lugar de centrarse en las actividades lo hace en los mensajes de comunicación.

4. Diseño de los protocolos de negociación

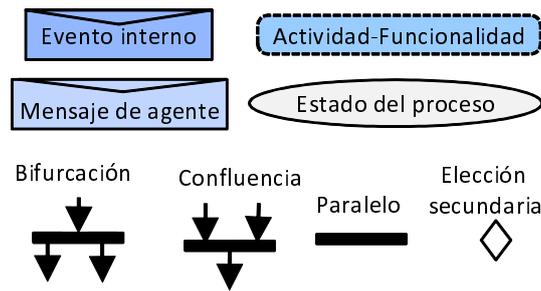


Figura 4.5: Notación empleada en la especificación de procesos

4.1.4.1. Procesos del agente ATC

El diagrama de flujo del proceso del agente ATC durante la negociación aire-tierra está representado en la figura 4.6. En dicho diagrama se muestran los mensajes principales de la negociación, las funcionalidades relativas a la evaluación de trayectorias utilizadas por el agente ATC en la toma de decisiones y los estados de la negociación.

Por razones de claridad se omite aquella parte del proceso que revisa y corrige el contenido de los mensajes que han sido contestados con un mensaje ACL *Not-understood*. Además, y para distinguir los mensajes enviados por el ATC de aquellos que proceden de las aeronaves, éstos últimos han sido etiquetados con la palabra “*Aero*”. Asimismo, y de acuerdo a la notación *Prometheus*, los eventos que disparan el proceso⁷ se representan mediante mensajes internos mostrados en un color más intenso que los mensajes de comunicación.

Las variables a considerar durante el proceso de negociación de TPUs de llegada son las siguientes:

- *S*: número de solicitudes de TPUs recibidas y pendientes de negociación en un instante dado. Las solicitudes de aeronave realizadas a través de mensajes *Request(Clearance, Tr_0, Arg)* son almacenadas a medida que se reciben.
- *N*: número de solicitudes que son negociadas conjuntamente en un único proceso. El proceso comienza con el evento *Calcula secuencia*.
- *G*: número de orden que tiene asignado el proceso de negociación. Las solicitudes de aeronaves que forman parte de un proceso posterior al actual son almacenadas por la función *Almacena solicitud TPU*. La inicialización del número de proceso se efectúa a través de un evento específico de inicio de actividad del ATC (*Inicia ATC*).

⁷Los diferentes eventos que disparan los procesos serán considerados durante la fase de diseño detallado de los agentes en el siguiente capítulo. En esta fase del diseño se contempla la generación de dichos eventos bien de forma automática o bien como resultado de percepciones procedentes del interfaz de usuario de la tripulación. En este último caso, las percepciones son traducidas a mensajes internos.

- $A0-A3$: Número de mensajes de aceptación de las trayectorias Tr_0 a Tr_3 respectivamente. Por tanto $A0$ y $A2$ corresponden a números de mensajes de aceptación de la aeronave mientras que $A1$ y $A3$ se refieren al número de mensajes de aceptación realizados por el ATC. Además $A'3$ representa el número de mensajes que confirman definitivamente la trayectoria Tr_3 .
- $P1-P3$: Número de mensajes que contienen propuestas de trayectorias Tr_0 a Tr_3 respectivamente.
- R : Número de mensajes de aeronave que rechazan la propuesta *Proposal* (Tr_3).
- C : Número de mensajes de ATC que cancelan una propuesta anterior Tr_3 .
- I : Número de mensajes de aeronave que informan de la trayectoria escogida por ésta cuando una propuesta de trayectoria Tr_3 de ATC haya sido cancelada.

El primer estado de la negociación (*Generando secuencia*) corresponde al período de tiempo en el que se evalúa un grupo de trayectorias Tr_0 . Hay que recordar que el proceso de evaluación se dispara cada cierto período, de manera que en cada período se evalúa el grupo de solicitudes recibidas durante el mismo. Finalizado el período de recepción de solicitudes se pasa al estado *Comunicando secuencia*. Dicho estado permanece hasta que el total de solicitudes N sean contestadas por el ATC ($A0+P1=N$). Alcanzado dicho valor es posible la transición al estado *Fin de Negociación* (si todas las solicitudes iniciales han sido aceptadas) o al estado *Esperando respuesta a Tr_1* (cuando el ATC haya realizado alguna propuesta en este sentido). El último estado se mantendrá hasta que la suma del número de mensajes, $A1$, del tipo *Accept-proposal* (Tr_1) y el número de mensajes, $P2$, del tipo *Propose* (Tr_2) se corresponda con el número, $P1$, de propuestas de Tr_1 realizadas por la aeronave.

Los mecanismos de transición hacia el resto de las fases de negociación en función de las propuestas del ATC y de las aeronaves son evidentes mediante un razonamiento similar al anterior.

Por otra parte, tanto en el esquema que describe el protocolo de negociación (figura 4.4) como en el que describe el proceso interno del agente ATC (figura 4.6), se señalan tres módulos diferentes para la evaluación y la generación de contrapropuestas durante el proceso de toma de decisiones del ATC en las distintas fases de la negociación. Los diagramas de flujo de cada uno de estos procesos están representados en las figuras 4.7 a 4.9.

4. Diseño de los protocolos de negociación

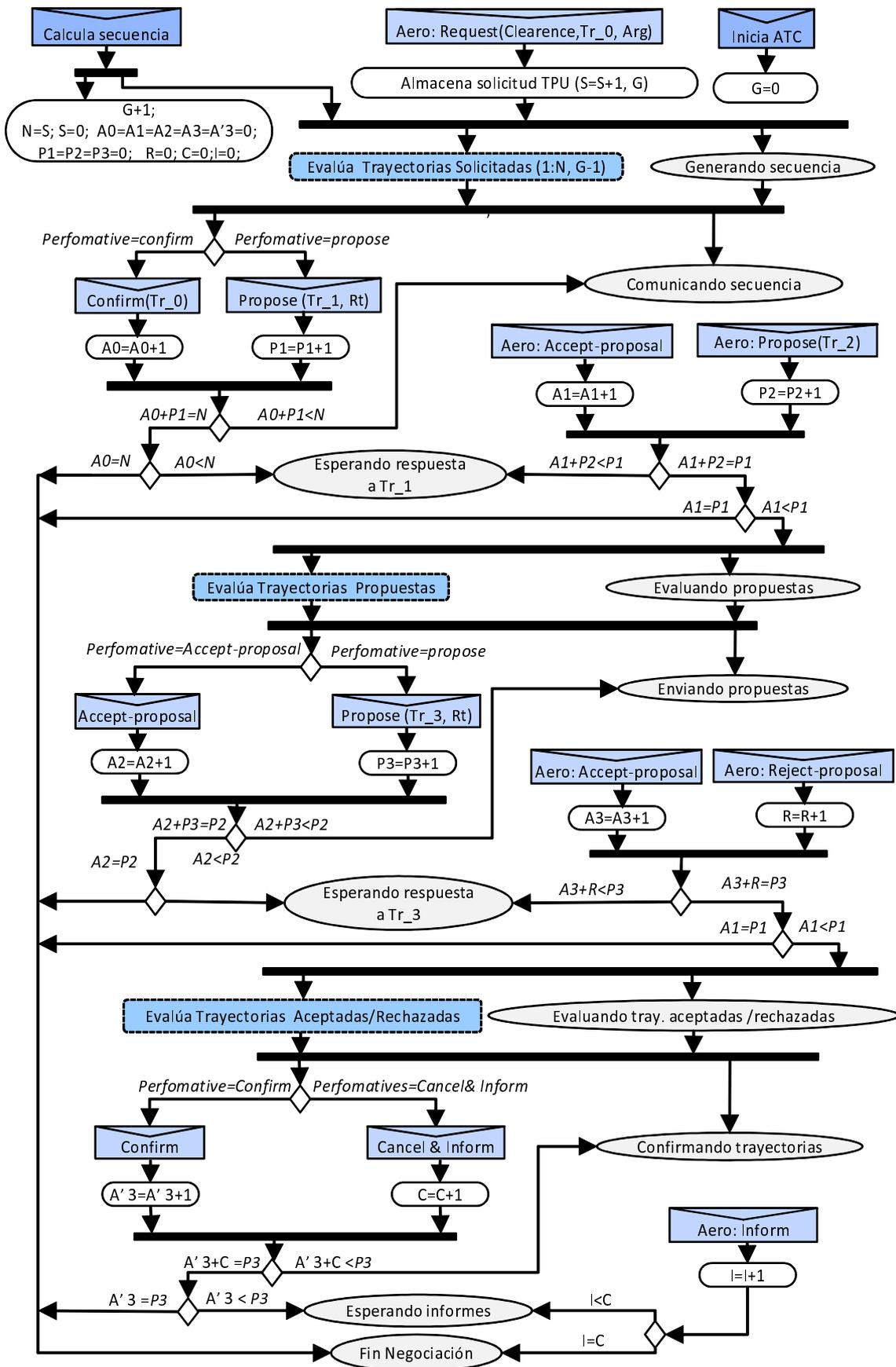


Figura 4.6: Diagrama de procesos y estados del agente ATC

La figura 4.7 muestra el diagrama de flujo del proceso de *evaluación de trayectorias* solicitadas por las aeronaves. Según este esquema, cada una de las propuestas iniciales recibidas de las aeronaves, Tr_0 , son aceptadas si no presentan conflictos entre ellas. Cuando se presenta algún conflicto, éste se resuelve mediante la generación de una contrapropuesta de trayectoria Tr_1 para cada aeronave. Dicha propuesta viene especificada a través de nuevas restricciones espacio-temporales, Rt_1 que eviten dicho conflicto. Las restricciones son obtenidas por el planificador de llegadas de aeronaves, el cual proporciona STA para distintos puntos de la ruta de llegada y aproximación (principalmente $STAs$ a los puntos de entrada al área de llegadas y de aproximación así como al punto final de aproximación y al umbral de pista).

La figura 4.8 ilustra el proceso de toma de decisión basado en la evaluación de trayectorias Tr_2 propuestas por las aeronaves. De acuerdo al esquema de la figura, las trayectorias Tr_2 de las aeronaves son inicialmente comparadas con las trayectorias Tr_1 aceptadas en la primera fase. Las trayectorias Tr_2 que presenten conflicto serán rechazadas excepto que el ATC encuentre una solución libre de conflicto a partir de las tolerancias expresadas en el argumento de Tr_2 .

Por otra parte, y de acuerdo al protocolo de comunicación planteado en la sección 4.1.3 (figura 4.4) la contrapropuesta Tr_3 del ATC referida a la propuesta Tr_2 , será evaluada por la aeronave mediante el módulo *evaluar trayectorias propuestas_ (I)*. Este módulo, que será descrito en la siguiente sección, produce una aceptación o un rechazo de acuerdo a las prioridades operacionales de la aeronave. Como se deduce del protocolo de negociación, la aeronave rechazará aquellas propuestas Tr_3 que no muestren ninguna ventaja respecto a una propuesta Tr_1 . Además, las trayectorias Tr_3 aceptadas por las aeronaves deberán ser confirmadas previamente por el ATC antes de ser ejecutadas. Como ya se comentó, esta confirmación del ATC es requerida para asegurar que dichas trayectorias son compatibles con las trayectorias de las aeronaves que hayan rechazado la propuesta Tr_3 del ATC. En la figura 4.9 se ilustra el proceso que lleva a cabo el ATC para analizar posibles conflictos entre las trayectorias Tr_3 aceptadas por las aeronaves y las trayectorias Tr_1 que realizarán aquellas que rechacen Tr_3 . A través de un mensaje $Confirm(Tr_3)$ se confirmarán las trayectorias Tr_3 aceptadas que no presenten conflicto y las trayectorias Tr_1 escogidas por las aeronaves. También se confirmarán aquellas trayectorias que presenten conflictos y que tienen solución dentro del conjunto de restricciones incluidas en la propuesta previa del ATC. En cambio las trayectorias Tr_3 aceptadas por las aeronaves pero que plantean conflictos que no tienen solución bajo las restricciones anteriores serán desautorizadas mediante un mensaje tipo $Cancel (Tr_3)$.

4. Diseño de los protocolos de negociación

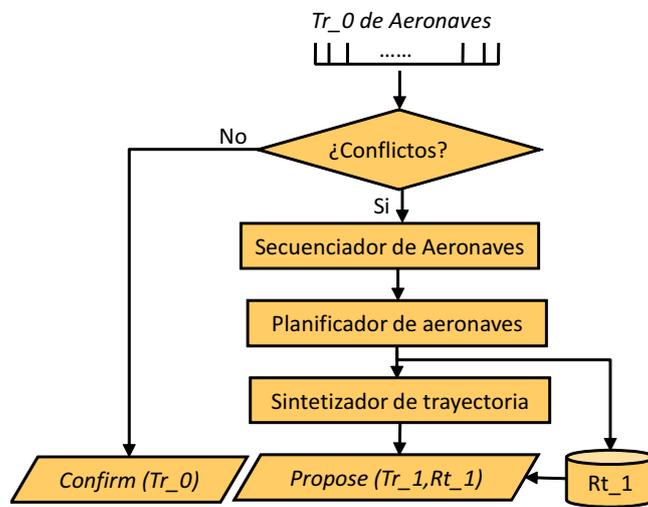


Figura 4.7: Evaluación de solicitudes de aeronaves

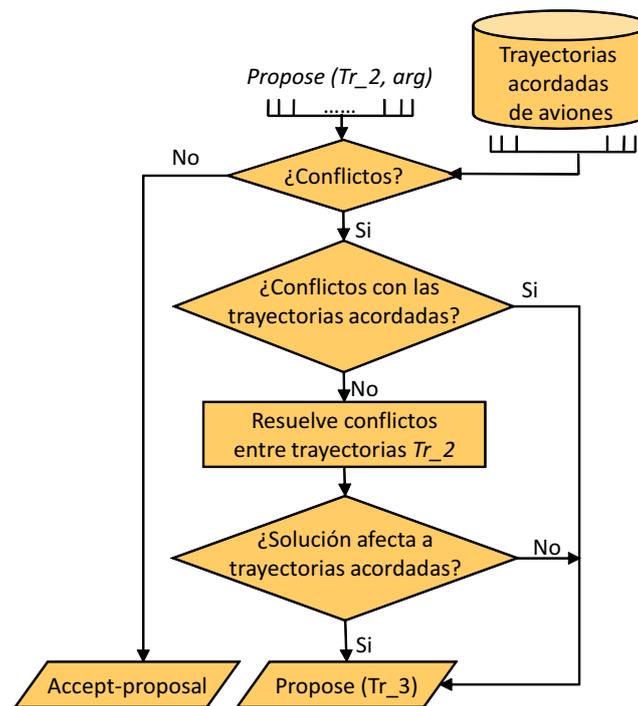


Figura 4.8: Evaluación de propuestas de aeronaves

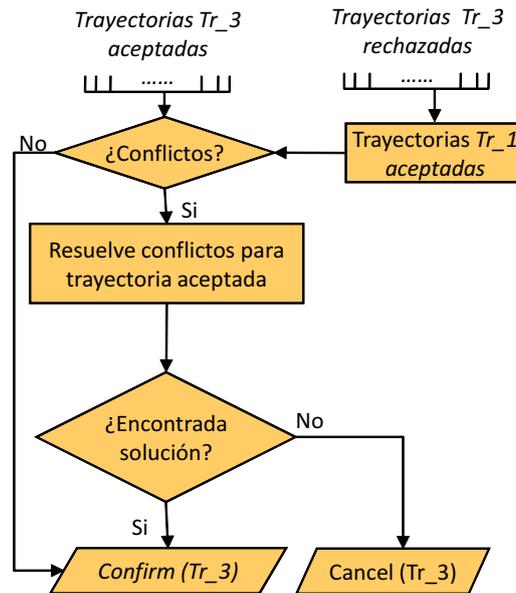


Figura 4.9: Evaluación de las trayectorias aceptadas y rechazadas por las aeronaves

4.1.4.2. Procesos del agente aeronave

El diagrama que recoge los procesos internos del agente aeronave se muestra en la figura 4.10.

El proceso comienza con el cálculo de la trayectoria preferente y es activado por un evento propio de la aeronave (evento *planifica trayectoria*). Asociado al cálculo de TPU se define el estado *calculando TPU*.

Una vez calculada la trayectoria, el proceso pasa al estado *preparado para negociar*. A partir de este estado la negociación comienza cuando se recibe el evento *inicia negociación*. Ello da lugar al envío del mensaje de solicitud de autorización para TPU y la consiguiente transición al estado *esperando autorización TPU*. Desde este último estado se pasa al estado *autorizada trayectoria* cada vez que se recibe un mensaje en tal sentido del ATC. En cambio si el mensaje procedente del ATC consiste en una propuesta diferente se transita al estado *evaluación de propuesta*. Si la propuesta es aceptada por la aeronave y se trata de la primera realizada por el ATC, la aeronave envía el mensaje de aceptación de trayectoria y evoluciona al estado *autorizada trayectoria*. En cambio si la propuesta aceptada corresponde a una segunda o sucesivas propuestas, el proceso de negociación debe cambiar al estado *esperando confirmación*. A partir de este estado si el siguiente mensaje recibido del ATC confirma dicha propuesta se transitará al estado *autorizada trayectoria*. Por el contrario, si el mensaje recibido cancela la propuesta anterior, la aeronave deberá remitirse a la primera propuesta realizada por el ATC (o a la propuesta que más le favorezca en el caso de que el ATC haya ofrecido un conjunto de soluciones viables en su

4. Diseño de los protocolos de negociación

primera propuesta).

Asimismo, cuando una propuesta de ATC es respondida con una contrapropuesta, la aeronave transita inicialmente al estado *generando contrapropuesta* y posteriormente al estado *esperando autorización* para propuesta.

Tanto el esquema que describe el protocolo de negociación (figura 4.4) como el que describe el proceso interno del agente (figura 4.10), se distinguen dos módulos básicos para la toma de decisiones. El primero de ellos está representado en la figura 4.11) y es el encargado de evaluar la trayectoria Tr_1 asignada por el ATC en la primera fase del protocolo de negociación. El segundo (figura 4.12) evalúa las propuestas realizadas por el ATC en la segunda fase del protocolo.

La evaluación presentada en la figura 4.11 tiene por objeto determinar si la trayectoria Tr_1 del ATC es acorde con la trayectoria preferente de aeronave, Tr_0 , o con las prioridades operacionales de a bordo (por ejemplo *Cost-Index*, puntualidad, etc.)⁸. En caso afirmativo, la aeronave acepta la Tr_1 . En caso contrario, calcula una nueva trayectoria preferente para iniciar una segunda ronda de negociación.

En la figura 4.12 se ilustra el proceso de toma de decisión de la aeronave para aceptar o rechazar la contrapropuesta Tr_3 del ATC. Si esta trayectoria corresponde a la solicitada por la aeronave (Tr_2) o mejora la propuesta Tr_1 entonces es elegida. En caso contrario es rechazada y, como ya se explicó durante la descripción del protocolo, la aeronave realizará una trayectoria de acuerdo a las restricciones asociadas a la propuestas Tr_1 .

⁸Por simplificación no se describirán los casos en que la trayectoria no es operacionalmente asumible y por tanto es requerida una propuesta viable.

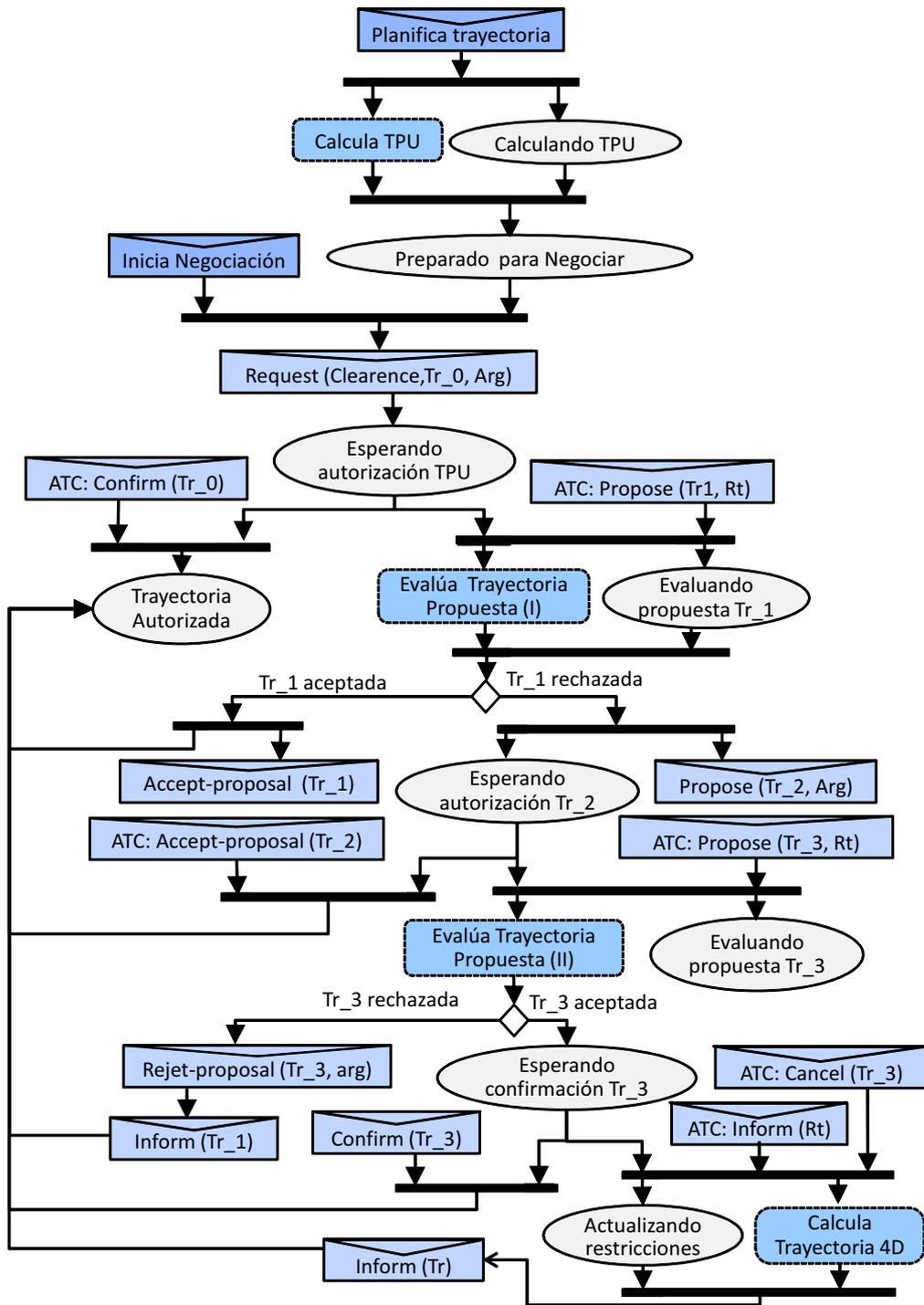


Figura 4.10: Diagrama general de procesos en el agente Aeronave

4. Diseño de los protocolos de negociación

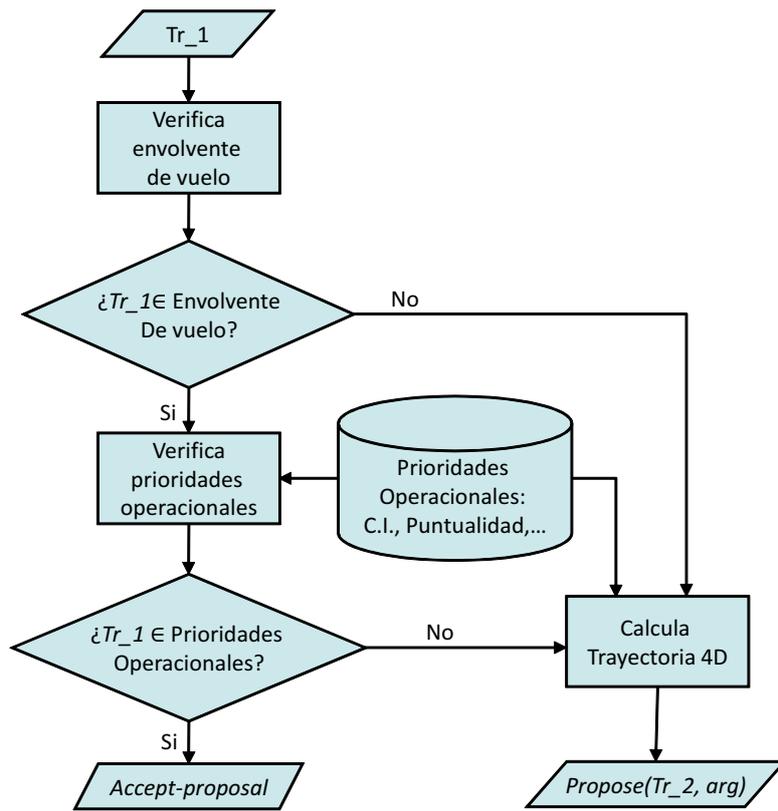


Figura 4.11: Evaluación de propuesta de ATC (I)

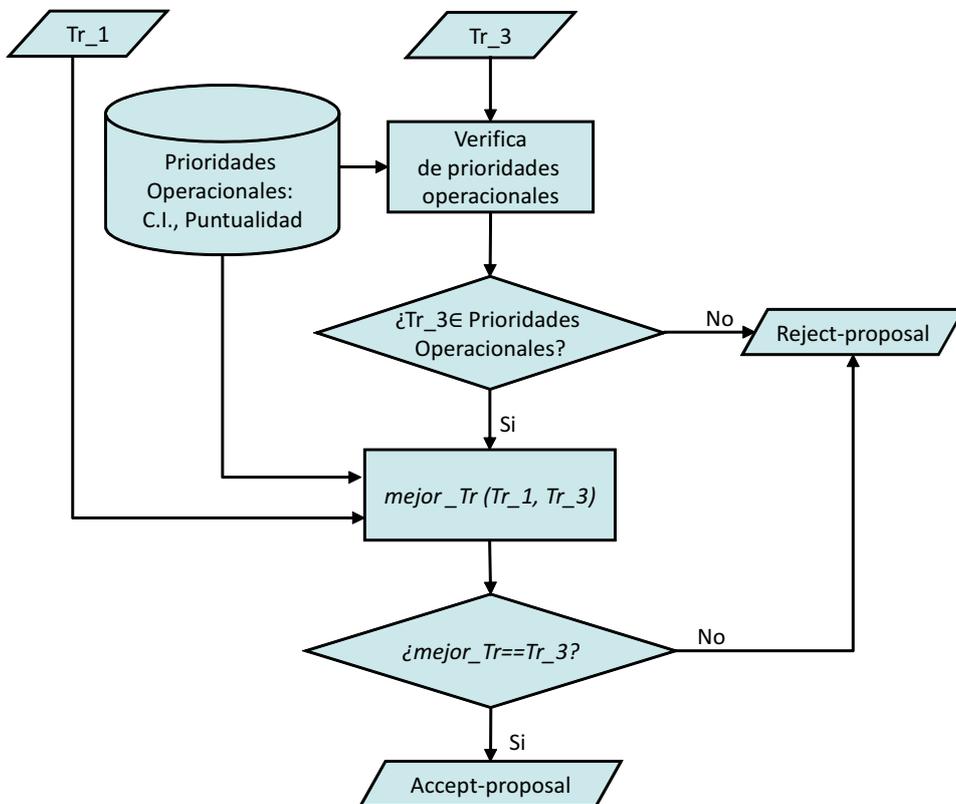


Figura 4.12: Evaluación de propuesta de ATC (II)

4.1.5. Análisis de la duración del segmento de negociación

La especificación del intervalo temporal característico del *área de acuerdos* depende principalmente de la duración del segmento de negociación. A su vez, la duración de este segmento depende de los factores siguientes: (i) el tiempo de respuesta, t_e , de los evaluadores de aeronaves y ATC y (ii) la capacidad del ATC y de las aeronaves para flexibilizar sus objetivos y aceptar sus mutuas propuestas con la consiguiente disminución de rondas de negociación.

En un proceso automatizado como éste, el tiempo de cómputo de los evaluadores se reduce fundamentalmente al tiempo de máquina requerido para evaluar propuestas y generar contrapropuestas. Sin embargo, este tiempo podría extenderse con el fin de contemplar la incorporación del operador (piloto y/o controlador) en el proceso toma de decisiones. En este caso las tareas asignadas a los operadores consisten en la selección de propuestas a partir de un conjunto priorizado de soluciones aportadas por el sistema evaluador. También se podrá añadir al tiempo de evaluación un tiempo específico de retraso en la comunicación, t_d , debido a fallos de recepción.

La capacidad del ATC y de las aeronaves para flexibilizar sus objetivos puede representarse mediante un *índice de aceptación de propuestas*, i_a , que se traduce en el número de propuestas medio que es capaz de aceptar un sistema evaluador de trayectorias en relación al número de propuestas recibidas.

En el caso del control ATC proporciona una medida de las restricciones impuestas a las aeronaves. Estas restricciones dependerán principalmente de la densidad de tráfico así como de otras condiciones del espacio aéreo (meteorología, capacidad de admisión del aeropuerto, etc). Así un índice de aceptación bajo indica un alto grado de restricciones de tráfico aéreo mientras que un índice de aceptación alto obedece a un bajo porcentaje de dichas restricciones.

En el caso de los evaluadores de trayectoria de aeronave, este índice mide el grado de optimización de trayectorias requerido por las aeronaves frente a las restricciones definidas en las propuestas del ATC. Dicho índice depende de la capacidad de la aeronave para alterar sus trayectorias preferentes de usuario a partir de las propuestas realizadas por el ATC. Considerando que se trata de operaciones de llegada, en las que prevalece el parámetro de tiempo de llegada frente al parámetro de consumo, un índice de aceptación bajo implica que las aeronaves requieren optimizar su trayectoria cumpliendo con un mínimo retraso posible. Por el contrario, un índice de aceptación alto indica que las restricciones ATC no suponen una variación sustancial de su trayectoria y/o que las aeronaves tienen mayor margen para flexibilizar su tiempo de llegada al aeropuerto.

El proceso de negociación global aire-tierra finaliza cuando el ATC haya concluido la negociación con todas y cada una de las aeronaves que participan en la misma. Además,

4. Diseño de los protocolos de negociación

y tal y como se indicó en la sección 4.1.3, en una negociación bilateral entre una aeronave y el ATC existen seis puntos posibles de salida de la negociación.

Por tanto, una vez conocido el tiempo medio de respuesta de los evaluadores, resulta útil estimar el previsible rango temporal del segmento de negociación en función los índices de aceptación de los evaluadores de aeronave y ATC. De este modo, si el agente ATC dispone con antelación de la información relativa a los índices de aceptación de las aeronaves, éste podría establecer de forma dinámica el perímetro temporal del *área de acuerdos*⁹, sin necesidad de apoyarse en la opción más conservadora que presupone que el protocolo acabará cuando agote su última etapa.

El análisis del rango temporal del segmento de negociación y del flujo de comunicaciones aire-tierra en función del índice de aceptación de los evaluadores que se describe a continuación, se apoya en una simulación *Monte-Carlo* del protocolo presentado en la sección 4.1.3.

En dicha simulación, el tiempo de evaluación y de retrasos debidos a fallos de comunicación se han definido estadísticamente de acuerdo a las consideraciones que más adelante se indican. El número de iteraciones para una determinada combinación de índices de aceptación se ha establecido en 1000. Este valor recoge el número de negociaciones que se pudieran producir a lo largo de una semana considerando un régimen máximo de seis negociaciones/hora (es decir, 1 negociación cada 10 minutos). De esta manera, la simulación anterior se ha ejecutado para diferentes combinaciones de los valores del índice de aceptación con el fin de cubrir todos los posibles casos respecto a la flexibilidad de los objetivos de aeronaves y ATC.

4.1.5.1. Datos de entrada: generación de mensajes de solicitud y caracterización de evaluadores

Para cada combinación de índices de aceptación se lleva a cabo una generación inicial de mensajes de solicitud de trayectoria. Estos mensajes se generan de forma aleatoria de acuerdo a una distribución probabilística de *Poisson* con una frecuencia media de llegadas, λ , por segundo. La frecuencia de llegadas está limitada por la capacidad del aeropuerto, la cual depende del número de pistas y de la posibilidad de efectuar operaciones en pistas paralelas. Considerando una mínima separación de dos minutos entre aeronaves, la capacidad máxima de operaciones de llegada para un aeropuerto oscila entre $C_{max} = 30$ llegadas/hora para una única pista en servicio y $C_{max} = 60$ llegadas/hora si se pueden

⁹Esta estimación puede realizarla el ATC y enviarla al agente Proveedor de Recursos de Espacio Aéreo para que la difunda, o bien puede llevarla cabo este último agente a partir de la información procedente del ATC y de las aeronaves.

efectuar aproximaciones paralelas¹⁰. Tomando este último valor de capacidad, el ATC recibe mensajes con una frecuencia (máxima) $\lambda = \frac{C_{max}}{3600} = \frac{1}{60}$ mensajes/segundo durante cada período de recepción de solicitudes de trayectoria, t_r .

El tiempo de evaluación de cada uno de los evaluadores de ATC y de aeronave viene dado por $t_{e,i}$ (con subíndice $i=0, 1, 2, 3, 4$ según se trate de evaluación de propuestas de tipo $Tr0, Tr1, Tr2, Tr3$ o de la evaluación del ATC para confirmar/cancelar anteriores propuestas $Tr3$). Dichos tiempos de evaluación se han generado de forma aleatoria de acuerdo a la distribución normal con parámetros $(\bar{t}_{e,i}, \sigma_{e,i})$ y se han truncado dichos valores de manera que $t_{e,i} \in [\bar{t}_{e,i} - \sigma_{e,i}, \bar{t}_{e,i} + \sigma_{e,i}]$. Como ya se ha indicado, el tiempo de evaluación se refiere tanto al tiempo de cómputo requerido por el sistema para evaluar propuestas y generar (si fuera necesario) contrapropuestas, como al tiempo requerido por el operador humano para intervenir en la selección manual de propuestas. Para estimar este último tiempo se han tomado como referencia los datos experimentales recogidos en [Janic 2000] en los que se presenta el tiempo medio de ejecución de diversas tareas del control del tráfico aéreo de llegada: transferencia de tráfico, monitorización del tráfico descendente, vectorización radar para establecer la trayectorias de aproximación de las aeronaves, instrucciones mientras las aeronaves realizan esperas y detección y resolución de conflictos. Entre estas tareas, las que mayor tiempo requieren corresponden a la toma de decisión respecto a un determinado conflicto (60 segundos) y a la acciones para su resolución (55 segundos).

Aunque en nuestro caso, las acciones del controlador se limitan a la elección entre un conjunto de propuestas calculadas automáticamente, se han considerado los valores anteriores para establecer, tanto para la aeronave como para el ATC, el valor medio y la desviación típica del tiempo de evaluación en $\bar{t}_{e,i} = 120$ segundos y $\sigma_{e,i} = 30$ segundos respectivamente. De manera similar también se ha establecido el tiempo de respuesta de las aeronaves para informar sobre la trayectoria finalmente escogida cuando el ATC haya cancelado la propuesta realizada con anterioridad. En este caso, el tiempo transcurrido entre el mensaje de cancelación de ATC y el mensaje de información de aeronave, viene dado por $\bar{t}_{e,5} = 60$ y $\sigma_{e,5} = 15$ segundos, truncándose los valores que caen fuera del intervalo $t_{e,5} \in [\bar{t}_{e5} - \sigma_{e5}, \bar{t}_{e5} + \sigma_{e5}]$.

Por otro lado, el tiempo de retraso, t_d , debido a fallos de comunicaciones que requieren el reenvío mensajes con *performative Failure/Not Understand*, se ha modelado de acuerdo a un índice de fallos de transmisión, i_f que representa la probabilidad de fallo de un acto comunicativo para el peor caso. De este modo, asignando a cada comunicación una

¹⁰No siempre es factible la separación mínima de dos minutos. Así, por ejemplo en aproximaciones en las que una aeronave ligera esté precedida por una aeronave pesada, esta separación mínima se incrementa a tres minutos. Por tanto los valores de capacidad real del aeropuerto son, generalmente, inferiores a los indicados.

4. Diseño de los protocolos de negociación

probabilidad uniforme de fallo, p , el retraso en la recepción de un mensaje cualquiera se ha definido como:

$$t_d = \begin{cases} norm(\mu_d, \sigma_d) & p \leq i_f \\ 0 & p > i_f \end{cases}$$

Los casos en los que $t_d > t_{d,max} = \mu_d + 2\sigma_d$ y $t > t_e + t_{d,max}$ se pueden considerar como contingencias de fallo de comunicación en las cuales la aeronave afectada sería excluida de esta negociación y se iniciaría una negociación específica para este tipo de contingencias. Por ello estas situaciones no están incluidas dentro de nuestro protocolo.

El índice de aceptación para los sistemas evaluadores de aeronave y de ATC viene dado por $i_{a,i} \in [0.0, 1.0]$ (también con subíndice $i=0, 1, 2, 3, 4$ según se trate de propuestas de tipo $Tr0, Tr1, Tr2, Tr3$ o evaluador de ATC de trayectorias aceptadas y rechazadas por aeronaves). Este intervalo recoge, por tanto, todos los casos posibles de aceptación y confirmación de propuestas.

Por otra parte, también hay que recordar que en el caso de que se agoten todas las etapas del protocolo, el ATC deberá llevar a cabo una evaluación adicional para confirmar o cancelar aquellas propuestas, $Tr3$, realizadas a las aeronaves y aceptadas por éstas. Como ya se adelantó durante la explicación del protocolo, la confirmación o cancelación de estas propuestas depende de la relación existente entre el número de rechazos y de aceptaciones procedentes de las aeronaves. Por esta razón se ha establecido que el número de cancelaciones N_{canc} sobre el número de aceptaciones N_a recibidas sea proporcional al número de propuestas rechazadas, N_r ; es decir,

$$N_{canc} = \frac{N_r}{N_r + N_a} N_a$$

Entonces, el número de propuestas confirmadas es $N_{conf} = N_a - N_{canc}$ y el índice de confirmación de trayectorias viene dado por $i_{a,4} = \frac{N_{conf}}{N_a} = i_{a,3}$.

4.1.5.2. Análisis del tiempo de negociación

Teniendo en cuenta que $i_{a,i}$ condiciona las respuestas de los agentes, y por tanto el punto s en el que finaliza la negociación aire-tierra con un grupo de aeronaves, la dependencia del tiempo de negociación respecto a los parámetros definidos en la sección anterior viene expresada como

$$t_n = f(s(i_{a,i}), t_{e,i}, t_d(i_f)) \quad (4.1)$$

Por tanto, tabulando convenientemente los índices de aceptación y fijando los tiempos

de evaluación requeridos por los evaluadores y el tiempo debido a fallos de comunicación, es posible establecer una predicción de los tiempos de negociación resultantes mediante simulación de *Monte-Carlo*.

La tabla 4.2 ilustra esta relación entre diferentes valores de los índices de aceptación y los valores medios y desviaciones típicas de los tiempos de negociación resultantes. También se indican los valores medios y desviaciones típicas ($\bar{s}, \sigma(s)$) de los distintos puntos de salida $s(i_{a,i})$.

$a_{i,0}$ (%)	$a_{i,2}$ (%)	$a_{i,1}$ (%)	$a_{i,3} = a_{i,4}$ (%)	\bar{t}_n (min.)	$\sigma(t_n)$	\bar{s}	$\sigma(s)$
10	10	10	10	11.80	1.27	4.88	0.63
25	25	25	25	11.74	1.40	4.77	0.44
50	25	50	25	10.76	1.58	4.36	0.86
50	50	50	50	10.54	1.80	4.31	0.78
50	75	50	75	9.08	1.93	3.78	0.92
75	50	75	50	7.53	2.24	2.70	1.05
75	75	75	75	6.72	1.87	2.49	1.10
75	90	75	90	6.20	1.58	2.14	1.02
90	90	90	90	4.75	1.54	1.26	0.70

Tabla 4.2: Tiempos de negociación y puntos de salida del protocolo para diferentes valores de los índices de aceptación

Los tiempos medios de negociación obtenidos para diferentes combinaciones $i_{a,i} \in [0.1, 0.25, 0.50, 0.75, 0.9]$ están representados en la figura 4.13 agrupados en función del punto de salida s de salida del protocolo.

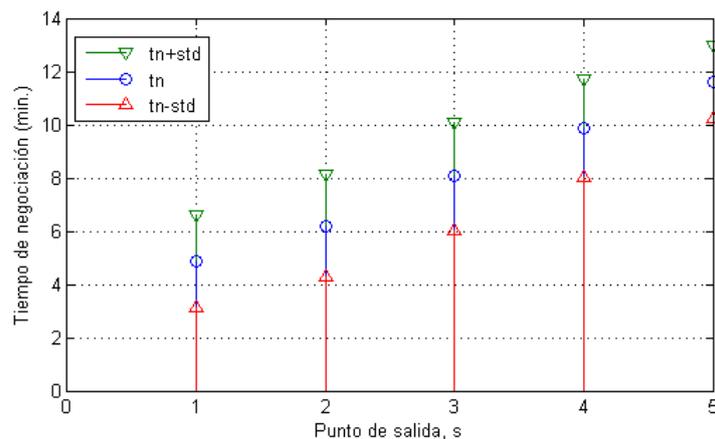


Figura 4.13: Tiempos medios de negociación de para $i_{a,i} \in [0.1, 0.9]$

La tabla 4.3 vincula los puntos s de salida del protocolo definidos en la sección 4.1.3 con las probabilidades de alcanzar cada uno de dichos puntos.

4. Diseño de los protocolos de negociación

Punto s	Mensaje de fin de negociación	$p(s)$
0	<i>Confirm (Tr0)</i>	$p(s=0) = i_{a,0}$
1	<i>Accept (Tr1)</i>	$p(s=1) = i_{a,1} \cdot (1 - i_{a,0})$
2	<i>Accept (Tr2)</i>	$p(s=2) = i_{a,2} \cdot (1 - i_{a,1}) \cdot (1 - i_{a,0})$
3	<i>Reject (Tr3)</i>	$p(s=3) = (1 - i_{a,3}) \cdot (1 - i_{a,2}) \cdot (1 - i_{a,1}) \cdot (1 - i_{a,0})$
4	<i>Confirm (Tr3)</i>	$p(s=4) = i_{a,4} \cdot i_{a,3} \cdot (1 - i_{a,2}) \cdot (1 - i_{a,1}) \cdot (1 - i_{a,0})$
5	<i>Inform (Tr)</i>	$p(s=5) = (1 - i_{a,4}) \cdot i_{a,3} \cdot (1 - i_{a,2}) \cdot (1 - i_{a,1}) \cdot (1 - i_{a,0})$

Tabla 4.3: Puntos de salida del protocolo e índices de aceptación

En los diagramas de contorno de las figuras 4.14, 4.15 y 4.16 se representan los valores de \bar{t}_n en función de los índices de aceptación de los evaluadores de aeronaves y de ATC (expresados en porcentajes).

En la figura 4.14, se indican los valores \bar{t}_n que resultan para $i_{a,0}$ e $i_{a,2}$ y donde $i_{a,1} = i_{a,3} = i_{a,4} = 0,5$. En dicha figura se pone de manifiesto la disminución \bar{t}_n a medida en que se incrementan los valores de $i_{a,0} = i_{a,2}$. La simetría de los tiempos de negociación respecto al orden de los índices anteriores obedece a que en nuestro caso se han establecido tiempos de evaluación iguales e independientes del número de propuestas entrantes para ambos evaluadores.

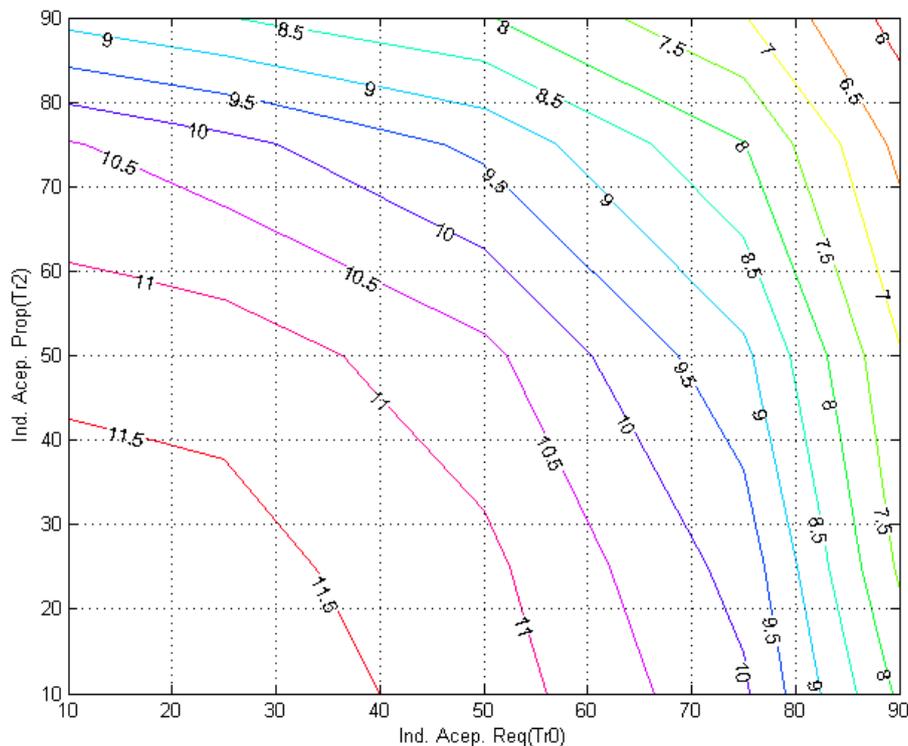


Figura 4.14: Tiempo de negociación medio en función de los índices de aceptación de los evaluadores del ATC

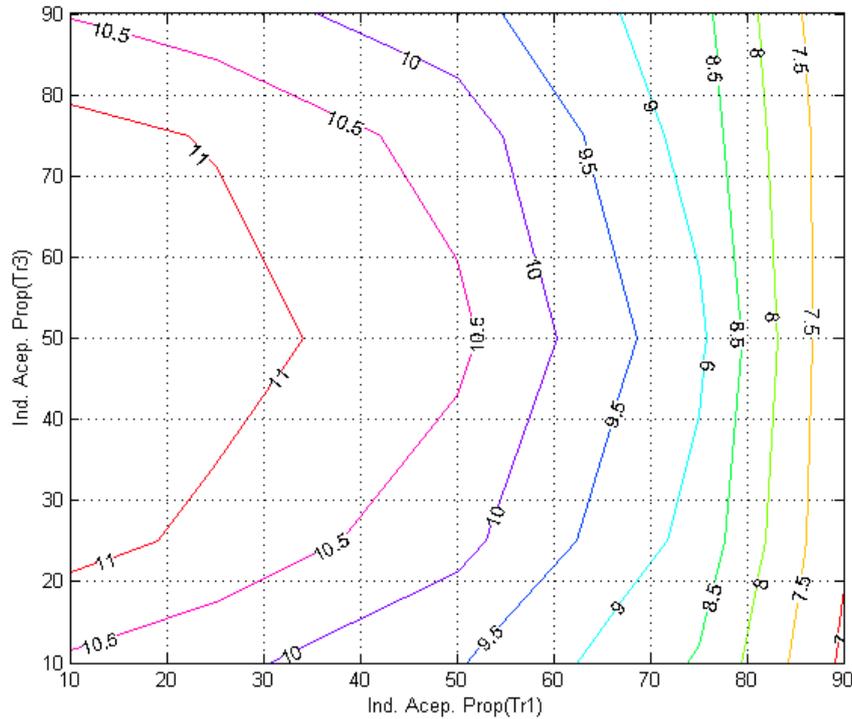


Figura 4.15: Tiempo de negociación medio en función de los índices de aceptación de los evaluadores de aeronave.

En la figura 4.15 se representa \bar{t}_n en función de los índices de aceptación $i_{a,1}$ e $i_{a,3}$ de las aeronaves con $i_{a,0} = i_{a,2} = 0,5$ y $i_{a,4} = i_{a,3}$ para los evaluadores del ATC. En este caso, se constata que, estableció un valor de $i_{a,1}$, resulta que \bar{t}_n es máximo para $i_{a,3} = 0.5$. Ello se debe a que, dicho valor da lugar que el máximo número de negociaciones acaben en el punto $s=5$. Así para $i_{a,3} < 0.5$, \bar{t}_n decrece debido a que se incrementa el número de aeronaves que rechazan las propuestas $Tr3$ y que por tanto finalizan su negociación en el estado $s=3$. Por otra parte, teniendo en cuenta que en este caso hemos establecido $i_{a,4} = i_{a,3}$, conforme aumenta $i_{a,3}$ también lo hace en la misma proporción el número de confirmaciones de $Tr3$. Ello se traduce, lógicamente, en un incremento de aeronaves que finalizan su negociación en la etapa $s=4$ frente a las que lo hacen en la etapa $s=5$.

En la figura 4.16 se representa el tiempo de negociación frente al índice de aceptación de los evaluadores de aeronave y de ATC. En este caso además se ha establecido el mismo índice de aceptación para los dos evaluadores de propuestas de cada uno de estos agentes (es decir $i_{a,0} = i_{a,2}$ y $i_{a,1} = i_{a,3}$). En la gráfica se pone de manifiesto las características de \bar{t}_n respecto a $i_{a,i}$ descritas en las dos figuras anteriores. A los efectos de analizar el caso peor también resulta de interés evaluar los tiempos máximos de negociación. Así, el tiempo máximo de negociación, $t_{n,max}$, del escenario descrito anteriormente a través de la figura 4.16 está representado en el diagrama tridimensional y de líneas de contorno de la figura 4.17.

4. Diseño de los protocolos de negociación

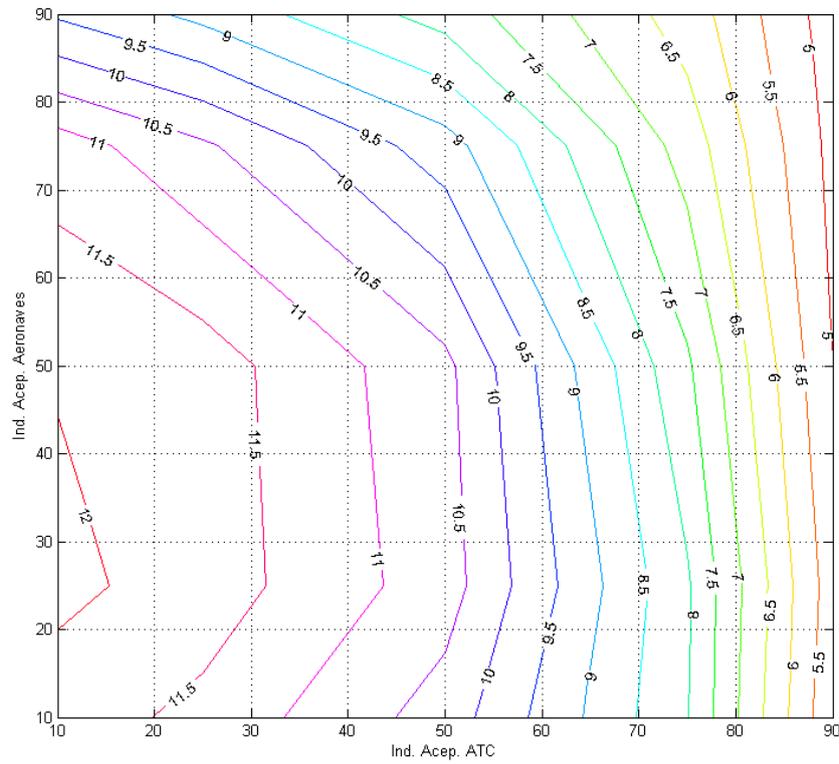


Figura 4.16: Tiempo medio de negociación frente a índices de aceptación de ATC y de aeronaves ($i_{a,0} = i_{a,2}$ y $i_{a,1} = i_{a,3}$)

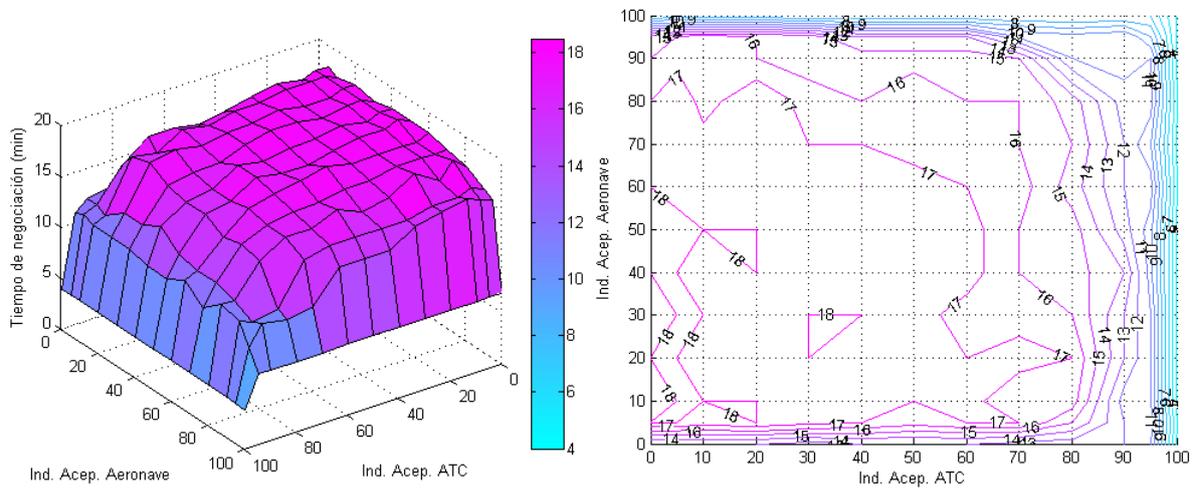


Figura 4.17: Tiempos máximos de negociación: $i_{a,0} = i_{a,1}$; $i_{a,2} = i_{a,3}$

La variación del tiempo de negociación frente a la tasa de fallos para distintos valores del tiempo (t_d, σ_d) se muestra en la figura 4.18. En dicha figura se ha tomado como referencia la combinación $i_{a0} = i_{a2} = 0.05$, $i_{a1} = 0.2$ y $i_{a3} = 0.9$ que da lugar a un tiempo máximo de negociación $t_{n,max} = 16.8$ minutos para $i_f = 0$. Su análisis permite identificar los límites tolerables de tasa de fallos y/o tiempo de retraso para lograr que el tiempo de duración del segmento de negociación no supere el tiempo de recepción de mensajes $t_r = 30$ minutos tal como se indicó en la página 195 de esta sección.

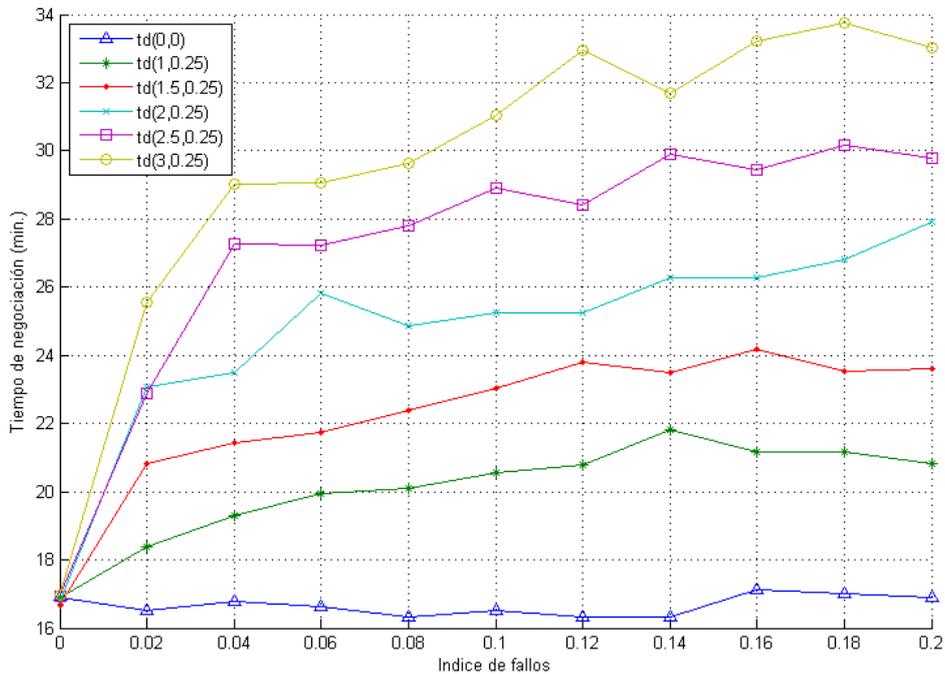


Figura 4.18: Tiempo medio de negociación en función del índice de fallos

Por otra parte, también es posible obtener información complementaria sobre la previsible evolución del protocolo de comunicaciones para una determinada combinación de índices de aceptación a partir de la representación gráfica del flujo de mensajes.

La figura 4.19 muestra el número medio acumulado y contabilizados cada 30 segundos de cada uno de los diferentes tipos de mensajes sobre propuestas y contrapropuestas enviadas a cada agente para un índice de aceptación $i_{a0} = i_{a2} = 0.05$; $i_{a1} = 0.2$; $i_{a3} = 0.9$. Las propuestas y contrapropuestas que envían los agentes aeronaves y ATC contabilizadas en períodos de 30 segundos, están representadas y ordenados temporalmente desde arriba hacia abajo en la mencionada figura. En la parte superior se representa el flujo de mensajes de solicitudes de trayectoria inicial ($Req(Tr0)$) durante el período de recepción de respuesta ($t_r = 30$ minutos).

En la fila inmediatamente inferior se muestran los mensajes del ATC en respuesta

4. Diseño de los protocolos de negociación

a la solicitud anterior. En el margen izquierdo de esta fila se representan los mensajes de aceptación de la propuesta $Tr0$, mientras que a la derecha se muestran los mensajes que contienen propuestas de ATC para variar la trayectoria solicitada inicialmente ($Prop(Tr1)$).

En la fila siguiente se muestran las respuestas de las aeronaves a las propuestas tipo $Prop(Tr1)$. A la izquierda se ubican los mensajes de aceptación de dicha propuesta, mientras que a la derecha se representan los mensajes de contrapropuestas ($Prop(Tr2)$).

Debajo de la fila anterior se muestran los mensajes del ATC, indicando nuevamente a la izquierda los mensajes de aceptación ($Accep(Tr2)$) y a la derecha los que contienen las contrapropuestas ($Prop(Tr3)$).

En la siguiente fila siguiente, se encuentran las respuestas de aeronaves a las últimas propuestas del ATC. En este caso se trata de mensajes de aceptación (a la izquierda) o rechazo (a la derecha y de forma conjunta con los mensajes de información vinculados a éstos). Posteriormente se representan los mensajes de ATC que confirman o que cancelan las aceptaciones de aeronaves (los mensajes de cancelación se representan vinculados a sus respectivos mensajes de información). Por último se muestran los mensajes de las aeronaves que informan de la trayectoria seleccionada a partir de las restricciones proporcionadas por el ATC cuando éste canceló la última propuesta realizada a la aeronave.

Obsérvese que las filas segunda a quinta de la gráfica anterior proporcionan información de los diferentes evaluadores de aeronaves y ATC. De esta manera, para cualquiera de las filas anteriores, el índice de aceptación se obtiene dividiendo el número de mensajes totales de la columna de la izquierda entre el número de mensajes que resulta de sumar los de ambas columnas.

Analizando esta figura se aprecia la lógica disminución de mensajes a medida que las propuestas y contrapropuestas van siendo mutuamente aceptadas por el ATC ($Conf(Tr0)$ y $Accep(Prop2)$) o por las aeronaves ($Accep(Prop1)$ y $Accep(Tr3)$). Como ya se adelantó, también se observa que el tiempo de negociación obtenido es resultado de que las aeronaves que no han alcanzado un acuerdo en las etapas anteriores utilizan la última etapa del protocolo de negociación para establecer su trayectoria a partir de las restricciones incluidas en los mensajes $Info(Rt)$ vinculados a mensajes $Cancel(Tr3)$.

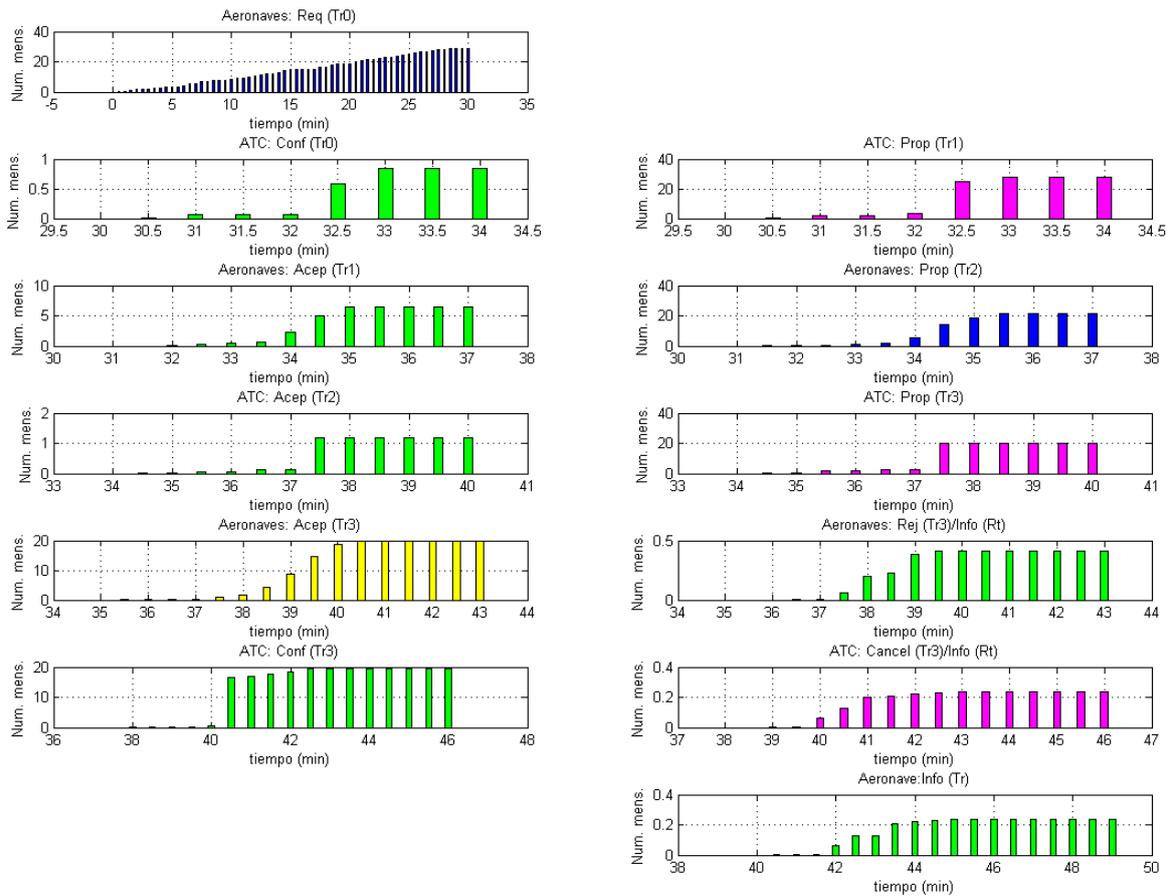


Figura 4.19: Flujo acumulado de mensajes para $i_{a0} = i_{a2} = 0.05$, $i_{a1} = 0.2$, $i_{a3} = 0.9$

Una representación análoga se muestra en la figura 4.20. En este caso, también el protocolo se agota en el último punto de salida, $s=5$. Sin embargo su tiempo de negociación es menor como consecuencia de que se incrementa con respecto al caso anterior, el número de aeronaves que alcanzan un acuerdo en las etapas previas ($i_{a0} = 0.7$, $i_{a2} = 0.6$, $i_{a1} = 0.95$, $i_{a3} = 0.9$). Esta variación del número de acuerdos adoptados en cada etapa de la negociación se aprecia también en la figura 4.21 donde se muestra el histograma de puntos de salida de la negociación para cada uno de los dos casos anteriores.

Finalmente en la figura 4.22 se muestra el flujo instantáneo de mensajes de aeronave y de ATC correspondientes a los casos representados en las figuras 4.19 y 4.20 anteriores. El número de mensajes medios están contabilizados en intervalos de 30 segundos. Estas gráficas permiten relacionar el número de mensajes de aeronaves y de ATC. De esta manera, a medida que el ATC incrementa el número de aceptaciones de solicitudes de aeronave, disminuye el número de mensajes de contrapropuestas de estas últimas y con ello el tiempo de negociación.

4. Diseño de los protocolos de negociación

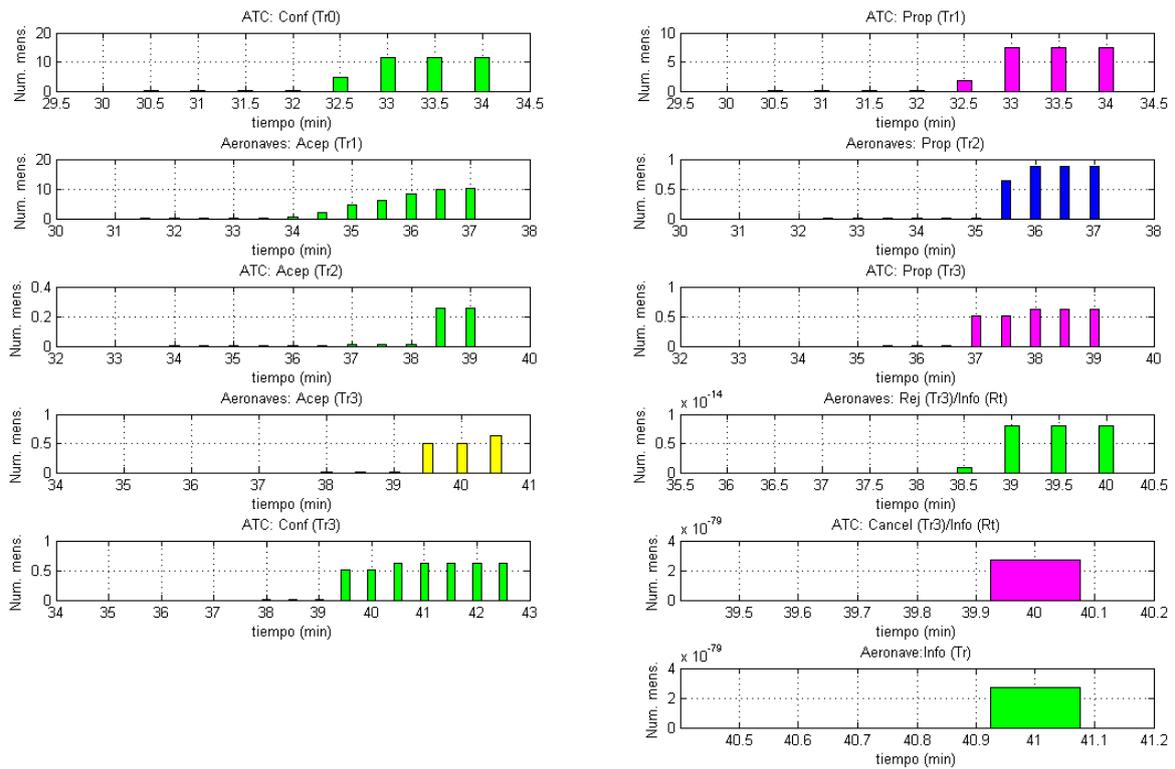


Figura 4.20: Flujo acumulado de mensajes para $i_{a0}=0.7$, $i_{a2}=0.6$, $i_{a1}=0.95$, $i_{a3}=0.9$

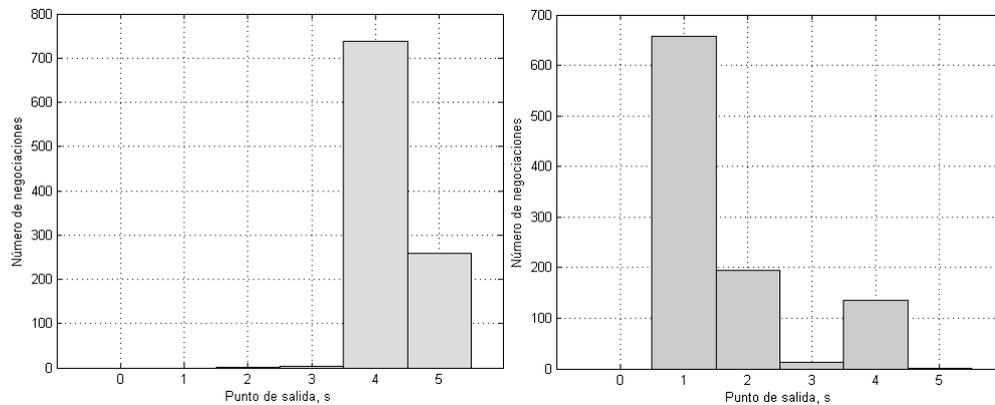


Figura 4.21: Histogramas de los puntos de salida de negociación correspondientes a los casos representados en la figura 4.19 (izquierda) y figura 4.20 (derecha).

4.2. Protocolo de negociación aire-aire

Además de los mecanismos de negociación para la planificación de las trayectorias de llegada es preciso disponer de otros protocolos que permitan resolver posibles contingencias que requieran modificar una o varias trayectorias del conjunto de trayectorias

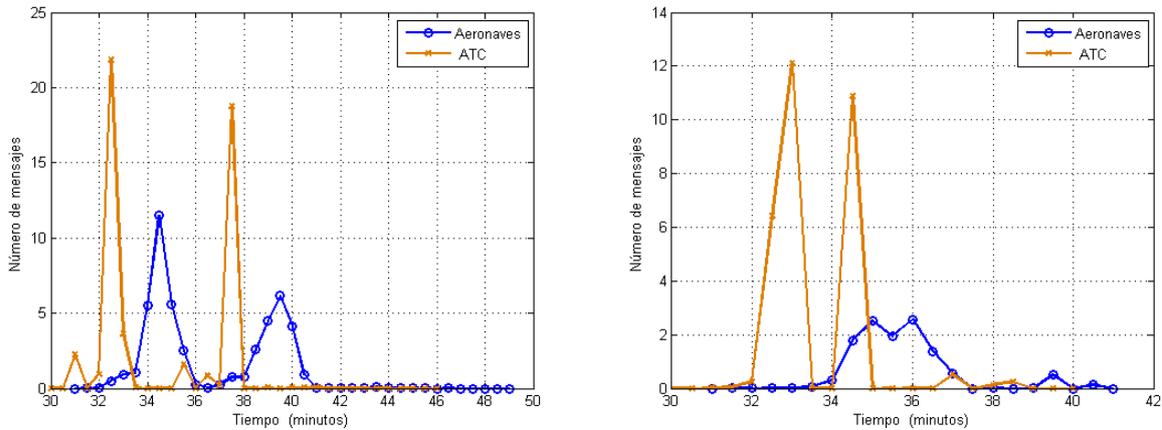


Figura 4.22: Flujo instantáneo de mensajes de aeronaves y de ATC correspondiente a las figuras 4.19 (izquierda) y 4.20 (derecha)

acordadas. Se trata en este caso de un problema de planificación dinámica abordado por algunos autores como un problema de desplazamiento donde las nuevas decisiones deben considerar las decisiones anteriores [Ernst y Krishnamoorthy 2001]. Otros autores han planteado soluciones más locales y descentralizadas en lugar de estrategias globales [Sorensen 2000, Rong et al. 2002, Prevot et al. 2003]. Desde el punto de vista operacional esta última solución reduce el número de procesos de negociación aire-tierra destinados a revisar decisiones adoptadas previamente reservando dichos protocolos para contingencias muy excepcionales (por ejemplo inoperatividad imprevista de las pistas de aterrizaje). Sin embargo, hasta la fecha no se ha desarrollado ningún protocolo específico.

En esta Tesis se propone un protocolo de negociación descentralizado para resolver determinados problemas de planificación dinámica. Se establece para ello un contexto operacional en el que la responsabilidad de la separación haya sido delegada previamente en las aeronaves después de una negociación aire-tierra de la trayectoria de llegada. El protocolo propuesto recoge las acciones de las aeronaves cuando las circunstancias operacionales o ambientales hagan necesario revisar los acuerdos alcanzados entre éstas y el ATC. De acuerdo a dicho protocolo, una aeronave cualquiera que se encuentre en fase de llegada y converja con otras en un punto común de la ruta, podrá renegociar su orden de secuencia de llegada a dicho punto. Una vez que un grupo de aeronaves haya negociado una secuencia libre de conflictos a nivel local, este acuerdo será comunicado al ATC. Para ello se ha asumido un escenario donde un conjunto de trayectorias 4D libres de conflictos han sido calculadas y asignadas a cada aeronave a partir de una red de rutas *arrival RNAV* que convergen gradualmente. Esta asignación de trayectorias se habrá realizado en una fase anterior mediante una negociación aire-tierra como la descrita en la sección 4.1. La asignación de trayectorias de acuerdo a una arquitectura de rutas

convergentes facilita la asignación de restricciones de trayectoria basadas en tiempos de llegada nominales (ETA) a cada uno de los puntos de convergencia [Saraf y Slater 2006]. Este parámetro y sus variaciones constituyen un modo simple y práctico de definir cambios de los requerimientos operacionales de las aeronaves o de las condiciones ambientales (viento principalmente). De acuerdo a estos valores se pueden definir además los eventos que disparan el protocolo de negociación aire-aire con el fin de acomodar la trayectoria de llegada, negociada con anterioridad con el ATC, a nuevas circunstancias no previstas inicialmente. De este modo, la negociación aire-aire posibilita la alteración de la secuencia asignada a cada aeronave en la negociación aire-tierra anterior para cada uno de los puntos de convergencia. En este escenario el ATC seguirá actuando de árbitro a los efectos de asignar turnos para el inicio de negociación entre las aeronaves que convergen en un mismo punto. La inclusión del proceso derivado de este protocolo en el diseño del agente aeronave que se propone en el siguiente capítulo, supone una mejora de las capacidades de autoseparación de los actuales prototipos ASAS-CDTI en la medida en que incorpora esta capacidad de autoconvergencia.

4.2.1. Escenario operacional

El escenario operacional está diseñado sobre una estructura de rutas convergentes idéntica a la descrita en la sección 4.1.1. Las aeronaves vuelan trayectorias 4D negociadas con el ATC a lo largo de dicha arquitectura de rutas convergiendo en puntos comunes (ver figura 4.23). También se presupone que las tolerancias para el seguimiento de las trayectorias 4D se definen a partir del tiempo mínimo de separación respecto a la aeronave precedente, t_{sep} y del tiempo nominal de llegada, t_{nom} , a cada uno de los puntos convergentes de la ruta¹¹.

Por otra parte, se define como *grupo de negociación* al conjunto de N aeronaves que en un instante dado vuelan segmentos que convergen hacia un mismo punto P de la ruta. En la figura 4.24 se representa un grupo de negociación. Con el fin de obtener una mejor comprensión de las rutas de llegada, éstas se han representado de forma simétrica respecto al punto de convergencia donde la mínima separación entre aeronaves se ilustra por medio de las líneas discontinuas.

Si por razones operacionales sobrevenidas, una aeronave perteneciente a un grupo de negociación requiere modificar su tiempo de llegada al siguiente punto de convergencia, deberá negociar dicha modificación con las aeronaves de su grupo que resulten afectadas. La tripulación de cualquier aeronave puede buscar y negociar soluciones potenciales con

¹¹Es decir, se asume que las aeronaves están equipadas con *ADS-B*, *ASAS* y *FMS 4D* lo que les permite realizar operaciones de autoseparación y de guiado 4D. Hay que recordar además que las trayectorias y sus restricciones temporales en cada punto de convergencia resultan de una negociación aire-tierra previa como la descrita en la sección 4.1.

otras aeronaves que pertenecen a su mismo grupo de negociación, pero sólo podrá desarrollarse un único proceso negociador a la vez. Finalmente las soluciones acordadas deben ser supervisadas y aprobadas por el ATC antes de su implementación por las aeronaves¹².

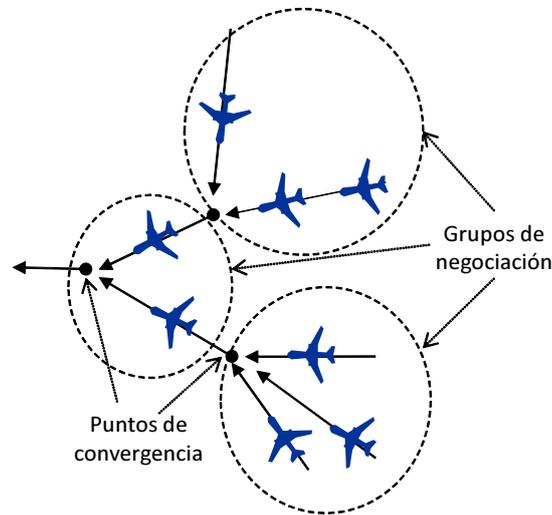


Figura 4.23: Rutas de llegada y grupos de negociación

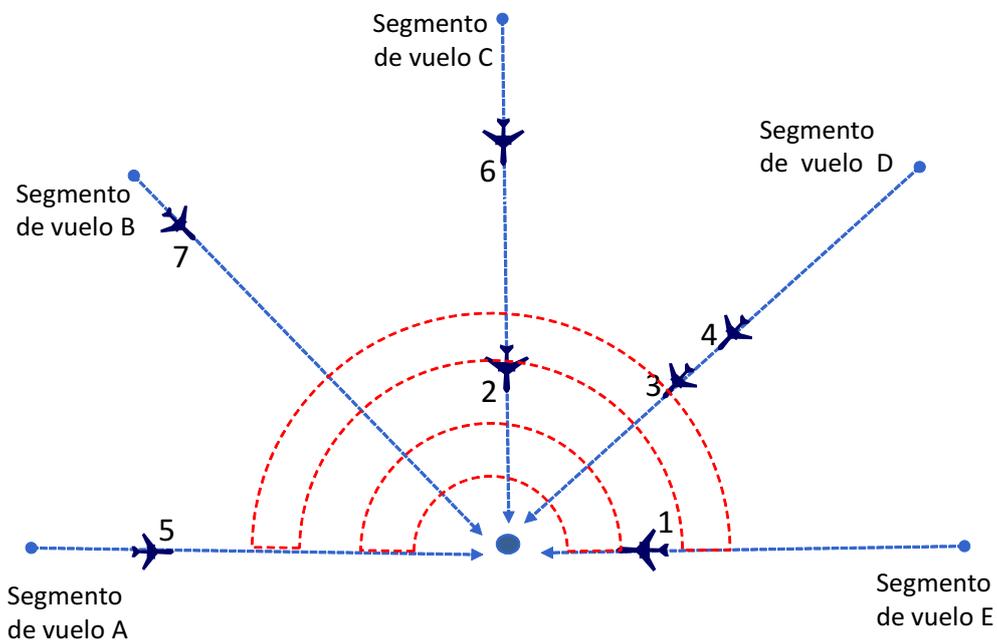


Figura 4.24: Convergencia de tráfico aéreo

¹²La resolución de este problema localmente (a nivel de grupo de negociación) es un primer paso para considerar una aproximación más global en la que se procesan distintos grupos de negociación son procesados simultáneamente.

4.2.1.1. Parámetros asociados al objeto de la negociación

Al igual que el protocolo de negociación aire-tierra, este protocolo ha sido constituido a partir de mensajes individuales FIPA-ACL del tipo *Request()*, *Propose()* y *Accept()*. Sin embargo, en este caso, además se describe el proceso interno de toma de decisiones de los agentes a partir de los contenidos incluidos en dichos mensajes. Para expresar dichos contenidos se han definido los siguientes parámetros¹³:

- $t_{nom}(i)$ tiempo asignado por el ATC a la aeronave i para alcanzar el siguiente punto de convergencia. Este tiempo forma parte de la trayectoria negociada previamente con el ATC. Junto a este valor, la trayectoria puede incluir restricciones temporales para dicha aeronave. De esta forma $t_{nom}(i) \in [t_{min}(i), t_{max}(i)]$ donde $t_{min}(i)$ y $t_{max}(i)$ representan el mínimo y máximo tiempo respectivamente en los que la aeronave es capaz de alcanzar el punto de convergencia.
- $t_{sep}(i)$ es el tiempo de separación mínimo entre aeronaves en la posición i y la que le precede en la posición $i-1$. A pesar de que la separación usualmente es expresada como una distancia de seguridad en las primeras fases de la llegada, consideramos su correspondiente equivalencia en unidades de tiempo.
- $t_{req}(i)$ representa el tiempo requerido por la aeronave cuando desea modificar su $t_{nom}(i)$ para llegar al punto de convergencia debido a razones operacionales no previstas inicialmente. Se define también el intervalo (o rango) de tiempo requerido, $r_{req}(i) = [t_{req,min}(i), t_{req,max}(i)]$ como un conjunto de soluciones aceptables para la aeronave i alrededor de $t_{req}(i)$ (es decir, $t_{req}(i) \in [t_{req,min}(i), t_{req,max}(i)]$). Además, $t_{req}(i, j)$ y $r_{req}(i, j)$ representan respectivamente el tiempo y rango de tiempos requeridos a la aeronave i por otra aeronave j .
- $t_{des}(i)$ y $r_{des}(i) = [t_{des,min}(i), t_{des,max}(i)]$ se definen como el tiempo deseado y el rango de tiempo deseado respectivamente por una aeronave para llegar al punto de convergencia (es decir $t_{des}(i) \in r_{des}(i) = [t_{des,min}(i), t_{des,max}(i)]$). Estos parámetros se emplean por las aeronaves para calcular propuestas para otras aeronaves que hayan solicitado una modificación de trayectoria. Cuando la aeronave actúa como primer iniciador, estos valores coinciden con $t_{req}(i)$ y $r_{req}(i)$ respectivamente.

Los deseos de una aeronave cualquiera han sido modelados de la siguiente forma:

- Acelerar (A): $r_{des}(i) \subset [t_{nom} < t_{des} \leq t_{max}]$.

¹³Sobre cada uno de los parámetros siguientes se puede establecer un intervalo de tolerancia. Sin embargo a los efectos de describir el proceso de toma de decisiones durante la negociación no es necesario considerarlo.

- Desacelerar (D): $r_{des}(i) \subset [t_{min} \leq t_{des} < t_{nom}]$.
 - Nominal (N): $t_{des}(i) = t_{nom}(i)$.
 - Adaptable (I): $r_{des}(i) \subset t_{min} < t_{des} < t_{max}$.
- $r_{prop}(i) = [t_{prop,min}(i), t_{prop,max}(i)]$ es el rango de tiempo de la solución propuesta por la aeronave i después de evaluar la petición realizada por otra aeronave. Cuando dicha propuesta se envía a una aeronave j , se expresa como $r_{prop}(i, j)$.
 - $t_{sol}(i)$ es la solución elegida por una aeronave i , bien a partir de una propuesta o bien a partir de una solución adoptada por otra aeronave.

4.2.2. Roles de aeronaves y reglas de encuentro

En este escenario, el *agente iniciador* es la aeronave que requiere modificar su tiempo nominal de llegada al próximo punto de convergencia y solicita a otra aeronave (*agente respondedor*) una modificación de su trayectoria con el fin de mantener la correspondiente distancia de separación nominal entre ambas. Si la decisión adoptada por una aeronave *respondedora*, en respuesta a una solicitud, afecta a la separación mínima respecto a una tercera aeronave, la aeronave *respondedora* además actúa como un nuevo iniciador para solicitar una solución de la aeronave afectada. De este modo, una negociación *multi-parejas* puede llevarse a cabo de una forma secuencial donde la primera aeronave actúa sólo como iniciadora (*primer iniciador*), la última aeronave involucrada en la negociación actúa sólo como respondedor (*último respondedor*) y el resto de las aeronaves actúan tanto como *respondedoras* y como *iniciadoras*.

Un primer iniciador puede negociar tantas posiciones en una secuencia como posiciones libres existan en su segmento de vuelo. Por tanto, un primer iniciador puede negociar bien una posición consecutiva o una posición no consecutiva. Sin embargo, hay que insistir en que en este último caso, los segmentos de vuelo de las respectivas aeronaves no pueden ser coincidentes, puesto que ello implicaría tener que realizar adelantamientos a través de rutas intermedias.

En las posiciones consecutivas, una aeronave i actúa como un iniciador de una negociación con otra aeronave j cuando:

- a) La aeronave i desea acelerar. Es decir, $(t_{req}(i) < t_{nom}(i))$ y para $j < i$ resulta $t_{req}(i) - t_{sep}(i) < t_{nom}(j)$.
- b) La aeronave i desea desacelerar. Es decir, $(t_{req}(i) > t_{nom}(i))$ y para $j > i$ resulta $t_{req}(i) + t_{sep}(j) > t_{nom}(j)$.

La negociación de posiciones no consecutivas tiene lugar cuando un primer *iniciador* desea acelerar o desacelerar y su tiempo requerido de llegada afecta al tiempo nominal de

4. Diseño de los protocolos de negociación

una aeronave cuyo orden de llegada al punto de convergencia no es consecutivo al orden de la aeronave actual.

Antes de iniciar la negociación, la aeronave i identifica (a través de la información ADS-B del tráfico circundante), a la aeronave o aeronaves que se verían afectada por sus requerimientos operaciones. Teniendo en cuenta que los requerimientos de un primer iniciador para alcanzar el punto de convergencia en un instante determinado puede afectar tanto a la aeronave que le precede como a la le sigue, el esquema de negociación anterior se puede producir de manera simultánea tanto hacia adelante como hacia atrás a partir de dicho iniciador.

El proceso de identificación de los respondedores iniciales se describe en la figura 4.25. De acuerdo con dicha figura figura, una aeronave i que desea alterar su posición nominal localiza en primer lugar a las aeronaves cuyos ordenes n y $n+1$ y sus respectivos tiempos nominales definen un intervalo de tiempo $[t_{nom}(n), t_{nom}(n+1)]$ que contiene su tiempo requerido de llegada, $t_{req}(i)$. A continuación, y dependiendo de si la aeronave i desea acelerar o desacelerar, determina si existe otra aeronave m que vuele el mismo segmento que la aeronave i y por tanto tiene preferencia como respondedor. En este supuesto, la aeronave i debe iniciar una negociación con la aeronave m para intercambiar su posición actual. En caso contrario, la aeronave i comenzará un proceso de negociación simultáneo con las aeronaves n y $n+1$ con el fin de ocupar un posición intermedia entre estas dos aeronaves.

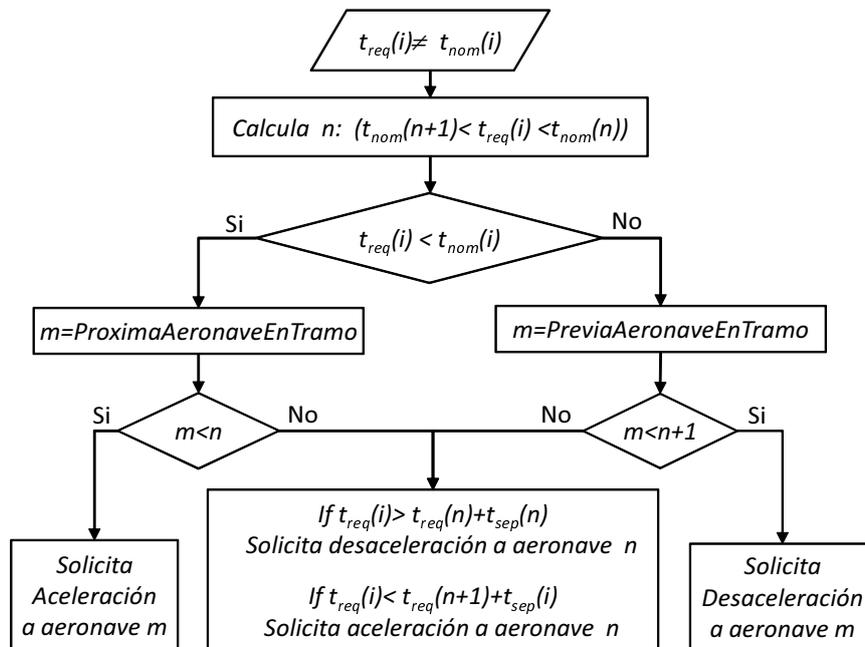


Figura 4.25: Identificación de *respondedores* iniciales

4.2.3. Protocolo de comunicaciones

El protocolo de comunicación aire-aire es resultado del esquema de negociación automática propuesto en esta Tesis entre un grupo de aeronaves convergentes. La solución acordada por cada agente aeronave también podrá ejecutarse automáticamente o bien podrá ser presentada al piloto para su aprobación e implementación.

En la figura 4.26 se muestra el flujo de mensajes entre varios agentes aeronaves involucrados en un proceso de negociación que ha sido iniciado por una aeronave i . En este caso la aeronave i vuela el mismo segmento que las otras y comienza una negociación para solicitar una aceleración con la finalidad de alcanzar el punto de convergencia en un instante $t_{req}(i) < t_{nom}(i)$. La negociación aire-aire, comienza después de solicitar y recibir la correspondiente autorización desde el centro ATC. Durante el proceso de negociación, la aeronave que actúa como *iniciadora* solicita una propuesta a su correspondiente aeronave *respondedora* $j=i-1$ por medio de un mensaje de solicitud en el que se especifica su r_{req} (mensaje $Request(r_{req}(i-1, i))$). Una vez que haya recibido una propuesta procedente de la aeronave *respondedora* (mensaje $Propose(r_{prop}(i-1))$) adoptará una solución definida, por $t_{sol}(i)$ que se comunica a la aeronave *respondedora* (mensaje $Accept(t_{sol}(i-1, i))$).

Por su parte, la aeronave *respondedora* proporciona una solución $r_{prop}(j, i)$ considerando los tres aspectos siguientes:

1. La solicitud, $r_{req}(j, i)$, realizada por la aeronave iniciadora i .
2. Los deseos de la propia aeronave j .
3. Las soluciones propuestas por una tercera aeronave cuando están afectadas por soluciones derivadas de los dos criterios anteriores.

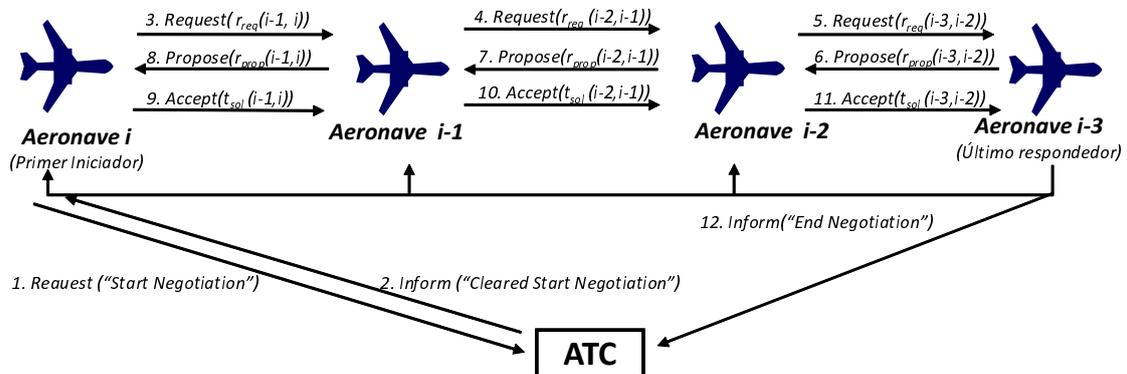


Figura 4.26: Protocolo de comunicación aire-aire

4.2.4. Procesos

El comportamiento interno de un agente aeronave que actúa tanto como iniciador como respondedor en un proceso de negociación aire-aire está representado en el diagrama de flujo de la figura 4.27. Durante el proceso de negociación, cada aeronave tiene que realizar diversas tareas de cálculo y comunicación. Vinculados a los distintos tipos de tareas también se define un conjunto de estados que permiten caracterizar la evolución del proceso de negociación en cada agente.

Las tareas principales llevadas a cabo por un agente aeronave i son las siguientes:

- Calcular una solución propia para realizar una propuesta, $r_{prop}(i)$ a partir de sus propios deseos $r_{des}(i)$ y de la solicitud efectuada por otra aeronave j , $r_{req}(i, j)$. Para ello aplica los criterios que se explican al final de esta misma sección.
- Identificar si la propuesta $r_{prop}(i)$ requiere una negociación con una tercera aeronave. En el caso de que así fuera, deberá solicitar una nueva propuesta a dicha aeronave y, una vez recibida, calculará una propuesta de solución para la aeronave j , $r_{prop}(j, i)$, que tendrá en cuenta la propuesta realizada por esta tercera aeronave.
- Seleccionar y establecer una solución final aceptable, $t_{sol}(i)$. Si la aeronave i actúa como primer iniciador, esta solución se obtiene a partir la propuesta $r_{prop}(j, i)$ de otra aeronave. En cambio si dicha aeronave ejerce de respondedora, la solución se establece a partir de la solución adoptada por su correspondiente iniciador, $t_{sol}(j, i)$.
- Enviar y recibir mensajes sobre las demandas, propuestas y adopción de soluciones que se producen durante la negociación¹⁴. Este intercambio de información permite además identificar el estado de la negociación desde la perspectiva de cada agente.

Los estados internos del agente durante el proceso de negociación son los siguientes:

- *Preparado para Negociar (PN)*. Este estado se dispara cuando la aeronave desea acelerar o desacelerar de acuerdo a sus requerimientos operacionales. Es compatible con el estado de *Negociación en Curso* que más adelante se describe.
- *Libre para Negociar (LN)*. Este estado se alcanza cuando se recibe un mensaje *Libre para Negociar (MLN)* del ATC. El ATC envía mensajes *MLN* a todas las aeronaves de un grupo de negociación cada vez que el último respondedor de una negociación implemente y comunique al ATC las soluciones acordadas.

¹⁴La notación empleada en el diagrama de procesos de la figura 4.27 se ha simplificado ligeramente respecto los diagramas procesos de la negociación aire-tierra de manera que los diferentes mensajes entrantes se representan bajo el epígrafe *verifica mensajes entrantes*.

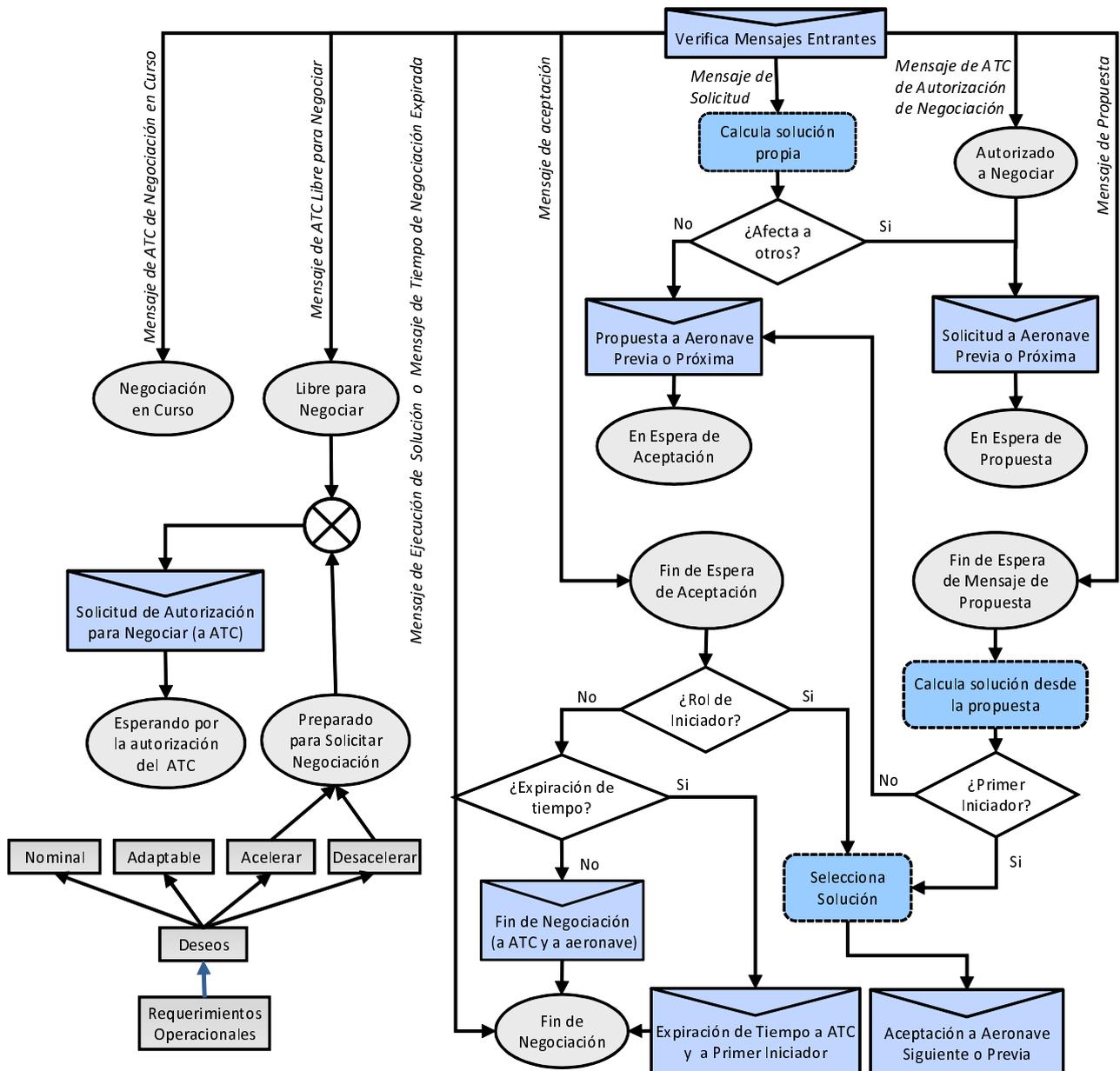


Figura 4.27: Diagrama de procesos del agente aeronave en negociaciones aire-aire.

- *Negociación en curso (NC)*, para indicar que está teniendo lugar la negociación. Mientras una aeronave mantenga el estado *NC*, el ATC no autorizará ninguna otra negociación para ese grupo.
- *Esperando Autorización ATC (EA)*, indica que la aeronave está esperando por una autorización ATC para comenzar una negociación. Este estado se activa cada vez que se envíe un mensaje de *Solicitud de Autorización para Negociación* al ATC. La aeronave mantiene el estado *EA* hasta que reciba un mensaje de *Autorización de Negociación* del ATC (*MAN*) o bien un mensaje de *Negociación en Curso* (*MNC*). La recepción de un mensaje *MNC* significa que otra aeronave ha comenzado una

4. Diseño de los protocolos de negociación

negociación. En este caso, la aeronave pasa desde el estado *EA* a los estados *PN* y *NC* simultáneamente.

- *Autorizado a Negociar (AN)*. La transición del estado de espera *EA* anterior a este estado se realiza cuando se recibe del ATC un mensaje tipo *MAN*.
- *Esperando Propuesta (EP)*. Este estado se alcanza cuando la aeronave envía un mensaje de solicitud a otra aeronave.
- *Fin de Espera de Respuesta (FER)*. Indica que se ha recibido un mensaje de otra aeronave con una propuesta de solución. Una vez que la aeronave haya recibido una propuesta, obtendrá un conjunto de soluciones posibles. Si la aeronave que recibe la propuesta de solución es un agente primer iniciador, debe elegir a partir de esta propuesta aquella solución (si existe) que mejor se adapte a su solicitud inicial. Si no es un primer iniciador, entonces debe obtener una solución que contemple sus deseos y los requerimientos de su correspondiente iniciador, enviar dicha solución como una contrapropuesta y esperar por un mensaje de aceptación.
- *Esperando Aceptación (EA)*. A este estado se transita cada vez que la aeronave envía un mensaje de propuesta en respuesta a una solicitud previa.
- *Fin de Espera de Aceptación (FEA)*. Se activa a partir del estado anterior cuando se recibe un mensaje sobre aceptación/rechazo de una propuesta realizada con anterioridad. Si el agente que recibe el mensaje es el *último respondedor* (y por tanto no tiene ningún rol de iniciador), este estado conduce al estado *Fin de Negociación (FN)* después de determinar si el tiempo de negociación ha expirado o no. En cambio si tiene un rol de iniciador deberá seleccionar y fijar una solución final y además enviar esta información a su correspondiente respondedor.

Los criterios utilizados por una aeronave *i* para calcular una propuesta (o solución propia) que satisfaga la solicitud realizada por una aeronave *j*, $r_{req}(i, j)$, y sus propios deseos $r_{des}(i)$, se indican en el pseudocódigo del algoritmo 4.28. En este algoritmo, los deseos de una aeronave *n* (*des_n*) se expresan como *A* (*Acelerar*), *D* (*Desacelerar*), *I* (*Adaptable o Indiferente*), *N* (*Nominal*). Se considera que ambas aeronaves tienen deseos contrarios en el caso de que una de ellas desee acelerar y la otra desacelerar.

En general, la solución propia resulta de la intersección entre el rango de tiempo requerido y el rango de tiempo deseado por la propia aeronave ($r_{prop}(i) = r_{req}(i, j) \cap r_{des}(i)$).

En el caso de que dicha intersección sea el conjunto vacío la aeronave *i* propone soluciones alternativas que inicialmente no impliquen alteraciones del orden de posición y que respeten los tiempos nominales establecidos. Estas propuestas serán las siguientes:

Algoritmo 4.1 Pseudo código del algoritmo para cálculo de propuestas propias

```

calculateOwnProposal () {
   $r_{prop}(i) = r_{req}(i, j) \cap r_{des}(i)$ 
  If ( $r_{prop}(i) == \{\emptyset\}$ ) {proposeAlt()}
  If (differentSegment == true) {
    If ( $j > i \ \& \ (t_{des,max}(i) - t_{sep}(i) > t_{des,min}(j))$ )
      changeOrder (i, j)
    Elseif ( $(t_{des,min}(i) + t_{sep}(j) < t_{des,max}(j))$ )
      changeOrder (j, i)
    }
  }

  proposeAlt () {
    If ( $j > i \ \& \ des\_j == A \ \& \ des\_i == A$ ) || ( $j < i \ \& \ des\_j == D \ \& \ des\_i == D$ ) {
       $r_{prop}(i) = r_{des}(i, j)$ 
      If  $j > i$  { $r_{prop,min}(i) = t_{nom}(i - 1)$ }
      If  $j < i$  { $r_{prop,max}(i) = t_{nom}(i + 1)$ }
    }
    Elseif ( $j > i \ \& \ des\_j == A \ \& \ des\_i == D$ ) || ( $j < i \ \& \ des\_j == D \ \& \ des\_i == A$ ) {
       $r_{prop}(i) = [t_{nom}(i), t_{nom}(i)]$ 
    }
    Elseif ( $j > i \ \& \ des\_j == A \ \& \ des\_i == I$ ) {
       $r_{prop}(i) = [t_{min}(i), t_{nom}(i)]$ 
    }
    Elseif ( $j < i \ \& \ des\_j == D \ \& \ des\_i == I$ ) {
       $r_{prop}(i) = [t_{nom}(i), t_{max}(i)]$ 
    }
    Else // des (i) == N
      { $r_{prop}(i) = [t_{nom}(i), t_{nom}(i)]$ }
    }
    Return  $r_{prop}(i)$ 
  }

  changeOrder(a, b) {
     $r_{prop,1}(a) = r_{prop}(a)$ 
    If  $a < b$  { $r_{prop,2}(a) = [t_{des,min}(a), t_{des,max}(b)]$ }
    Else { $r_{prop,2}(a) = [t_{des,min}(b), t_{des,max}(a)]$ }
    Return  $r_{prop}(i) = r_{prop,1}(a) \cup r_{prop,2}(a)$ 
  }
}

```

- Si los deseos de ambas aeronaves coinciden, la aeronave i propone el rango de tiempos que recoge sus deseos limitado únicamente por el tiempo nominal de la siguiente aeronave afectada.
- Si los deseos de la aeronave i son contrarios a los de la aeronave j , entonces no ofrece ninguna alternativa, lo que supone que la propuesta se limita a $r_{prop}(i) = [t_{nom}(i), t_{nom}(i)]$.

4. Diseño de los protocolos de negociación

- Si los deseos de la aeronave i son adaptables ofrecerá $r_{prop}(i) = [t_{des,min}(i), t_{nom}(i)]$ cuando la aeronave j desee acelerar y $r_{prop}(i) = [t_{nom}(i), t_{des,max}(i)]$ cuando solicite una desaceleración. Además los valores $t_{des,min}$ y $t_{des,max}$ estarán limitados por el tiempo nominal de una tercera aeronave que preceda o anteceda respectivamente a la aeronave i .

Finalmente, y en el caso de que el segmento de vuelo de la aeronave i sea diferente al de la aeronave j , la aeronave i podrá incorporar a la propuesta anterior un rango de tiempos que les permita a ambas intercambiar el orden de llegada al punto de convergencia.

4.2.5. Ejemplo

El siguiente ejemplo ilustra el proceso de toma de decisiones entre un grupo de aeronaves implicadas en una negociación aire-aire. El ejemplo está basado en el escenario representado en la figura 4.28 y cuyos datos se muestran en la tabla 4.4 (con tiempos expresados en minutos).

En este escenario la aeronave que ocupa la posición sexta en alcanzar el punto de convergencia desea acelerar requiriendo para ello un tiempo de llegada a dicho punto de $t_{req}(6) = 15 < t_{nom}(6)$.

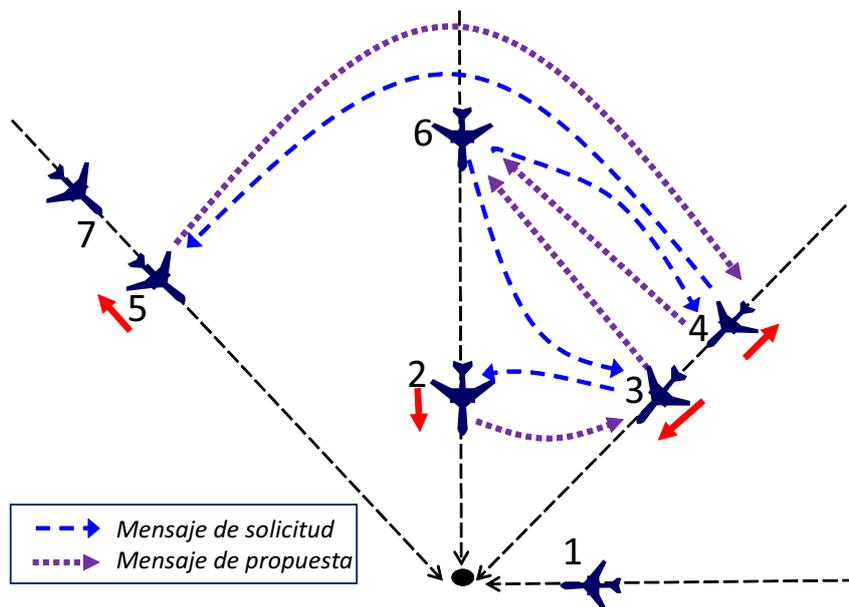


Figura 4.28: Escenario de convergencia de aeronaves

Orden de aeronave	t_{nom}	t_{min}	t_{max}	Deseos	r_{des}	t_{des}
1	6	5	7	I	$t_{min} \leq t \leq t_{max}$	—
2	10	9	12	I	$t_{min} \leq t \leq t_{max}$	—
3	13	11	16	I	$t_{min} \leq t \leq t_{max}$	—
4	16	14	19	I	$t_{min} \leq t \leq t_{max}$	—
5	19	16	22	I	$t_{min} \leq t \leq t_{max}$	—
6	22	14.5	24	A	[14.5,18]	15
7	25	21	28	I	$t_{min} \leq t \leq t_{max}$	—

Tabla 4.4: Datos de aeronaves

Teniendo en cuenta que $t_{nom}(3) < t_{des}(6) < t_{nom}(4)$, esta aeronave inicia una negociación aire-aire de manera simultánea con las aeronaves 3 y 4, que se desarrolla de la manera siguiente:

1. Solicitud de propuestas a la aeronave número 3 y siguientes.

La aeronave 6 envía un mensaje a la aeronave 3 solicitando el tiempo y rango de tiempos $t_{req}(3, 6) = t_{des}(6) - t_{sep}(6) = 15 - 3 = 12$ y $r_{req}(3, 6) = r_{des}(6) - t_{sep}(6) = [11.5, 15]$.

Una vez que haya enviado dicho mensaje se mantiene en estado de espera de propuesta de la aeronave 3.

Cuando la aeronave número 3 recibe el mensaje de solicitud anterior, calcula una propuesta inicial (o solución propia propia) $r_{prop}(3) = r_{req}(3, 6) \cap r_{des}(3) = r_{req}(3, 6)$. Además identifica a las posibles aeronaves afectadas por la solución anterior teniendo en cuenta que $t_{req}(2, 3) = t_{req}(3, 6) - t_{sep}(3) = 12 - 3 = 9 < t_{nom}(2)$.

Por tanto deberá solicitar a la aeronave 2 los tiempos $t_{req}(2, 3) = 9$ y $r_{req}(2, 3) = r_{prop}(3) - t_{sep}(3) = [8.5, 12]$.

De la misma manera, la aeronave 2 calcula $r_{prop}(2) = r_{req}(2, 3) \cap r_{des}(2) = [9, 12]$ y verifica que $t_{req}(1, 2) = t_{req}(2, 3) - t_{sep}(2) = 6 \geq t_{nom}(1) = 6$. Por tanto la aeronave 2 es un último respondedor de esta secuencia por lo que responde a la solicitud de la aeronave 3 con una propuesta $r_{prop}(2, 3) = r_{prop}(2)$ y se mantiene en estado de espera de la solución adoptada por dicha aeronave. Obsérvese además que $r_{prop,min}(2) - t_{sep}(2) \geq t_{nom}(1)$, por lo que no es necesario efectuar ninguna otra limitación sobre dicho intervalo. Finalmente la aeronave 3 utiliza la propuesta anterior para realizar una propuesta a la aeronave 6, $r_{prop}(3, 6) = r_{prop}(2, 3) + t_{sep}(3) = [12, 15]$ y se mantiene a la espera de la solución adoptada por esta última.

2. Solicitud de propuestas a la aeronave 4 y previas.

Este proceso se inicia de manera paralela al anterior. En este caso la solicitud de

4. Diseño de los protocolos de negociación

la aeronave 6 a la 4 consiste en $t_{req}(4, 6) = t_{des}(6) + t_{sep}(4) = 18$ y $r_{req}(4, 6) = r_{des}(6) + t_{sep}(4) = [17.5, 21]$.

A partir de esta solicitud la aeronave 4 calcula una propuesta propia $r_{prop}(4) = r_{req}(4, 6) \cap r_{des}(4) = [17.5, 19]$. Además realiza la evaluación $t_{req}(4, 6) + t_{sep}(5) = 21 \geq t_{nom}(5)$ de manera que el tiempo requerido a la aeronave 5. Por tanto deberá solicitar a esta aeronave, $t_{req}(5, 4) = 21$ y $r_{req}(5, 4) = [20.5, 22]$.

Siguiendo el mismo proceso que las aeronaves anteriores, la aeronave 5 calcula $r_{prop}(5) = [20.5, 22]$. Además, esta aeronave se convierte en último respondedor de esta secuencia debido a que la aeronave 6 es el primer iniciador y por ello la propuesta $r_{prop}(5)$ no le afecta. Lógicamente, tampoco afecta a la aeronave que 7 que le sigue en el mismo tramo, puesto que $r_{prop, max}(5) + t_{sep}(7) \leq t_{nom}(7)$. Por tanto la aeronave 5 propone a la aeronave 4, $r_{prop}(5, 4) = r_{req}(5, 4) = [20.5, 22]$. A partir de esta propuesta, la aeronave 4 propone a la número 6, $r_{prop}(4, 6) = r_{prop}(5, 4) - t_{sep}(5) = [17.5, 19]$.

3. Adopción de soluciones.

Después de los dos procesos anteriores, la aeronave 6 selecciona una solución entre el conjunto de soluciones contenidas en las propuestas recibidas de las aeronaves 3 y 4. Estas soluciones vienen dadas por:

$$r_{sol,3} = r_{prop}(3, 6) + t_{sep}(6) = [15, 18]$$

$$r_{sol,4} = r_{prop}(4, 6) - t_{sep}(6) = [14.5, 16]$$

Entre este rango soluciones, la aeronave es $r_{sol}(6) = r_{sol,3} \cap r_{sol,4} = [15, 16]$ de manera que la solución que más se aproxima a $t_{des}(6)$ es $t_{sol}(6) = 15$. Una vez que la aeronave 6 adopta esta solución, la comunica a las aeronaves 3 y 4 como $t_{sol}(3, 6) = 12$ y $t_{sol}(4, 6) = 18$ respectivamente. A partir de la recepción de estas soluciones la aeronave 3 selecciona y comunica a la aeronave 2 la solución $t_{sol}(2, 3) = 9$ mientras que la aeronave 4 selecciona y comunica a la aeronave 5 $t_{sol}(5, 4) = 21$.

En el ejemplo anterior todas las aeronaves que participan en el proceso de negociación a partir de la solicitud inicial de la aeronave 6 son capaces de flexibilizar sus propuestas. Sin embargo, si se modifica ligeramente este ejemplo para considerar que la aeronave 2 tiene un deseo *nominal* el resultado final es ligeramente diferente. En este caso, cuando la aeronave 3 solicite a la aeronave 2, $t_{req}(2, 3)$ y $r_{req}(2, 3)$, esta última propone $t_{prop}(2, 3) = t_{nom}(2) = 10$ $r_{prop}(2, 3) = [10, 10]$. Entonces $t_{prop}(3, 6) = 13$ y $r_{prop}(3, 6) = [max(r_{prop, min}(2, 3) + t_{sep}(3), r_{prop, min}(3)), r_{prop, max}(3)] = [13, 15]$. Por tanto $r_{sol,3} = [16, 18]$ y $t_{sol}(6) = r_{sol,3} \cap r_{sol,4} = 16$.

4.3. Diseño de procedimientos a partir de protocolos y procesos: estado de procedimientos

Como ya se ha comentado, los protocolos descritos en las dos secciones anteriores forman parte del procedimiento de llegada. De esta manera los procedimientos también se conciben como un *conjunto de protocolos* para coordinar las tareas de planificación, ejecución y modificación de trayectorias en una determinada región espacio-temporal.

En un contexto de gestión automatizada de procedimientos, y para definir el estado de ejecución de dichas tareas, resulta necesario establecer la variable *estado de procedimiento*. Dicha variable se define a partir de la combinación de los estados de ejecución de trayectoria descritos en el *capítulo 2* y de los estados que caracterizan los procesos de negociación desarrollados en este capítulo.

En la figura 4.29 se muestra el diagrama de estados de un procedimiento de navegación¹⁵. De acuerdo a dicha figura, todo procedimiento incluido en la lista de procedimientos puede encontrarse dentro de uno de los cinco estados siguientes mutuamente excluyentes entre sí: *Pendiente Planificación (PP)*, *Planificación (P)*, *Esperando Ejecución (EE)*, *Ejecución (E)*, *Fin de Ejecución (FE)*.

De acuerdo al esquema propuesto en la sección 3.1.2 para definir los escenarios de gestión de procedimientos, la lista de procedimientos contiene aquellos procedimientos de navegación que resulten de un proceso inicial de planificación de vuelo puerta a puerta.

Para indicar que un procedimiento requiere una planificación que actualice sus datos de trayectoria antes de ser ejecutada se define el estado *Pendiente de planificación*. Todos los procedimientos que se encuentren en este estado se organizan en la lista de procedimientos de acuerdo a su previsible orden de planificación.

El estado de *Planificación* es un estado que contiene los siguientes sub-estados: *Calculando TPU*, *Esperando negociación* y *Negociando TPU*. A su vez el estado negociando TPU está caracterizado por los estados de la negociación aire-tierra descritos en la sección 4.1.4.2 (figura 4.10).

Finalizada la negociación, el estado *Planificación* transita al estado *Esperando por ejecución*. Obviamente, tanto desde el estado *Negociando TPU* como desde el estado *Esperando por negociación* es posible pasar al estado *Calculando TPU* cuando eventos no previstos durante esta fase de planificación requieran una nueva negociación.

El procedimiento se encuentra en estado de *Ejecución* cuando la aeronave comienza a volar la trayectoria asociada al mismo. Dentro de este estado coexisten tres estados que

¹⁵En esta Tesis, se considerará que la variable de estado del procedimiento ATC resulta de la superposición de los estados de los procedimientos de navegación de las aeronaves bajo su responsabilidad. Sin embargo, la completa caracterización del diagrama de estados de los procedimientos ATC implicará tener en cuenta además las tareas de coordinación tierra-tierra.

4. Diseño de los protocolos de negociación

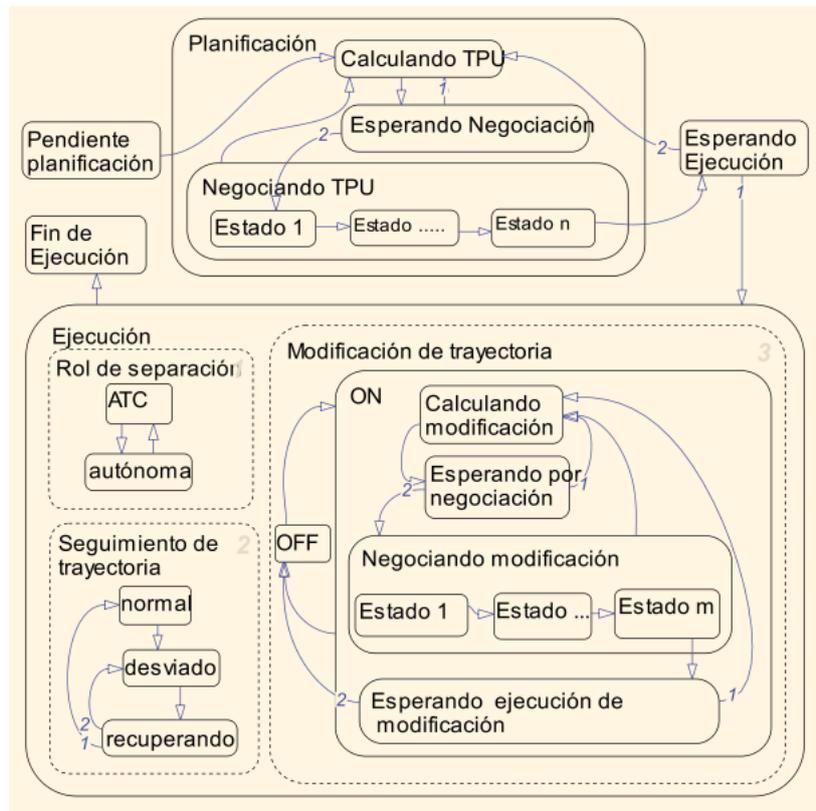


Figura 4.29: Estados de procedimiento

se pueden ejecutar de forma paralela (de ahí que se hayan simbolizado a través de líneas discontinuas). Uno de estos estados identifica qué agente (aeronave o ATC) tiene asignado el *rol de separación*. El segundo describe el estado de seguimiento de la trayectoria: seguimiento *normal*, *desviación* o *recuperando desviación*. Por último un tercer estado se activa cuando surgen contingencias (por ejemplo un conflicto) que requieran modificar la trayectoria actual. El estado activado (*on*) de la modificación de trayectoria contiene cuatro sub-estados excluyentes entre sí: *Calculando modificación* (de trayectoria), *Esperando por negociación*, *Negociando modificación*, y *Esperando por ejecución de modificación*. A su vez el proceso de negociación viene caracterizado por los estados descritos en la sección 4.2.4 (figura 4.27).

Por otra parte, y con la finalidad de que los sistemas de aeronave y de ATC tengan acceso a la información relativa a cada procedimiento, éstos últimos pueden modelarse como un objeto *software* cuya plantilla contenga los atributos del procedimiento. Teniendo en cuenta los parámetros asociados a los protocolos, estos atributos son los siguientes:

- Tipo de procedimiento: *Salida, En-Ruta, Llegada-Aproximación*.
- Estado del procedimiento: los descritos anteriormente.

- Puntos significativos del procedimiento:
 - Puntos para planificación de siguiente procedimiento: básicamente punto en el que deben estar terminados los cálculos previos de la trayectoria prevista de la aeronave antes de ser negociada con el ATC, así como el punto de transición al siguiente procedimiento.
 - Puntos operacionales: Punto equit tiempo (PET), Punto de no retorno (PNR), TOD, etc.
- Trayectoria a ejecutar. La trayectoria viene a través de una instancia que contenga un modelo de intenciones como el descrito en el *capítulo 2*.
- Argumentos de la negociación. Están constituidos por los valores de los atributos que específicamente se desean modificar, bien por iniciativa de la aeronave o bien a requerimiento del ATC u otras aeronaves. Por tanto estos argumentos vienen dados por valores específicos de los puntos significativos o de la trayectoria del procedimiento actual o del siguiente; por ejemplo los datos relativos a una trayectoria completa, a una desviación espacial respecto a la trayectoria actual, a una variación de los tiempos de llegada a determinados puntos, etc. La modificación de estos argumentos no siempre requerirá la negociación. Así por ejemplo, si se desea modificar el tiempo de llegada a un punto específico de la ruta, se podrá realizar la modificación si en la negociación de dicha trayectoria se ha especificado una ventana de tiempo de tolerancia que permita realizar la modificación sin solicitar una modificación de dicha ventana de tiempos.
- Protocolos: listado de protocolos de negociación que forman parte del procedimiento.

A partir de esta caracterización de los procedimientos resulta evidente que su diseño puede realizarse a partir de protocolos y sus procesos asociados de acuerdo al esquema metodológico empleado en las dos secciones anteriores. Teniendo en cuenta además que la arquitectura interna de los agentes que se llevará a cabo en el capítulo siguiente está orientada a la implementación de los procesos derivados de los protocolos, es manifiesta la idoneidad la metodología *Prometheus* para ligar el diseño de los procedimientos al diseño de los sistemas funcionales para su gestión.

4.4. Conclusiones

Los protocolos de negociación propuestos en este capítulo forman parte de las interacciones entre agentes para la planificación estratégica y táctica de trayectorias.

4. Diseño de los protocolos de negociación

El primero de los protocolos consiste en un protocolo de negociación aire-tierra que forma parte de la planificación estratégica de trayectorias de llegada tanto desde la perspectiva de aeronave como desde la del ATC.

El segundo es un protocolo de negociación aire-aire. Este protocolo permite la planificación táctica de modificaciones de trayectorias de llegada en fase de ejecución cuando la separación está delegada en las aeronaves. Por tanto, su diseño también supone incorporar una nueva capacidad a las actuales propuestas de prototipos ASAS-CDTI para la auto-separación y convergencia en procedimientos de llegada.

Los protocolos anteriores se consideran vinculados a procesos automáticos realizados por los sistemas de aeronaves y de ATC. En su diseño se ha tenido en cuenta la posibilidad de intervención de la tripulación y el controlador de tráfico aéreo, bien para supervisar la evolución del proceso o bien para participar en la toma de decisiones de sus respectivos sistemas introduciendo preferencias y/o restricciones en los mismos.

Para cada uno de los protocolos se han definido los siguientes elementos: el escenario operacional en el que se lleva a cabo la negociación, los roles de los agentes implicados y el protocolo de comunicaciones mediante el cual los agentes intercambian propuestas. Además se diseñaron los procesos internos que llevan a cabo dichos agentes, identificando los distintos estados de la negociación. Desde esta perspectiva el diseño de protocolos y procesos equivale al diseño de procedimientos operacionales para la navegación y el control de tráfico.

El escenario operacional asociado al protocolo de negociación aire-tierra está constituido por un conjunto de áreas operacionales. Entre estas áreas destaca por su novedad frente a los escenarios actuales, el *Área de acuerdos*.

Las dimensiones *Área de acuerdos* están definidas en términos de tiempo de llegada al punto de inicio de la trayectoria de llegada. El rango de tiempos característicos de este área considera el tiempo requerido para la negociación así como un tiempo equivalente al anterior para la recepción de solicitudes de trayectorias y el tiempo requerido por las aeronaves para adaptar su estado a la trayectoria acordada.

El tiempo de duración de la negociación fue analizado a partir de la simulación de diversos escenarios de negociación. Los escenarios de negociación fueron caracterizados a través del índice de aceptación de propuestas de los evaluadores de aeronaves y de ATC.

El escenario operacional anterior también se utilizó para desarrollar el protocolo de negociación aire-aire. En este caso los deseos y propuestas de la aeronave están definidos por funciones expresadas en forma de intervalos de tiempos preferentes de llegada a un punto de convergencia de rutas. En este caso la negociación se realiza de forma multi-bilateral y encadenada entre las aeronaves implicadas.

A partir de los protocolos anteriores, se diseñaron sus correspondientes procesos tanto

a nivel de ATC como de aeronave. Los protocolos (con sus correspondientes escenarios operacionales) y los procesos son los elementos integrantes de los procedimientos de navegación y de control de tráfico aéreo. De esta forma, a partir del diseño anterior, es posible incorporar nuevas estrategias de negociación para las cuales sigue siendo válido el escenario operacional y los sistemas generadores y evaluadores de propuestas de los agentes aeronaves y ATC.

Considerando la planificación y ejecución de trayectorias como tareas integrantes de la gestión de los procedimientos, dichos procedimientos han sido caracterizados desde el punto de vista dinámico a través de la variable de estado de procedimiento. Para ello se ha definido la variable estado de procedimiento la cual agrupa los datos relativos a los estados del proceso de negociación y a los estados de ejecución de la trayectoria. Esta variable facilita la automatización de la gestión de procedimientos y proporcionan una adecuada comprensión de su estado y evolución desde la perspectiva de pilotos y controladores. Estos datos además pueden intercambiarse con los sistemas de tierra y otros sistemas de aeronave para automatizar los mecanismos de vigilancia y coordinación en escenarios TBO.

4. Diseño de los protocolos de negociación

Capítulo 5

Modelado de los agentes críticos: agente Aeronave y agente ATC

Una vez establecida la arquitectura del sistema (*capítulo 3*) y conocidos los principales mecanismos de interacción entre sus agentes (*capítulo 4*), en este capítulo se lleva a cabo el diseño interno de los agentes más críticos: el agente aeronave y el agente ATC¹.

La metodología *Prometheus* propone un diseño de agentes basado en el modelo BDI en el que cada agente tiene creencias sobre el entorno (bases de datos), deseos (definidos por los objetivos a alcanzar) e intenciones (recogidas en planes que se encargan de actualizar la lista de objetivos en cada instante y de implementar las tareas que permitan lograrlos).

Por lo tanto los planes constituyen distintas maneras de responder a un evento y a través de ellos se implementan tanto las funcionalidades como los procesos del agente. Cada plan consta de un conjunto de tareas (o sub-tareas) que se expresan mediante estructuras y librerías de programación convencionales. Los eventos consisten en la llegada de una percepción, de un mensaje procedente de otro agente o de un mensaje interno generado por un plan específico. Hay que recordar que la metodología *Prometheus* parte de los objetivos y las funcionalidades del sistema para organizar los distintos planes de los agentes agrupándolos en *capacidades*. Como ya se ha comentado, las capacidades son módulos internos del agente, cada uno de los cuales tiene asignado un determinado objetivo y que, generalmente, se construyen a partir de una o más funcionalidades². Algunas capacidades

¹La consideración de estos dos agentes sobre los otros que componen el sistema se debe por una parte a que son éstos los que deben adaptar mutuamente sus respectivos objetivos, y por otra, a que la principal finalidad del modelo conceptual propuesto en esta Tesis consiste en proponer un diseño funcional de los mismos a los efectos de capacitarlos para llevar a cabo operaciones TBO automatizadas. Desde este punto de vista, los objetivos y funcionalidades de los demás agentes permiten caracterizar las interacciones de ATC y aeronaves con estos agentes con el fin de obtener la información que necesitan para la toma de decisiones.

²Considerando el carácter iterativo del proceso de diseño del sistema multiagente, esta etapa es útil además para revisar el modelo conceptual, refinando o modificando la información relativa a objetivos y funcionalidades.

5. Modelado de los agentes críticos: agente Aeronave y agente ATC

pueden ser descritas mediante nuevas capacidades de ámbito inferior proporcionando así múltiples capas dentro del diseño detallado del agente. Ello facilita la comprensión de la estructura y el comportamiento del agente. Al nivel más bajo, las capacidades contienen planes que intercambian eventos y datos con otros planes pertenecientes tanto a la propia capacidad o a las demás.

El proceso de diseño de los agentes aeronave y ATC realizado en este capítulo consta de dos etapas principales.

En la primera de ellas se propone una arquitectura para cada agente basada en las capacidades requeridas por éstos de modo que puedan lograr sus objetivos e implementar sus funcionalidades. A partir de estas capacidades se ha construido el diagrama de arquitectura de agente en el que junto a estas capacidades se muestra el flujo de mensajes entrantes y salientes de acuerdo a los protocolos desarrollados en el *capítulo 4*. La notación empleada para representar los diversos elementos del diagrama de diseño de agente se muestra en la figura 5.1.

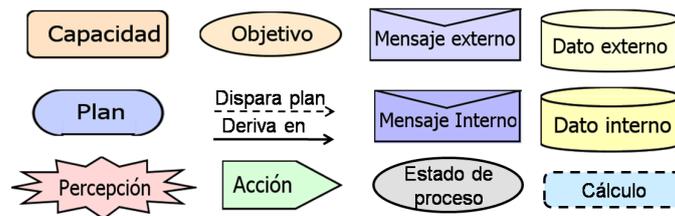


Figura 5.1: Notación empleada para representar los elementos diagrama de agente

En la segunda etapa se lleva a cabo el diseño interno de cada capacidad estableciendo los planes que le permiten alcanzar los objetivos asignados a ésta o que implementan funcionalidades. Estos planes implementan por tanto las tareas y las funcionalidades recogidas en los protocolos. En nuestro caso particular, los procesos vinculados a los protocolos de negociación aire-tierra y aire-aire descritos en el *capítulo 4* han sido asociados a sus correspondientes planes encargados de realizar las tareas que se especificaron en dichos procesos.

La implementación *software* de las estructuras de control que ejecutan las tareas contenidas en los planes dependen de la plataforma de programación de agentes y por tanto no forman parte del modelo conceptual. Sin embargo, y a los efectos de ilustrar el grado de detalle y adaptabilidad que ofrece el modelo propuesto para desarrollar a partir de él un modelo ejecutable, en la sección 5.4 se establece un conjunto de criterios para la elección de la plataforma y de pautas para su implementación. Dichos criterios y pautas se basan en el análisis de la arquitectura interna y del comportamiento de los agentes diseñados en este capítulo así como de los recursos que ofrecen las plataformas de implementación de agentes más extendidas actualmente.

5.1. Agente Aeronave

5.1.1. Arquitectura

Considerando los objetivos y las funcionalidades del agente aeronave descritas en el *capítulo 3*, éste ha sido configurado a través de las capacidades y sub-capacidades siguientes [Canino et al. 2009]:

1. Gestión de información de entorno de aeronave.
2. Gestión de alarmas de sistemas de aeronave.
3. Detección y resolución de conflictos.
 - a) Detección de conflictos.
 - b) Solución inicial a conflicto.
4. Gestión de contingencia a bordo.
5. Gestión de procedimientos de navegación.
 - a) Planificación de vuelo.
 - b) Ejecución de procedimiento.
 - c) Re-planificación de procedimiento en ejecución.
 - d) Planificación de siguiente procedimiento.
6. Seguimiento de trayectoria.

De las seis capacidades anteriores, las tres primeras generan eventos para la capacidad de *Gestión de contingencias a bordo* y ésta a su vez, genera eventos para la capacidad de *Gestión de procedimientos de navegación*. Esta última capacidad contiene los planes que implementan los protocolos de negociación descritos en el *capítulo 4*. También genera eventos para ejecutar la trayectoria de la aeronave mediante la capacidad *Seguimiento de trayectoria*.

Estas seis capacidades principales junto a sus interfaces dan lugar al diagrama del agente de aeronave que se muestra en la figura 5.2.

5. Modelado de los agentes críticos: agente Aeronave y agente ATC

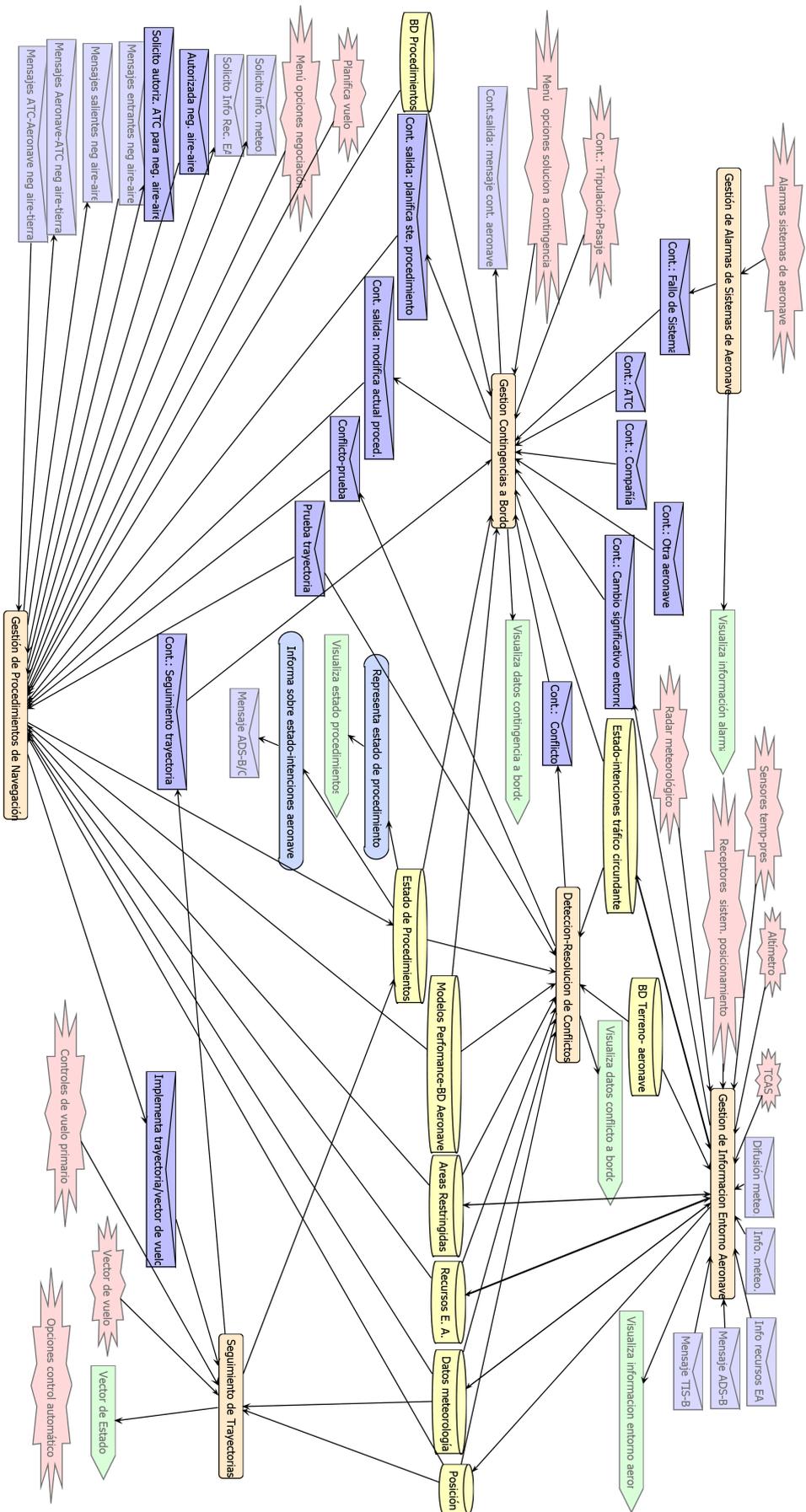


Figura 5.2: Capacidades del agente aeronave

La finalidad y características básicas de cada una de las capacidades principales que aparecen en dicho diagrama son las siguientes:

1. Gestión de información de entorno aeronave.

Esta capacidad se encarga de mantener actualizado el conocimiento de las condiciones en su entorno. Tal y como se recoge en la especificación del sistema, este conocimiento se obtiene a partir de los datos procedentes de los sensores de la propia aeronave y de los mensajes de otros agentes. Por otra parte, cada vez que se produce un cambio significativo en la información de entorno, éste se recoge mediante un evento de contingencia de cambio significativo para ser tratado posteriormente por la capacidad encargada de la gestión de contingencias.

2. Gestión de alarmas de sistemas de aeronave.

Esta capacidad analiza las salidas del conjunto de alarmas de los sistemas de aeronaves para generar eventos de contingencia que informa sobre dichas alarmas.

3. Detección y resolución de conflictos.

Se encarga de detectar conflictos con otras aeronaves u otros obstáculos (terreno, zonas de meteorología adversa, etc.). También proporciona soluciones para la resolución del conflicto. Estas soluciones son planteadas como propuestas iniciales de la aeronave en los procesos de negociación previos a la modificación de los atributos del correspondiente procedimiento de navegación. Los datos de salida de esta capacidad (conflicto y soluciones preferentes para su resolución) se recogen a través de un evento de contingencia de conflicto.

4. Gestión de contingencias a bordo.

Esta capacidad recoge los eventos de contingencia bien producidos por las propias capacidades de la aeronave o bien recibidos vía mensajes de otros agentes. A partir de dichas entradas se generan eventos de contingencia de salida destinados a modificar el procedimiento en ejecución y/o los procedimientos pendientes de ejecutar³.

5. Gestión de procedimientos de navegación.

Teniendo en cuenta los objetivos asignados a esta capacidad, la misma tiene la finalidad de gestionar los procesos de planificación, implementación o modificación de la trayectoria para cada fase del vuelo. De esta manera, la capacidad calcula y

³Obsérvese que tanto los eventos de entrada como los de salida a esta capacidad se definen como eventos de contingencia. Los eventos de entrada proporcionan información de las características de la contingencia (incluidos datos para implementar posibles soluciones). Los eventos de salida contienen las acciones procedimentales que deberá llevar a cabo otra capacidad dedicada a la gestión de los procedimientos a bordo.

5. Modelado de los agentes críticos: agente Aeronave y agente ATC

mantiene actualizados los datos de la trayectoria que deberá seguir la aeronave. Se han previsto distintos grados de automatización de la gestión de las tareas anteriores permitiendo la intervención del piloto en distintas etapas y niveles de esta gestión. Por tanto, esta capacidad extiende las funcionalidades de gestión de ruta de los actuales FMS para incorporar procesos de toma de decisión destinados a definir y a actualizar los datos de trayectoria 4D durante el vuelo.

6. Seguimiento de trayectorias.

Esta capacidad contiene las funcionalidades de control de vuelo que necesita la aeronave para poder volar una determinada trayectoria, basándose bien en la información que proporciona el evento *Implementa trayectoria/vector de vuelo* procedente de la capacidad *Gestión de procedimientos de navegación*, o bien en los comandos de vuelo recibidos como percepción procedente de la consola del piloto. De esta forma la aeronave será capaz de volar en modo automático trayectorias 4D-3.5D-3D así como vectores de vuelo. Por tanto la capacidad *Seguimiento de trayectorias* implementa las funcionalidades del sistema de seguimiento de trayectorias 4D (FMS4D) propuesto en el *Capítulo 2*.

5.1.2. Descripción de las capacidades

5.1.2.1. Gestión de información de entorno de aeronave

El diagrama de esta capacidad está representado en la figura 5.3. Como se mencionó anteriormente, esta capacidad tiene la finalidad de mantener actualizada la base de datos de creencias de la aeronave respecto a su entorno. Estos datos se refieren a: *(i)* la posición instantánea de la aeronave, *(ii)* las áreas restringidas al vuelo, *(iii)* los recursos de espacio aéreo para la navegación (que contiene los datos del escenario operacional en el que se desarrolla el procedimiento) y *(iv)* el estado e intenciones del tráfico circundante.

Por tanto los planes que forman parte de esta capacidad tienen la finalidad de actualizar e integrar la información procedente de los sensores de la aeronave o de los demás agentes para producir los datos anteriores. También generan un evento de contingencia cada vez que se produce un cambio significativo en los datos del entorno (por ejemplo el repentino cambio de las predicciones meteorológicas, de las rutas de llegada, etc.).

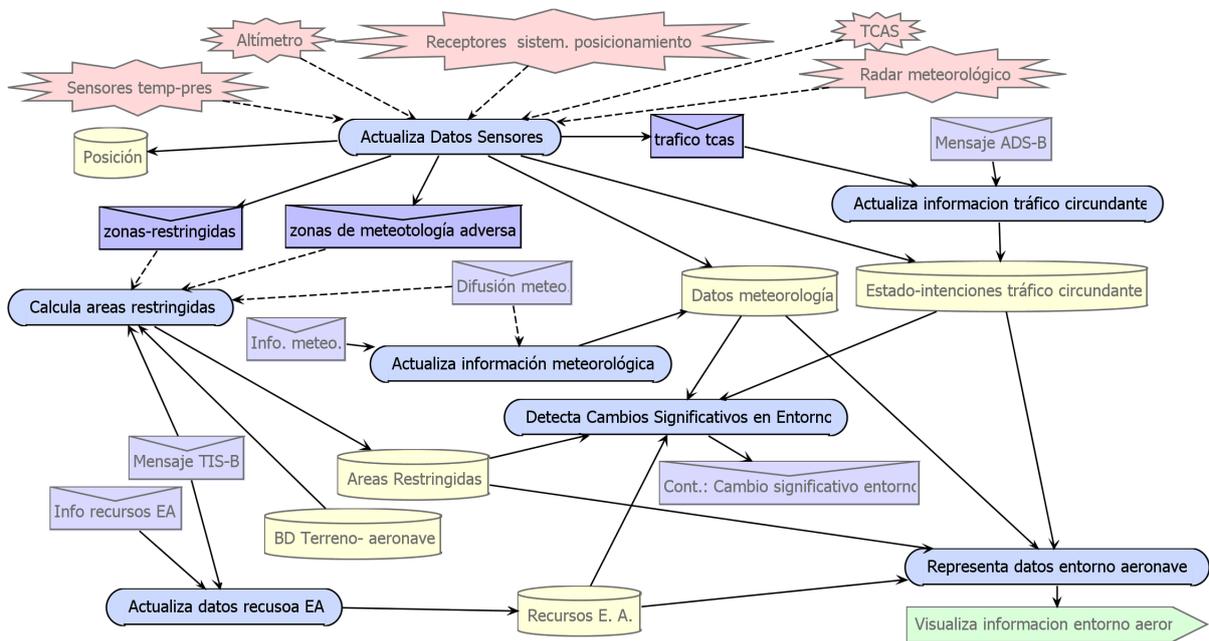


Figura 5.3: Capacidad gestión de información de entorno

5.1.2.2. Gestión de alarmas de sistemas de aeronaves

Esta capacidad contiene aquellos planes encargados de proporcionar datos de las características de la alarma a los efectos de incluirla en un evento de contingencia. En ocasiones estos avisos requieren llevar a cabo determinados procedimientos anormales y de emergencia especificados en las correspondientes listas de procedimientos de la aeronave. En este sentido, el sistema de gestión de alarmas proporciona la información necesaria para que la capacidad de gestión de contingencias, que más adelante se describe, seleccione el procedimiento requerido.

5.1.2.3. Detección y resolución de conflictos a bordo

Esta capacidad está constituida por dos sub-capacidades (ver figura 5.4). Una de ellas se encarga de la detección del conflicto y la otra tiene encomendada la búsqueda de opciones para su resolución.

La sub-capacidad *Detección de conflicto* está representada en la figura 5.5 (a). Éste contiene distintos planes que implementan otros tantos modelos de detección de conflicto. Así la capacidad de integrar varios modelos con el fin de caracterizar adecuadamente el conflicto en función del estado de la aeronave. Esta caracterización del conflicto facilita la elección posterior del método de búsqueda de soluciones. Por otro lado, los planes

5. Modelado de los agentes críticos: agente Aeronave y agente ATC

de la capacidad de resolución de conflicto (o sub-capacidad *Solución inicial a conflicto* representada en la figura 5.5 (b) implantan distintos algoritmos para definir y establecer un conjunto de soluciones jerarquizadas. Estas soluciones son utilizadas como propuestas iniciales de la aeronave en los casos de que la resolución del conflicto exija una negociación con el ATC o con otras aeronaves.

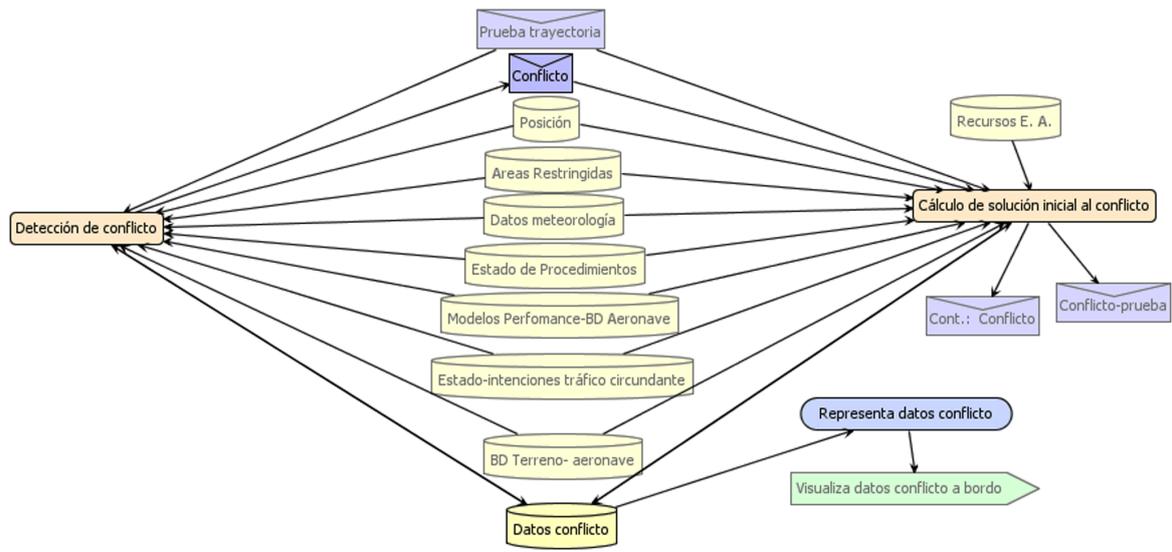


Figura 5.4: Capacidad detección y resolución de conflictos

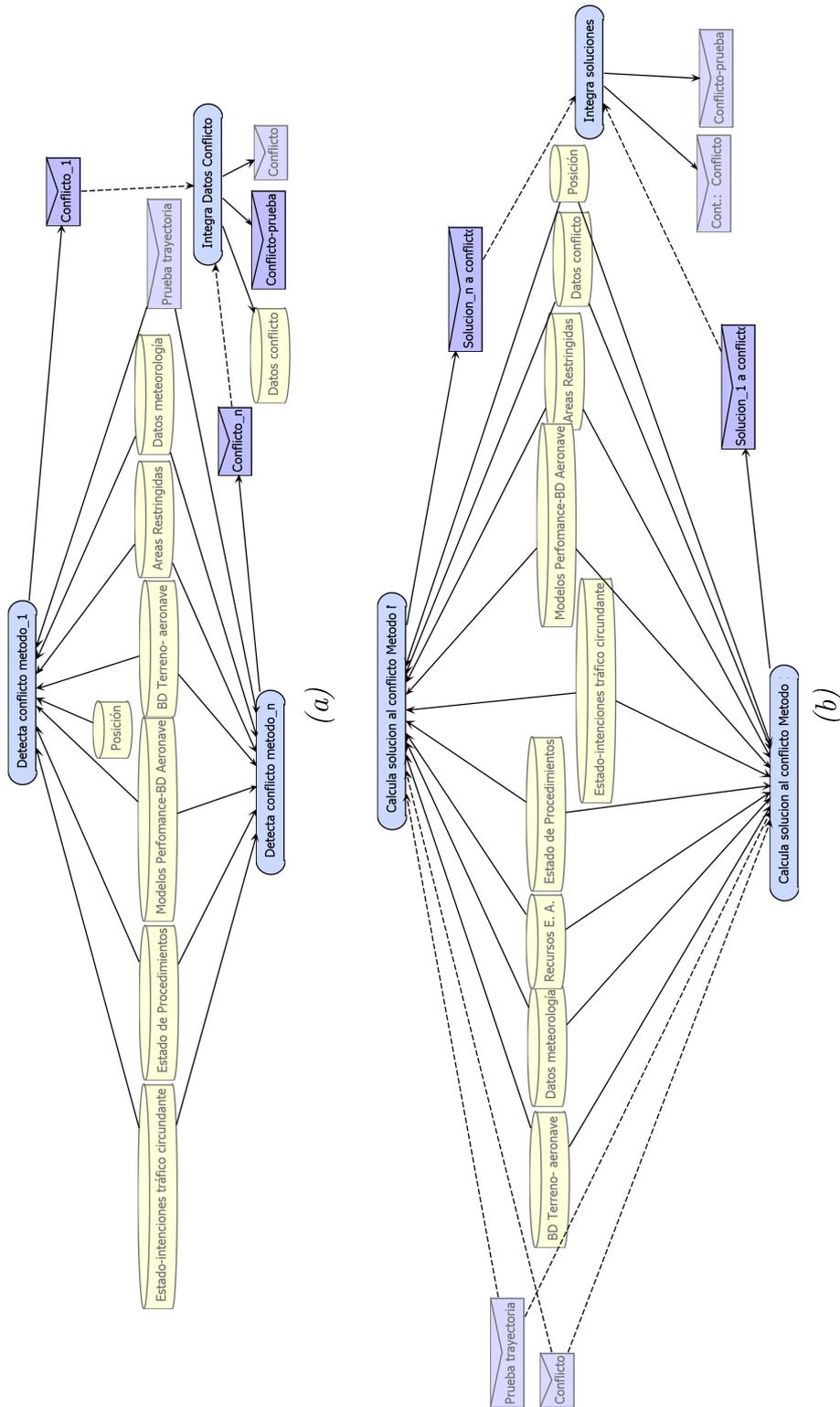


Figura 5.5: Capacidades: (a) Detección de conflicto y (b) Solución inicial a conflicto

5.1.2.4. Gestión de contingencias a bordo

Esta capacidad, representada en la figura 5.6, tiene por objeto analizar los distintos eventos de contingencias que se producen durante la navegación y deliberar sobre las modificaciones que haya que realizar en el procedimiento actual o en la planificación del siguiente procedimiento.

Los eventos de contingencias de entrada a la capacidad son los siguientes :

- *Contingencias de ATC*: por ejemplo, cambios a realizar sobre los acuerdos adoptados previamente.
- *Contingencias de otras aeronaves*: requerimientos de otras aeronaves para resolver un conflicto, alterar una secuencia de llegada, etc.
- *Contingencias de compañía*: requerimientos de la compañía para modificar el plan de vuelo previsto.
- *Contingencias de fallo de sistema*: maniobras proporcionadas por la capacidad de *Gestión de alarmas de sistemas de aeronave* de acuerdo a los procedimientos de operación normales, anormales o de emergencia.
- *Contingencias de conflicto*: proporcionan información de la solución inicial propuesta por el sistema encargado de detectar y resolver los conflictos.
- *Contingencias de cambio significativo de entorno*: información sobre cambios significativos detectados por la capacidad de *Gestión de Información de Entorno de Aeronave*.
- *Contingencias de tripulación o pasaje*: definidas por la tripulación a través de un menú de opciones.

Las soluciones adoptadas por dicha capacidad son presentadas a través de dos tipos de eventos de contingencia de salida: *Contingencia modifica procedimiento en ejecución* y *Contingencia replanifica siguiente procedimiento*. Cada uno de estos eventos contienen datos sobre el tipo de acciones a llevar a cabo para modificar la trayectoria actual de la aeronave o para planificar la trayectoria del siguiente procedimiento. Por último hay que señalar que la intervención del elemento humano en el proceso de toma de decisión se realiza a través de un menú específico para elegir entre los distintos tipos de opciones sobre soluciones a contingencia.

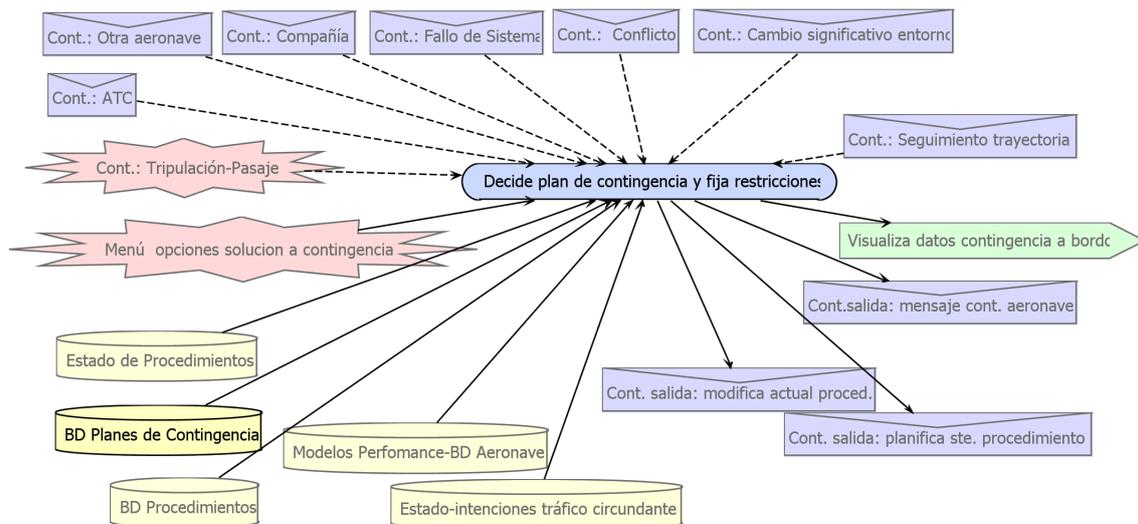


Figura 5.6: Capacidad gestión de contingencias a bordo

5.1.2.5. Gestión de procedimientos de navegación

El diseño de esta capacidad se basa en el correspondiente escenario definido en el *capítulo 3* así como en los atributos y acciones de los procedimientos de navegación descritos en la sección 4.3.

Esta capacidad está constituida a su vez por otras cuatro sub-capacidades (figura 5.7):

1. *Planificación de vuelo*
2. *Ejecución de procedimiento*
3. *Replanificación de actual procedimiento*
4. *Planificación de siguiente procedimiento*

La sub-capacidad de *Planificación de vuelo* (figura 5.8) contiene dos planes principales. El primero de ellos calcula y negocia con el ATC de salida la trayectoria preferente de usuario para todas las fases del vuelo. Este plan es disparado por el evento *Inicia gestión de navegación* generado por el piloto a través de la consola de control. Una vez calculada la trayectoria, un segundo plan se encarga de rellenar los atributos de la plantilla de procedimientos que hayan sido acordados en la fase anterior. El procedimiento de llegada puede planificarse en esta primera fase de planificación del vuelo puerta-a-puerta o bien durante la fase de ruta. La planificación inicial del procedimiento de llegada durante la planificación del vuelo requiere, en cualquier caso, una negociación aire-tierra durante la fase de ruta para actualizar los atributos de dicho procedimiento. Esta actualización servirá para confirmar la trayectoria inicialmente acordada o para generar otra diferente en función de las circunstancias sobrevenidas durante el vuelo.

5. Modelado de los agentes críticos: agente Aeronave y agente ATC

La sub-capacidad *Ejecución de procedimiento* (véase figura 5.9) realiza las acciones del procedimiento activo. Las acciones correspondientes del procedimiento en ejecución son las siguientes: (i) transferir los datos de la trayectoria activa a los sistemas de seguimiento de trayectoria (mensaje *Ejecuta trayectoria-vector*), (ii) generar el evento *Planifica siguiente procedimiento* que dispara las actividades de correspondiente capacidad, (iii) activar el siguiente procedimiento una vez finalizado el actual (evento *Fin procedimiento en ejecución*) y (iv) actualizar los atributos del procedimiento en ejecución y/o de otros procedimientos de la lista en base a los acuerdos obtenidos mediante negociación.

Como consecuencia de las tareas anteriores, esta capacidad mantiene actualizada la información relativa al estado de los procedimientos tanto en modo ejecución como en modo planificación.

La sub-capacidad *Planificación siguiente procedimiento* (figura 5.10) se encarga de seleccionar y planificar el siguiente procedimiento de la lista. Las tareas de planificación de los procedimientos correspondientes a las distintas fases del vuelo están implementadas en planes específicos. Uno de estos planes es el encargado de la *planificación de llegada y aproximación* y cuyo contenido corresponde al protocolo de negociación aire-tierra descrito en la sección 4.1. La elección de estos planes la lleva a cabo el plan *Selección de procedimiento e inicio de planificación*. Este plan está disparado por un evento generado durante la ejecución del procedimiento actual y/o un evento de contingencia específico. Además el plan genera nuevos eventos que a su vez disparan nuevos planes destinados a la planificación de diferentes procedimientos.

La sub-capacidad *Replanificación de actual procedimiento* mostrada en la figura 5.11, gestiona las tareas de replanificación de los atributos de un procedimiento en modo ejecución. En el caso de que este procedimiento sea el de llegada se pueden activar otros tantos planes para modificar de formas diversas sus atributos. Una de las posibles modificaciones consiste en alterar la secuencia de llegada de las aeronaves. Esta tarea es realizada por el plan *Modificación de secuencia de llegada-autoseparación* de la figura y cuyo contenido corresponde al protocolo aire-aire descrito en la sección 4.2.

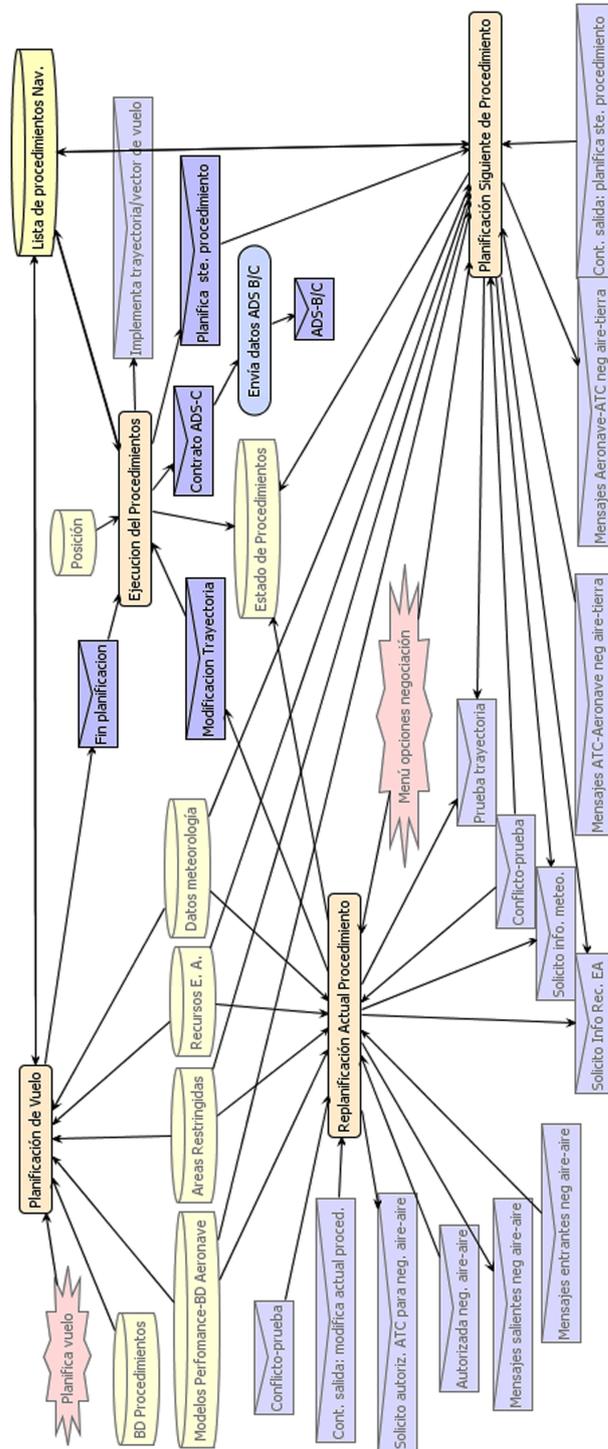


Figura 5.7: Capacidad gestión de procedimientos de navegación

5. Modelado de los agentes críticos: agente Aeronave y agente ATC

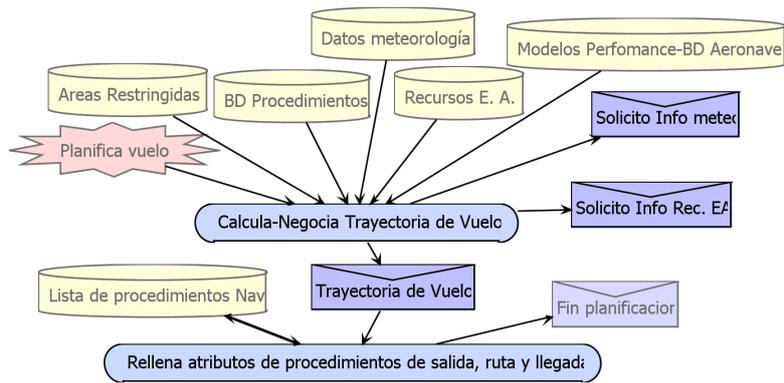


Figura 5.8: Capacidad planificación de vuelo

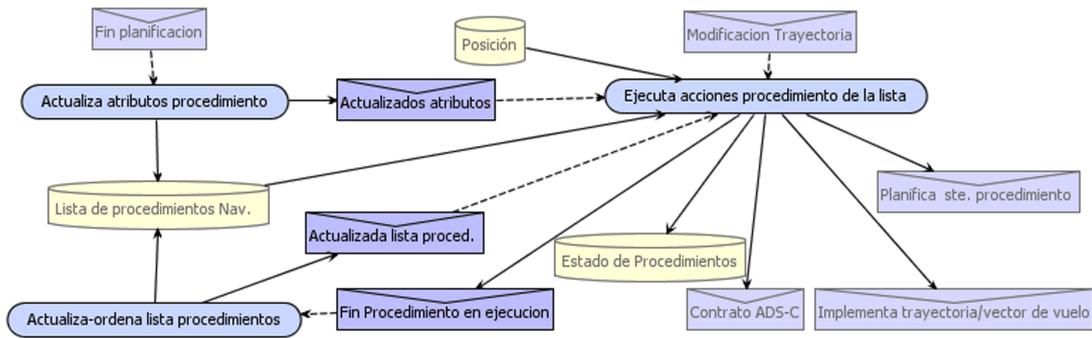


Figura 5.9: Capacidad ejecución de acciones de procedimiento

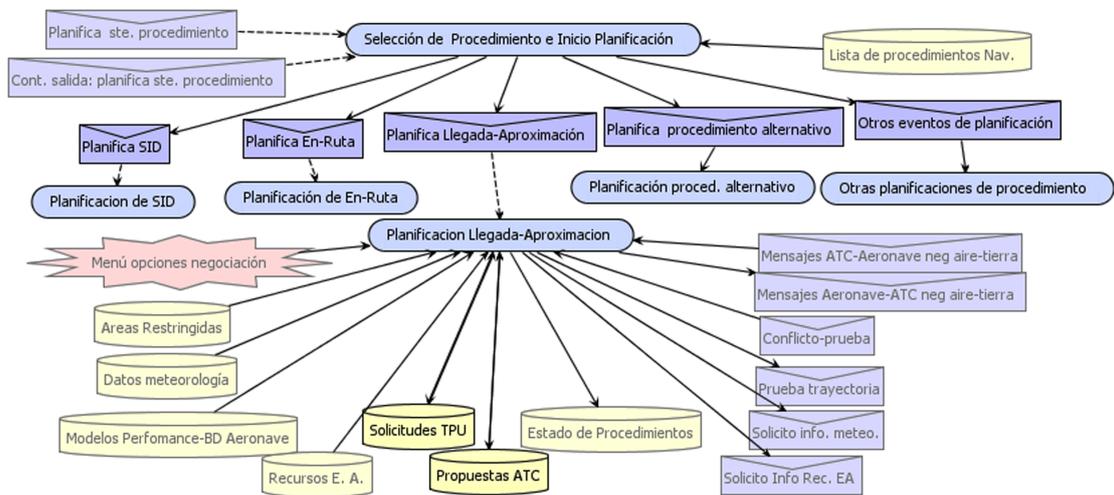


Figura 5.10: Capacidad planificación siguiente procedimiento

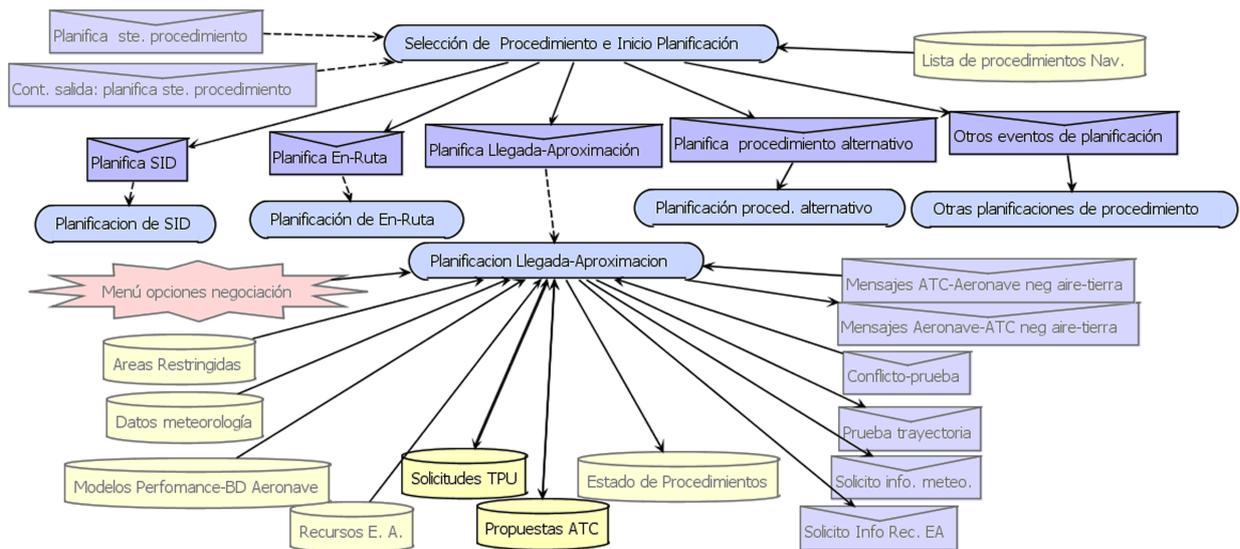


Figura 5.11: Capacidad replanificación actual procedimiento

5.1.2.6. Seguimiento de Trayectorias

Los planes de esta capacidad llevan a cabo las tareas del control de vuelo de la aeronave. Los datos que requiere esta capacidad para ejecutar la trayectoria son proporcionados por el evento *Ejecuta trayectoria-vector* de la capacidad *Gestión de procedimientos de navegación* → *Ejecución de acciones del procedimiento*. Este evento dispara el plan *Actualiza trayectoria a ejecutar* (véase figura 5.12). Dicho plan identifica el formato del modelo de intenciones sobre el que se debe ejecutar la trayectoria. Si el formato es una trayectoria 4D, 3.5 D o 3D éste es ejecutado por el plan *FMS4D* el cual implementa el modelo propuesto en la sección 2.6. Por el contrario, si se trata de un vector de navegación derivado de una acción de control táctico, ésta será ejecutada conjuntamente por el piloto automático y el control automático de gases. Las actuaciones de estos sistemas están implementadas en el plan *AP/AT (Auto-Pilot/Auto-Throttle)*. El plan *AP/AT* puede ser activado por el piloto desde la consola de comandos de control automático de vuelo o bien puede ser sustituido por la actuación manual del piloto sobre los mandos de vuelo y de potencia. El plan *Dinámica de la aeronave* representa el comportamiento aerodinámico de la aeronave de acuerdo al modelo descrito en la sección.

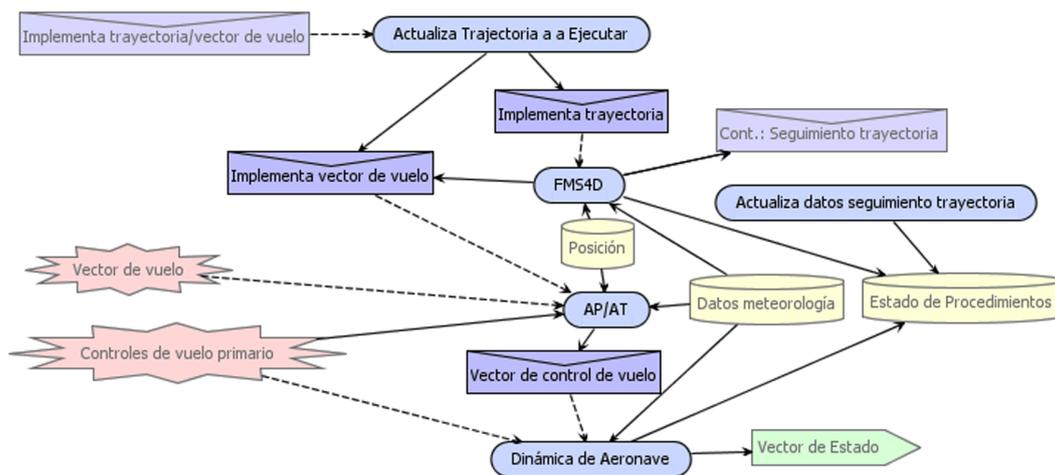


Figura 5.12: Capacidad seguimiento de trayectoria

5.2. Agente ATC

5.2.1. Arquitectura

El diagrama de arquitectura del agente ATC se muestra en la figura 5.13. Este agente está configurado alrededor de cinco capacidades principales y de un plan específico para generar informes ATM. Algunas de estas capacidades tienen características muy similares a las de las aeronaves. Es el caso de aquellas que contienen las funcionalidades para mantener actualizada la información en el Área Terminal, detectar y resolver conflictos de tráfico o para gestionar contingencias. Otras en cambio están destinadas a implementar la gestión de procedimientos de ATC y la monitorización de tráfico. Las capacidades y sub-capacidades definidas para el agente ATC son las siguientes:

1. Gestión de información de entorno de ATC.

Contiene las funcionalidades destinadas a mantener actualizada la información que afecta al tráfico en la región de actuación del ATC.

2. Detección y resolución de conflictos de tráfico.

Esta capacidad contiene la lógica de detección y resolución de conflictos a largo, medio y corto plazo. Para ello utiliza la información relativa al estado e intenciones de tráfico así como de las áreas restringidas (ambos tipos de datos son generados por la capacidad *Gestión de información de Área Terminal*). Los planes de esta capacidad están agrupados en dos sub-capacidades: una de ellas está encargada de proporcionar detalles del conflicto, mientras que la segunda proporciona información sobre las soluciones posibles al mismo. Los conflictos detectados y sus posibles soluciones son incluidos en un mensaje de contingencia de conflicto de tráfico.

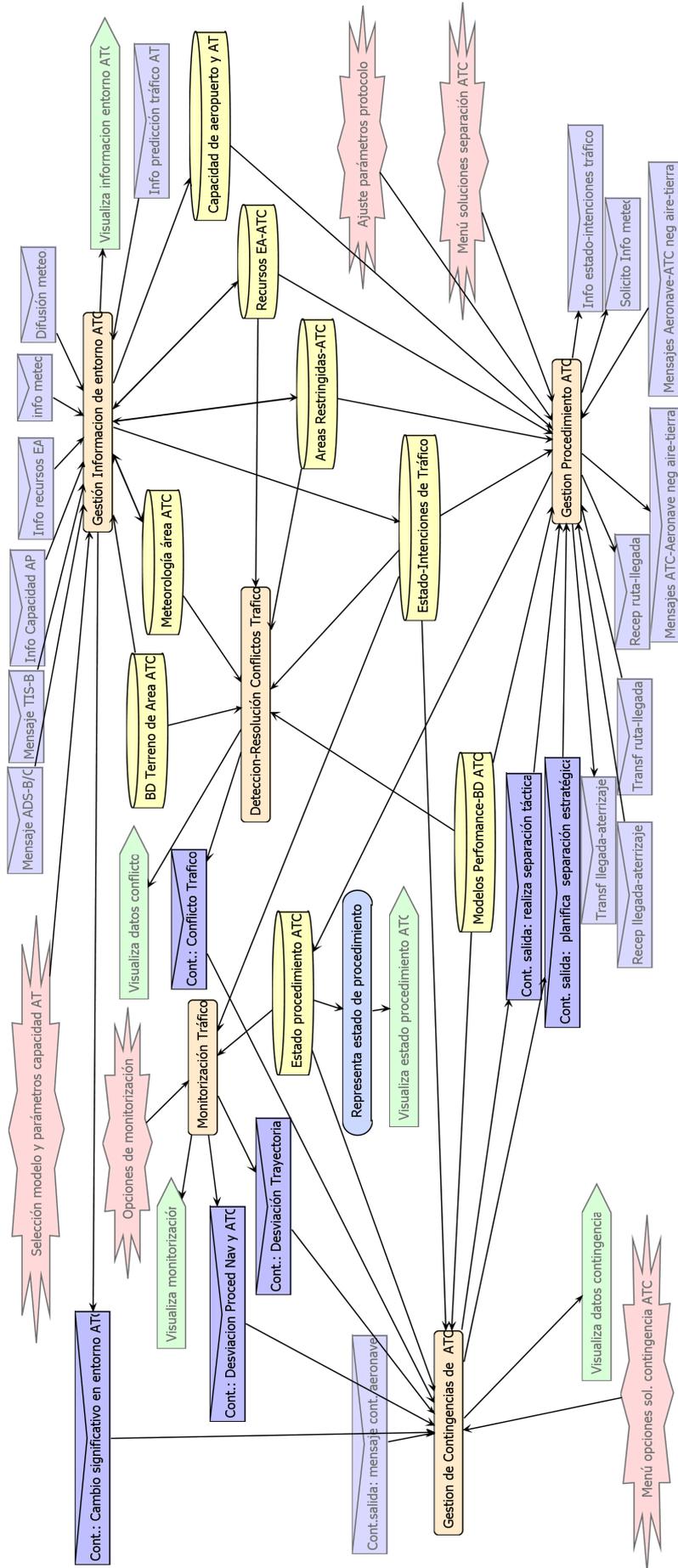


Figura 5.13: Capacidades del agente ATC

3. Gestión de contingencias de tráfico.

Esta capacidad tiene la finalidad de centralizar el tratamiento y la gestión de todas las contingencias que se produzcan en el ATC. Estas contingencias son detectadas por los propios sistemas del ATC (sistemas de monitorización de tráfico, sistemas detectores-resolutores de conflictos, etc.) o bien pueden ser recibidas mediante comunicaciones de agentes externos. En función de la información proporcionada por estas contingencias, esta capacidad analiza el estado del tráfico y decide las acciones correctoras que deberá implementar el sistema de gestión de procedimientos ATC. Estas acciones correctoras son especificadas a través de mensajes salientes (de la capacidad) de contingencia. En este sentido, al igual que la capacidad de gestión de contingencias a bordo, esta capacidad se convierte en una capacidad deliberativa que, a partir de la información contenida en una contingencia recibida, genera un evento de resolución de contingencia, que es enviada a la capacidad encargada de gestionar los procedimientos.

4. Gestión de procedimientos de ATC. Esta capacidad contiene todos los planes encargados de ejecutar las tareas que proporcionan separación estratégica y táctica entre las aeronaves. Estos planes están agrupados en cuatro sub-capacidades: Ejecución de acciones de procedimiento ATC, Separación estratégica, Separación táctica y Coordinación ATC.

5. Monitorización de tráfico.

Se trata de una capacidad de características similares a la capacidad de seguimiento de trayectorias de la aeronave. En este caso, la información sobre los datos de estado e intenciones de tráfico en tiempo real es contrastada con los datos asociados a la trayectoria y roles sobre control de la separación asignados por el ATC a cada aeronave. Como consecuencia de ello (y en función de las opciones de monitorización introducidas por el usuario), se generan eventos de contingencias cada vez que se detecten desviaciones significativas de la posición de las aeronaves respecto a las trayectorias establecidas o divergencias entre los estados del procedimiento de navegación y el procedimiento ATC para una cada aeronave en particular.

5.2.2. Descripción de las capacidades

5.2.2.1. Gestión de información de entorno ATC

El esquema de esta capacidad se muestra en la figura 5.14. La principal información producida por esta capacidad consiste en datos sobre el estado e intenciones del tráfico, las áreas restringidas, los recursos de espacio aéreo, la capacidad de admisión de tráfico

en el aeropuerto y en el área terminal. También genera eventos de contingencia cada vez que se detectan cambios significativos de esta información.

Los planes que proporcionan los datos anteriores son los siguientes:

- *Actualiza meteorología ATC.* Actualiza los datos de las condiciones meteorológicas actuales y de las predicciones a corto y medio plazo⁴. La actualización se lleva a cabo a partir de la recepción de mensajes con información meteorológica (mensajes de difusión meteorológica y/o de información meteorológica solicitada por el ATC).
- *Actualiza datos de áreas restringidas para ATC.* Establece las áreas restringidas desde la perspectiva del ATC a partir de la información proporcionada por el plan anterior, la base de datos del terreno⁵ y el agente *Proveedor de Recursos de Espacio Aéreo*. Este último proporciona mensajes TIS-B e información de recursos de espacio aéreo a requerimiento del ATC.
- *Actualiza recursos de espacio aéreo para ATC.* Define el estado de los recursos de espacio aéreo disponible en el Área Terminal para el ATC.
- *Detecta cambios significativos en entorno ATC.* Genera eventos de contingencia debidos a cambios significativos en la información del entorno de ATC.
- *Actualiza información de capacidad en aeropuerto y en Área Terminal.* La información de capacidad de admisión de tráfico en el aeropuerto se obtiene a partir de un mensaje específico procedente del aeropuerto (mensaje *Info Capacidad*). Con esta información y con los datos de recursos de espacio aéreo, este plan calcula la capacidad del Área Terminal.
- *Actualiza predicción de tráfico en Área Terminal.* Esta actualización se realiza a partir de la información ADS-C/B y de la información proporcionada por los servicios ATM (agente ATM).
- *Actualiza estado e intenciones de tráfico aéreo.* Para dicha actualización, el plan utiliza datos procedentes de mensajes ADS-B/C de aeronaves y los propios datos de predicción de tráfico de ATC.

⁴Las predicciones a más largo plazo (por encima de 2 horas) sólo son requeridas por el agente Recursos de Espacio Aéreo a los efectos de optimizar el diseño de la estructura de rutas de llegada.

⁵Como ya se indicó en 3.1.6, los datos del terreno podrían estar disponibles en una única base centralizada en el agente *Proveedor de Recursos de Espacio Aéreo*. Sin embargo esto implica un incremento en la frecuencia de comunicaciones de los demás agentes para acceder a dicha información. También podría verse comprometido el acceso a dichos datos en caso de fallo de comunicación. Por ello, cada agente tiene su propia base de datos del terreno y en todo caso es el agente *Proveedor de Servicios de Recursos de Espacio Aéreo* el encargado de proporcionar información de la versión actualizada de dicha base de datos.

5. Modelado de los agentes críticos: agente Aeronave y agente ATC

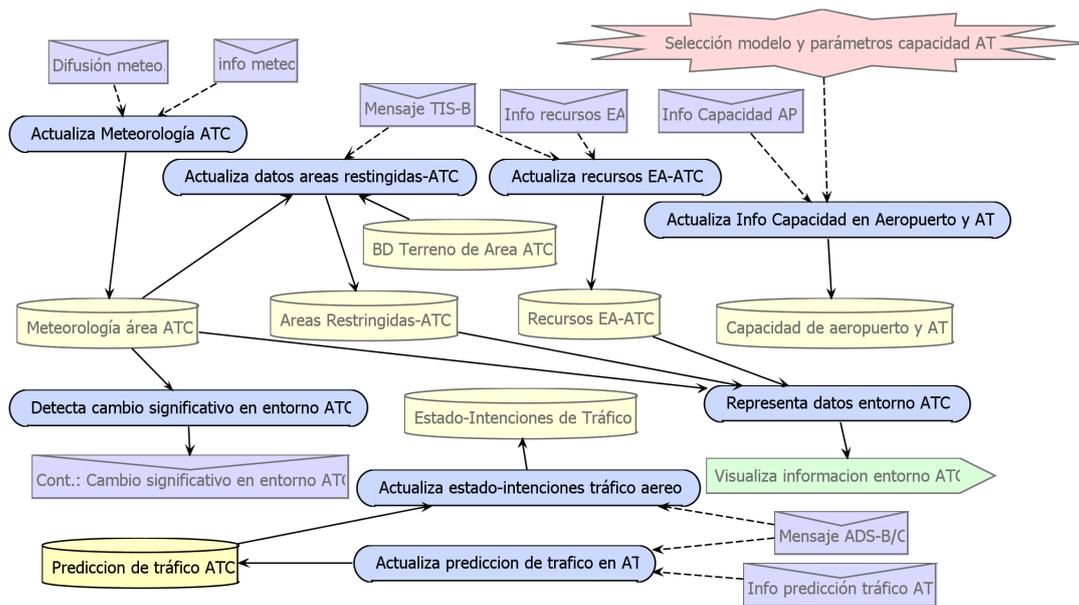


Figura 5.14: Capacidad gestión de información de Área Terminal

5.2.2.2. Detección y resolución de conflictos de tráfico

El esquema básico de esta capacidad, representado en la figura 5.15, es similar a la capacidad equivalente del agente aeronave. Es decir, las funcionalidades para la detección y la búsqueda de soluciones iniciales están agrupadas en dos sub-capacidades distintas. La primera de ellas identifica el conflicto y lo asocia a un evento de contingencia específico. La segunda se encarga de obtener un conjunto priorizado de soluciones referencia. Estas soluciones, junto con la información del evento de contingencia de conflicto, son tratados por la capacidad gestión de procedimientos y/o la capacidad de monitorización de tráfico. En el caso de que el rol de separación esté asignado al ATC será éste el que aplique la solución (mediante la correspondiente instrucción-negociación con las aeronaves) y el que verifique la implementación de dicha solución (mediante la capacidad monitorización de tráfico). Por el contrario, si el rol de separación está delegado en la aeronave, el ATC utiliza la capacidad de *monitorización de tráfico* para verificar que las aeronaves inician un procedimiento de autoseparación de acuerdo a los datos del evento de contingencia de conflicto.

En este punto conviene recordar que los procesos desarrollados en nuestro modelo se refieren a la negociación de trayectoria. Por lo tanto, no incorpora reglas específicas para establecer la delegación de la separación en la aeronave o para identificar las contingencias bajo las cuales el ATC debería reasumir dicha responsabilidad. En todo caso, y de acuerdo a la propuesta DAG-TM CE-11 descrita en la sección 1.1.3.2 (figura 1.5) se considera que, por defecto, dicha delegación se produce en el punto en el que la aeronave inicia la trayectoria negociada previamente con el ATC [Sorensen 2000]. Sin embargo, la arquitectura del

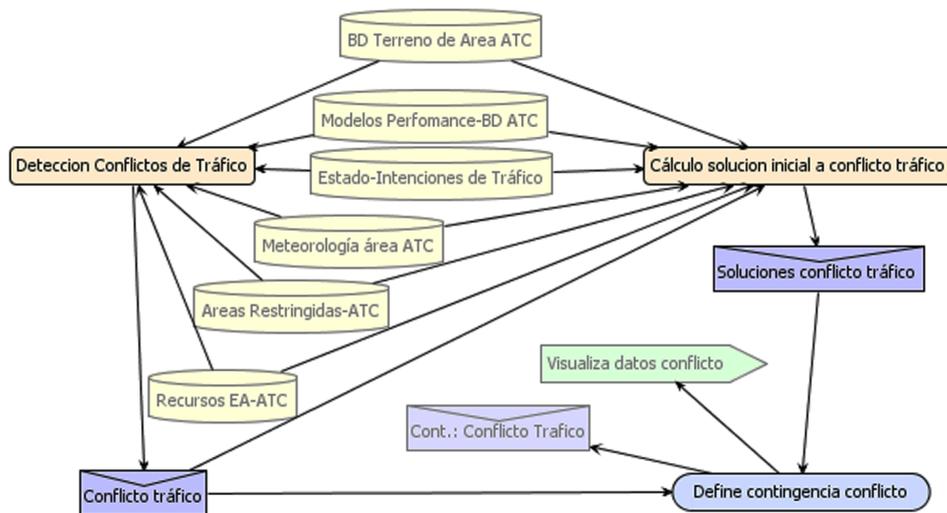


Figura 5.15: Capacidad detección y resolución de conflictos de tráfico

agente tiene en cuenta las especificaciones del sistema de manera que permite incorporar en las capacidades de *Gestión de procedimientos de navegación* y *Gestión de contingencias a bordo* planes específicos que implementen los procesos que asignen en cada instante los roles de la separación.

5.2.2.3. Monitorización de tráfico

Esta última capacidad del ATC verifica que el estado y las intenciones de las aeronaves corresponden con los estados de los procedimientos acordados entre ATC y aeronaves o entre las aeronaves (véase figura 5.16). En caso de divergencia se generarán eventos de contingencia específicos destinados a disparar las actuaciones ATC que corrijan tal eventualidad (*Evento Contingencia Desviación de Trayectoria* y *Evento Contingencia Desviación Procedimiento de Navegación y ATC*). Al igual que los otros eventos de contingencia, estos eventos son tratados por la capacidad de *Gestión de contingencias de tráfico*. Hay que recordar además que los datos utilizados por este plan son generados por la capacidad *Gestión de información de entorno ATC*. En concreto, los datos sobre el estado e intenciones de tráfico se obtienen vía mensajes ADS-B/C procedentes de las aeronaves, mientras que los datos sobre el estado de procedimientos ATC son datos internos del agente generados por la capacidad *Gestión de Procedimientos ATC*.

5.2.2.4. Gestión de contingencias de tráfico

Al igual que la capacidad de nombre análogo de la aeronave, esta capacidad contiene planes para gestionar los distintos tipos de eventos de contingencia de entrada procedentes de las capacidades anteriores o de otras aeronaves. Los eventos de contingencia de salida

5. Modelado de los agentes críticos: agente Aeronave y agente ATC

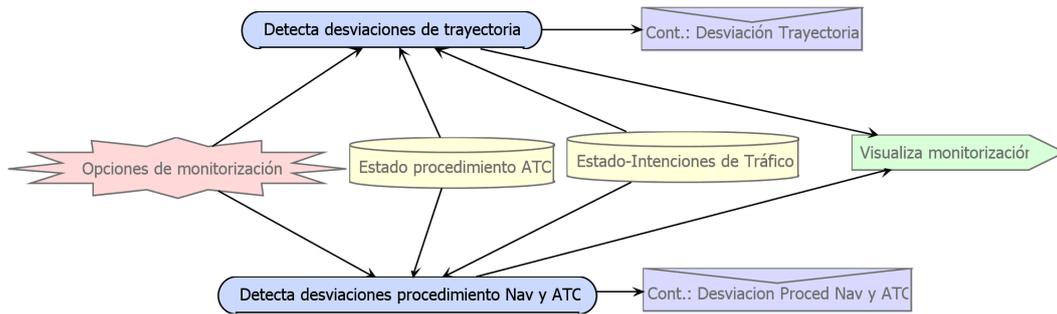


Figura 5.16: Capacidad monitorización tráfico

de esta capacidad proporcionan información sobre las características de la contingencia y las soluciones que se deben implementar a través de los correspondientes procedimientos ATC. Son básicamente de dos tipos: uno para activar la planificación de la separación estratégica y otro para realizar separación táctica.

5.2.2.5. Gestión de procedimientos ATC

Para llevar a cabo las acciones estratégicas y tácticas destinadas a mantener la separación entre las aeronaves, esta capacidad está constituida por las cuatro sub-capacidades siguientes (ver figura 5.17):

- *Ejecución de procedimiento ATC.* Se trata de una capacidad (ver figura 5.18) que, en función del estado del tráfico, genera eventos que disparan la ejecución de planes de ésta u otras capacidades del agente para: (i) *coordinar con otras dependencias ATC la recepción o transferencia de tráfico*, (ii) *planificar y asignar trayectorias de llegada*, (iii) *establecer los instantes de inicio de procesos de negociación* y (iv) *asumir o delegar en la aeronave la responsabilidad de separación*.
- *Separación estratégica.* Esta capacidad se ha modelado a través de dos planes básicos (ver figura 5.19). Uno de ellos contiene el proceso de negociación aire-tierra de trayectorias. El segundo de ellos representa a otros planes complementarios destinados a implementar procesos de re-negociación de trayectorias pendientes de ejecución asignadas a un grupo de aeronaves cuando se produzca una contingencia que así lo exija.
- *Separación táctica.* Se encarga de dirigir los procesos de control táctico disparados por contingencias que requieran este tipo de acciones (por ejemplo contingencia de pérdida de separación durante la convergencia de flujos de aeronaves). Obviamente, en un contexto de operaciones basadas en trayectorias 4D, las acciones tácticas se han reducido a: (i) *delegar o recuperar el rol del control de la separación entre*

aeronaves en función de la fase o estado del tráfico aéreo u otras contingencias que se produzcan durante las operaciones, (ii) activar protocolos de control de separación en situaciones extremas de conflictos de corto alcance.

- *Coordinación ATC.* Se trata de una capacidad que recoge los planes para coordinar la aceptación y la transferencia de tráfico con otras dependencias ATC. Los eventos que disparan estos planes, proceden de la sub-capacidad ejecución procedimiento ATC. El diseño detallado de esta capacidad deberá incluir un conjunto de planes específicos que implementen la coordinación del ATC de llegadas con otras dependencias limítrofes. Considerando que el escenario descrito en el *capítulo 3* está centrado en la coordinación aire-tierra, ésta capacidad sólo ha sido definida a los efectos de incluir un plan básico para la aceptación y transferencia de tráfico desde o hacia otras dependencias ATC. Sin embargo, las futuras extensiones de esta capacidad podrán incluir los procesos del agente ATC vinculados a protocolos de coordinación tierra-tierra.

Además de las sub-capacidades anteriores, esta capacidad contiene un plan denominado *Asigna autoseparación*, destinado a gestionar el protocolo de comunicación para delegar/asumir la separación de aeronaves y para actualizar la información sobre este reparto de roles.

5. Modelado de los agentes críticos: agente Aeronave y agente ATC

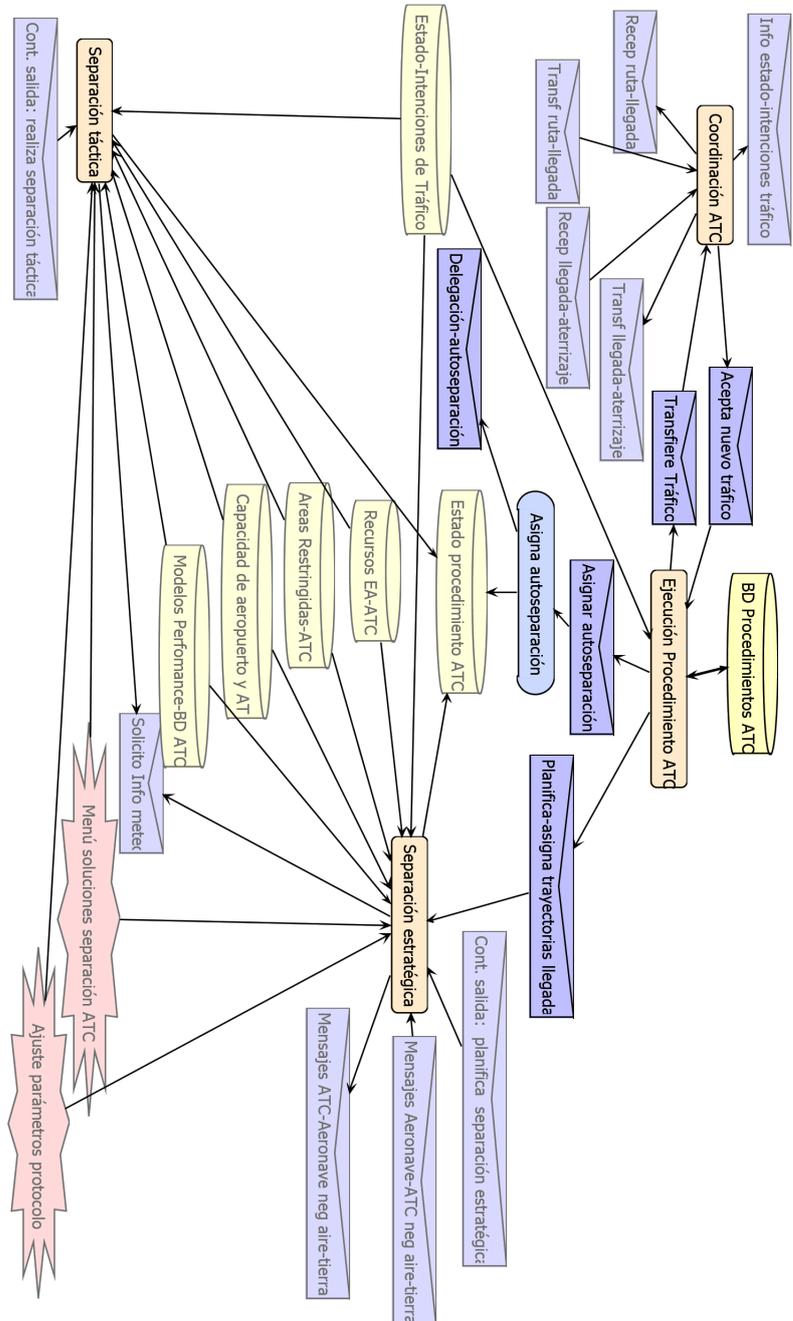


Figura 5.17: Capacidad gestión de procedimientos ATC

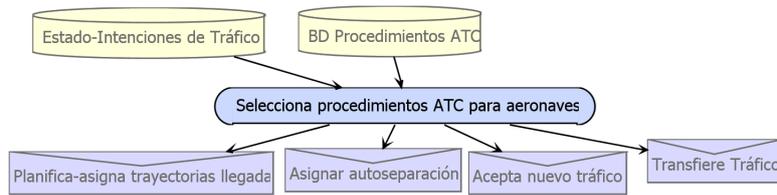


Figura 5.18: Capacidad ejecución procedimiento ATC

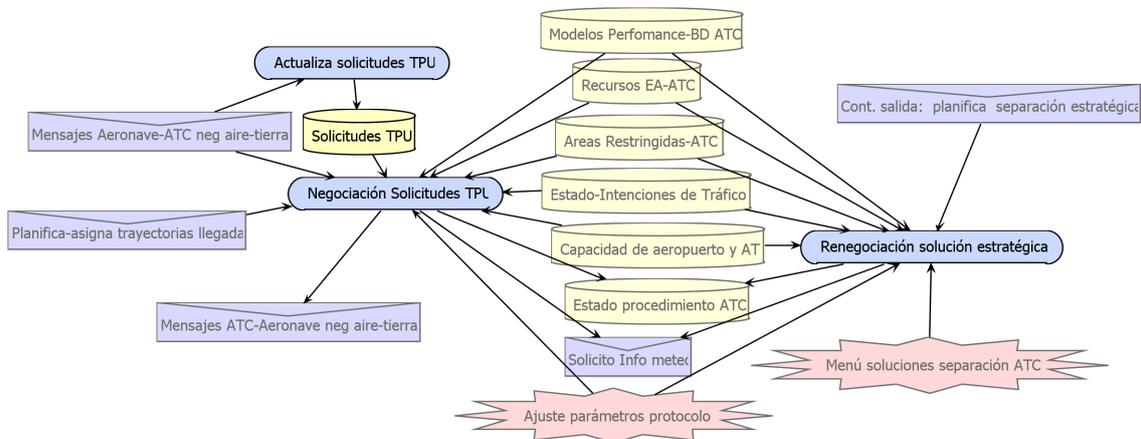


Figura 5.19: Capacidad separación estratégica

5.3. Arquitectura de agentes y arquitectura funcional de los sistemas de cabina y de ATC para operaciones TBO

El diseño de agentes propuesto en este capítulo, y estructurado alrededor de planes y capacidades, ha permitido organizar y relacionar las funcionalidades básicas identificadas en el capítulo 3, así como la información que éstas usan o generan para llevar a cabo procedimientos automatizados de navegación y control de tráfico. Por lo tanto, y de acuerdo a los objetivos de esta Tesis, el diseño de agentes propuesto representa un modelo de arquitectura funcional de los sistemas de aviónica y de ATC para operaciones TBO.

En el caso de las aeronaves, esta arquitectura supone una extensión de los actuales sistemas para incorporar la gestión automatizada de estos procedimientos.

En el caso del ATC, la arquitectura está orientada a la gestión de procedimientos de coordinación aire-tierra como los desarrollados en esta Tesis. Por lo tanto requiere ser

completada para incluir en ella la gestión de protocolos específicos para la coordinación tierra-tierra.

5.3.1. Arquitectura funcional de los sistemas de aviónica

La arquitectura funcional de los sistemas de cabina para operaciones TBO está presentada en la figura 5.2. Esta arquitectura funcional se corresponde con la arquitectura interna del agente aeronave descrita en la sección 5.1 y representada en la figura 5.2 [Canino et al. 2009a].

El sistema encargado de planificar y ejecutar las trayectorias es el Sistema de Gestión de la Navegación (SGN). El *SGN* incluye las capacidades de *Gestión de procedimientos de navegación* y de *Guiado de trayectoria*. Dicho sistema está compuesto por el *Sistema de Planificación de Procedimientos (SPP)* y el *Sistema de Ejecución de Procedimientos (SEP)*. El SPP está modelado por las capacidades *Planificación de siguiente procedimiento* y *Replanificación de procedimiento actual*. El sistema SEP está basado en la capacidad *Ejecución de procedimientos*. Además el SEP está compuesto por:

- El *Generador de Eventos de Procedimientos (GEP)* que se corresponde con la capacidad *Ejecución de procedimientos*.
- El *Sistema de Guiado de Trayectoria (SGT)* modelado a través de la capacidad *Guiado de trayectoria*.

Por lo tanto, el sistema SGN extiende las funcionalidades de los actuales FMS y AP/AT de la siguiente manera:

1. El sistema SPP amplía las funcionalidades de planificación de ruta de los actuales FMS incorporando la planificación de procedimientos con sus correspondientes protocolos de negociación aire-tierra y aire-aire.
2. El generador GEP expande las funcionalidades de gestión del plan de vuelo de los actuales FMS añadiendo la generación de eventos que disparen las tareas de planificación y ejecución de procedimientos.
3. El sistema SGT incrementa las funcionalidades de guiado de plan de vuelo del sistema actual FMS-AP/AT para proporcionar guiado 4D.

Los datos de entrada del SGN son los siguientes: lista de procedimientos, datos sobre el estado de éstos, datos del entorno de la aeronave (concretamente los datos sobre recursos de espacio aéreo) y parte de la información sobre su entorno y tráfico circundante. Los datos de la lista de procedimientos son también actualizados por el SGN a medida que

éstos van siendo planificados y ejecutados. Así, por ejemplo, en el caso de que la aeronave se disponga a planificar el procedimiento de llegadas mientras ejecuta un procedimiento de crucero, ambos procedimientos estarán ubicados de forma consecutiva en la correspondiente lista y habrá constancia del estado de cada uno de ellos a través de las variables que lo representan⁶. Una vez planificada la trayectoria de llegada, y en el instante de inicio de su ejecución, el procedimiento de crucero pasa a su estado de finalización de ejecución y es eliminado de la lista; además el estado del procedimiento de llegada pasa al estado de ejecución y, dentro de éste, evolucionará por sus diferentes sub-estados.

Como se recordará, tanto la lista de procedimientos como el estado de cualquiera de ellos podrá verse alterado cada vez que se produzca un evento de contingencia.

Las contingencias que supongan alterar el orden de la lista de procedimientos y/o sus estados internos, son gestionadas por el *Sistema de Gestión de Contingencias (SGC)*. Este sistema está modelado a través de la capacidad del mismo nombre del agente aeronave. Por tanto el sistema SGC usa los eventos entrantes de contingencias así como otros mensajes de agentes y/o percepciones de la consola de control del piloto, para tomar decisiones sobre la resolución de la contingencias. El resultado de dichas decisiones está recogido por los eventos de salida de la capacidad de *Gestión de contingencias*. En consecuencia el SGC representa una capa de toma de decisiones ubicada en un nivel superior al *Sistema de Gestión de Navegación*⁷.

Los eventos de entrada al SGC proceden de los demás sistemas que completan la presente arquitectura de aviónica. Estos sistemas son: el *Sistema de Gestión de Información de Entorno (SGIE)*, *Sistema de Gestión de Alarmas (SGA)* y el *Sistema de Detección y Resolución de Conflictos (SDRC)*. Cada uno de ellos está modelado por las capacidades del mismo nombre descritas en las secciones 5.1.2.1 a 5.1.2.3.

Por último hay que señalar que el interfaz de interacción persona-máquina de esta arquitectura queda descrito a través de las percepciones y acciones definidas en la sección 5.1 para cada una de las capacidades y sub-capacidades asociadas a dichos sistemas.

5.3.2. Arquitectura funcional de los sistemas de ATC

La arquitectura funcional de los sistemas de ATC está representada en la figura 5.21. Esta arquitectura corresponde al diseño de agentes descrito en la sección 5.2. En ese caso los sistemas funcionales que se obtienen a partir de las capacidades del agente ATC son

⁶Véase estados del procedimiento en sección 4.3

⁷Aunque el diseño interno de este sistema a través de su correspondiente capacidad no forma parte del trabajo de esta Tesis, se pone de manifiesto una vez más que el modelo conceptual proporciona información detallada de sus entradas y salidas, facilitando así el diseño posterior de la misma. Además el rol de esta capacidad (o sistema) dentro de la arquitectura de la aeronave proporciona pautas suficientes para plantear el diseño de dicho sistema a partir métodos de razonamiento basados en reglas.

5. Modelado de los agentes críticos: agente Aeronave y agente ATC

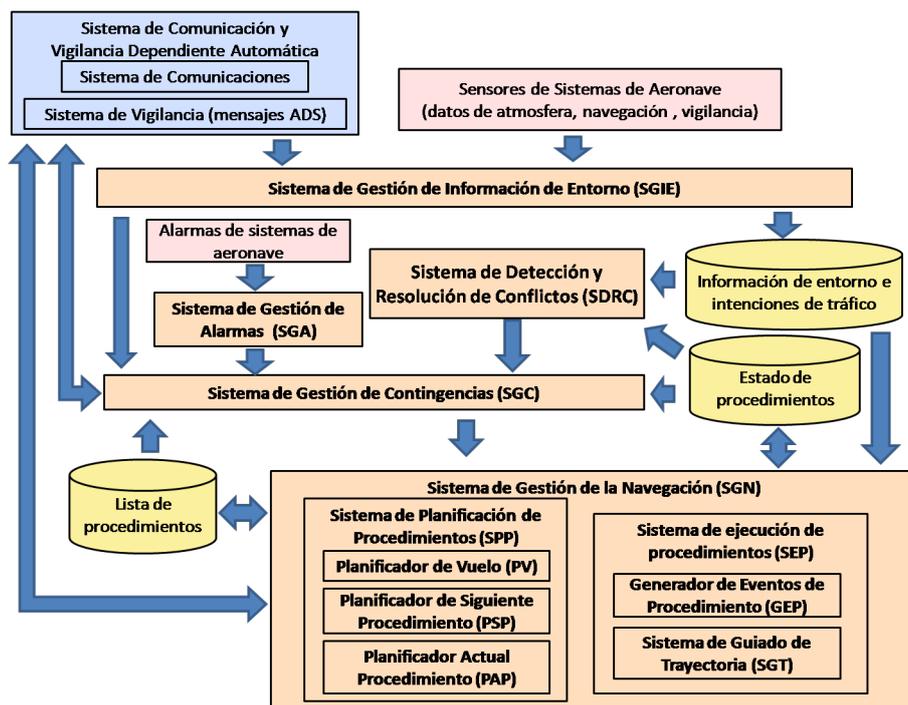


Figura 5.20: Arquitectura funcional de los sistemas de cabina para TBO

los siguientes:

- El *Sistema de Gestión de Trayectorias (SGT)*.
- El *Sistema de Gestión de Contingencias (SGC)*.
- El *Sistema de Vigilancia de Trayectorias (SVT)*.
- El *Sistema de Gestión de Información de Entorno (SGIE)*.

El *Sistema de Gestión de Trayectorias (SGT)* está modelado a través de la capacidad de *Gestión de procedimientos ATC* y está constituido por tres subsistemas: el *Sistema de Planificación de Trayectorias (SPT)*, el *Sistema de Ejecución de Procedimientos (SEP)* y el *Sistema de Coordinación de ATC (SCA)*.

El *Sistema de Planificación de Procedimientos* ejecuta los distintos protocolos de negociación aire-tierra y/o coordinación que forman parte del procedimiento seleccionado. Estos protocolos pertenecen a alguno de los siguientes grupos:

- Protocolos de negociación aire-tierra para la planificación estratégica (tales como el desarrollado en la sección 4.2) y que son llevados a cabo por el *Planificador Estratégico de Trayectorias (PET)*. Este sistema está modelado a través de la subcapacidad *Planificación estratégica* y como tal es también el encargado de seleccionar el procedimiento de la base de datos de ATC y de fijar sus parámetros operacionales.

- Protocolos de negociación tierra-aire para la separación táctica de trayectorias ATC⁸, así como aquella parte de los protocolos de comunicación en los que el ATC debe autorizar o dar por finalizada una negociación aire-aire⁹. Estos protocolos son ejecutados por el *Planificador Táctico de Trayectorias* (PTT), el cual corresponde a la sub-capacidad *Planificación táctica*.

El *Sistema de Ejecución de Procedimientos* está modelado por la capacidad *Ejecución de procedimiento ATC*. Genera eventos para seleccionar los procedimientos ATC y/o disparar los protocolos asociados a éstos. Debe recordarse que el ATC selecciona de la base de datos de procedimientos aquellos que le competen y particulariza sus atributos de acuerdo a los parámetros del escenario operacional en el cual se van a llevar a cabo. Por ejemplo, en el caso de las operaciones de llegada seleccionaría el correspondiente procedimiento y fijaría los valores del escenario operacional definido en la sección 4.1.1.

El *Sistema de Coordinación ATC* está modelado por la capacidad *Coordinación ATC*. Por tanto contiene los planes de coordinación tierra-tierra.

Por otra parte, el *Sistema de Gestión de Contingencias (SGC)* está modelado a través de la capacidad del mismo nombre del agente ATC. De esta manera el SGC representa una capa de toma de decisiones ubicada en un nivel superior al *Sistema de Gestión de Trayectorias (SGT)*. Los eventos de contingencia que gestiona este sistema proceden de los sistemas que monitorizan las trayectorias de las aeronaves (SVT) y que gestionan la información de entorno (SGIE).

El *Sistema de Vigilancia de Trayectoria*, SVT está constituido por el *Sistema de Detección y Resolución y Conflictos (SDRC)* y el *Sistema de Monitorización de Trayectoria (SMT)*. Estos sub-sistemas se corresponden con las capacidades de igual nombre y ambos generan eventos de contingencias. De acuerdo a la capacidad que lo representa, el SDRC utiliza los datos sobre información del entorno de ATC e intenciones de tráfico para generar eventos específicos de contingencia. El SMT monitoriza los estados y trayectorias de aeronave para verificar que éstas cumplen con los acuerdos resultantes de las negociaciones llevadas a cabo por el subsistema de planificación SPT.

El sistema SGIE realiza funciones similares a las del sistema del mismo nombre de la aeronave.

⁸Conviene recordar que en esta Tesis, se ha considerado que la separación táctica es delegada en las aeronaves (tal y como se propone en el concepto DAG-TM CE-11), con el fin de desarrollar una propuesta específica y nueva de protocolo de negociación aire-aire. Sin embargo, ello no impide que se establezcan otras variantes del procedimiento en las que el control de esta separación sea llevada a cabo por el ATC. Las reglas bajo las cuales el ATC asume o delega la responsabilidad de la separación táctica también forman parte de las tareas de diseño y evaluación de procedimientos de llegada que se pueden llevar a cabo a partir del modelo conceptual aquí propuesto.

⁹Véase figuras 4.26 o 4.27 de la sección 4.2.4.

5. Modelado de los agentes críticos: agente Aeronave y agente ATC

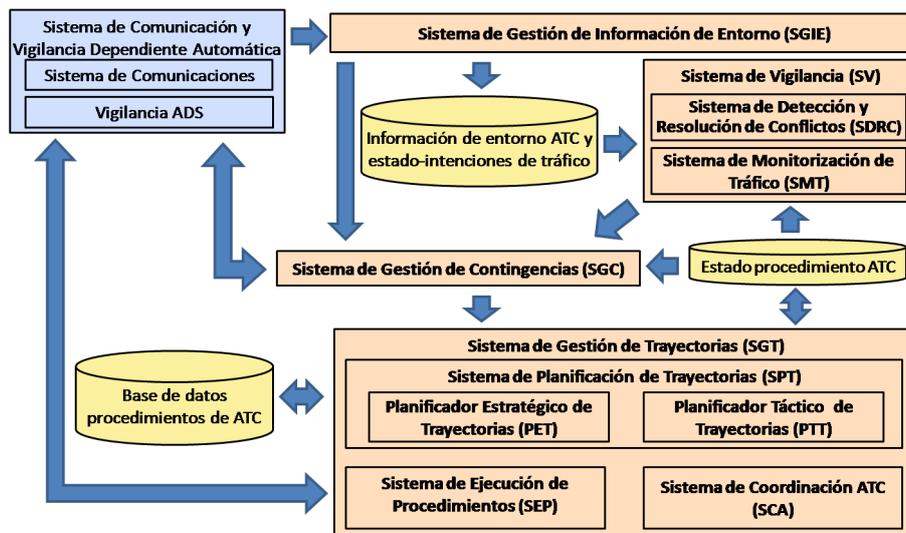


Figura 5.21: Arquitectura funcional de los sistemas de ATC para TBO

Por último hay que señalar que la descripción del interfaz persona-maquina de esta arquitectura funcional está recogida en la especificación de las acciones y percepciones del agente ATC.

5.4. Pautas para la obtención de un modelo ejecutable

Los descriptores y diagramas de los componentes del modelo desarrollado en esta Tesis proporcionan la información necesaria para su implementación. Sin embargo no todos los componentes obtenidos en las tres fases de la metodología aplicada requieren ser implementados. Las entidades implementables del modelo son aquellas que se han desarrollado en la fase de diseño detallado. Es decir, agentes, capacidades, planes, datos, eventos y mensajes.

Las características del modelo diseñado condicionan la elección de la plataforma de agentes adecuada para su implementación. En este contexto es preciso considerar las siguientes propiedades del modelo:

1. Las características de la arquitectura y el comportamiento de los agentes. Estas características deben ser tenidas en cuenta para elegir aquellas plataformas que usen un lenguaje de programación orientado a agentes con una sintaxis específica para definir y relacionar los distintos elementos que forman parte del modelo: agentes, planes, mensajes, etc.
2. La infraestructura requerida para la intercomunicación entre agentes. Cuando la intercomunicación entre agentes tiene un papel relevante dentro del modelo, como es este caso, es deseable disponer de una infraestructura que facilite la implementación

de las comunicaciones. Esta infraestructura debe proporcionar una adecuada sintaxis de los mensajes así como herramientas para localizar a los agentes a partir de sus nombres (servicios de páginas blancas) y/o de los servicios que éstos prestan (servicios de páginas amarillas).

Como ha quedado de manifiesto en este capítulo, la arquitectura de los agentes aeronave y ATC está basada en el modelo BDI. También es evidente que la mayoría de las capacidades de estos agentes implementan comportamientos marcadamente reactivos (dirigidos por eventos). Sólo algunas capacidades tales como las de gestión de contingencias manifiestan un comportamiento deliberativo (dirigido por objetivos). En este último caso, los planes que se incluyen en estas capacidades deberán incorporar esquemas de razonamiento meta-nivel encargados de seleccionar distintos planes alternativos cuando un plan previo falle en la consecución de un determinado objetivo¹⁰.

Atendiendo exclusivamente a la arquitectura basada en planes, las plataformas adecuadas para la implementación del modelo propuesto en esta Tesis son aquellas que se basan en el modelo BDI (JACK, JADEx, etc.). Sin embargo, considerando el comportamiento reactivo de los agentes, también hay que señalar que nuestro modelo no exige la utilización del amplio espectro de recursos que ofrecen este tipo de plataformas para implementar los comportamientos deliberativos propios de agentes BDI. En este sentido, como se adelantó en el *capítulo 1* (apartado 1.2.6.3), otras plataformas tales como JADE disponen de recursos apropiados para implementar agentes reactivos dejando abierta la posibilidad a que el desarrollador pueda construir comportamientos deliberativos propios a partir de las librerías de comportamientos de JADE.

Por otra parte, teniendo en cuenta el papel predominante que juegan las comunicaciones en nuestro modelo es fundamental que la plataforma elegida disponga de una infraestructura robusta para la implementación de las mismas. Desde este punto de vista JACK, a pesar de su módulo específico para extender algunos estándares de FIPA como el registro y el servicio de agentes, carece del estándar de comunicaciones FIPA-ACL. En cambio la plataforma JADE se ha desarrollado completamente a partir del estándar FIPA. También JADEx utiliza dicho estándar en la medida en que es una extensión de JADE para la implementación de agentes BDI.

A partir de las consideraciones realizadas en los párrafos anteriores, a continuación se resumen las opciones específicas que ofrece tanto la plataforma JACK como JADE para trasladar nuestro modelo conceptual a un modelo ejecutable.

¹⁰Por ejemplo, los planes destinados a resolver una emergencia a bordo podrían seleccionar distintos planes cada vez que uno ellos no lograra resolver dicha emergencia satisfactoriamente (comportamiento deliberativo). En cambio los planes de la capacidad que gestiona los procedimientos se limitan a seleccionar planes específicos para cada fase o etapa de vuelo (comportamiento reactivo). Las demás capacidades también presentan características reactivas.

5.4.1. Implementación en plataforma JACK

Como ya se comentó en el *capítulo 1*, el lenguaje de programación JACK (*JACK Programming Language, JPL*) tiene una correspondencia directa con la mayoría de los elementos del diseño *Prometheus*. Un programa JACK consiste en la declaración de un conjunto de entidades: agentes, capacidades, planes, eventos y conjunto de creencias o bases de datos (*beliefsets*). Cada declaración de estas entidades enlaza con las otras.

En la declaración de un agente se especifican las capacidades, los planes y los tipos de datos que tiene. Además se indican los mensajes que reciben o envían otros agentes así como los eventos que se envían internamente entre planes. En cuanto a las percepciones, los mensajes recibidos o enviados y los mensajes internos son considerados todos ellos como eventos de distinto tipo, en tanto que las acciones son simplemente definidas dentro del cuerpo del plan utilizando código Java. Finalmente la incorporación de nuevos objetivos y su realización también se representa mediante eventos.

La declaración de las capacidades se realiza de forma similar a la declaración de los agentes, es decir referenciando las sub-capacidades, planes, eventos y datos que maneja. Por último, en la declaración de los planes del agente se incluyen los eventos enviados internamente entre planes y los enviados a otros agentes en forma de mensajes. A su vez, las tareas que debe realizar el agente se implementan en los cuerpos de los planes mediante código Java extendido con algunas declaraciones específicas de JACK. Dichas declaraciones permiten incluir distintos métodos de razonamiento con el fin de detectar cuándo un plan tiene éxito o fracasa en el logro de un objetivo o cuándo es necesario ejecutar un plan alternativo en caso de fallo. Evidentemente, en el caso de agentes reactivos, los procesos se implementan directamente en el método de razonamiento principal del agente (método *body()*), de forma que los eventos que se generan durante su ejecución disparan nuevos sub-planes para llevar a cabo tareas parciales.

Por ejemplo, los procesos derivados de los dos protocolos de negociación descritos en el *capítulo 4* pueden implementarse mediante sendos planes tal y como se propuso al desarrollar las capacidades que los contienen. A su vez, las tareas que forman parte de dichos procesos pueden distribuirse en varios sub-planes dependientes los anteriores. Estos sub-planes implementan las tareas de evaluación de propuestas y generación contrapropuestas de trayectoria, generación de mensajes de salida durante la negociación, etc. En el *apéndice B* se ilustra a través de un ejemplo la estructura básica del esqueleto del código para el agente aeronave. Dentro este código se señalan los elementos que constituyen la capacidad gestión de procedimientos en la que están incluidos los protocolos de negociación aire-tierra y aire-aire.

Hay que recordar que a partir del diseño presentado en este capítulo, la herramienta PDT es capaz de generar de manera automática el código esqueleto de los elementos

JACK anteriores, de manera que posteriormente pueda incorporarse a éste el código de procesos o funcionalidades específicas.

5.4.2. Implementación en plataforma JADE

En este caso hay que recordar que JADE facilita la implementación de la arquitectura de los agentes mediante el concepto de comportamiento. De esta forma, la actividad de agentes se puede describir mediante un conjunto estructurado de comportamientos y subcomportamientos propios de JADE¹¹.

Los comportamientos JADE son clases JAVA en las que se puede implementar el código de las tareas a realizar por cada agente. Cada comportamiento puede realizar una tarea simple como enviar un mensaje o bien pueden crear nuevos comportamientos dando lugar a comportamientos compuestos. Los comportamientos compuestos permiten que el agente pueda realizar diversas tareas complejas de forma simultánea, sin que necesidad de implementar agentes multi-hilo.

En la figura 5.22 se muestran los distintos tipos de comportamiento JADE. Dichos comportamientos se agrupan en dos categorías principales: simples y compuestos. Los comportamientos simples básicos son aquellos que se ejecutan una única vez (*oneShotBehaviour*) y los que lo hacen de forma continua (*cyclicBehaviour*). Una variante de estos comportamientos simples son aquellos que se ejecutan una vez transcurrido un tiempo específico (*wakerBehaviour*) o los que se ejecutan cíclicamente en periodos determinados (*tickerBehaviour*). Los comportamientos compuestos son tres: (i) *FSMBehaviour* consistente en una clase que permite definir una Máquina de Estados finitos mediante subcomportamientos que representan cada uno de ellos un estado de la máquina, (ii) *SequentialBehaviour* que ejecuta sus sub-comportamientos de forma secuencial y (iii) *ParallelBehaviour* que ejecuta los sub-comportamientos de manera concurrente y finaliza cuando se cumpla una determinada condición sobre la terminación de los sub-comportamientos (es decir todos, alguno de ellos o un número determinado de éstos).

En la figura 5.23 se ilustra la adaptación del diseño del agente Aeronave propuesto en este mismo capítulo a una arquitectura basada en los comportamientos JADE anteriores. En ella, cada una de las seis capacidades principales del agente son definidas como comportamientos del mismo nombre que se ejecutan todos ellos de forma paralela a partir de un comportamiento único: *ParallelBehaviour Navegación*. A su vez, cada uno de estos

¹¹La plataforma JADDEX se basa en un planteamiento similar para implementar una infraestructura BDI sobre comportamientos JADE. Por tanto, JADDEX podría ser una plataforma válida para la implementación de nuestro modelo, llevando a cabo las correspondientes adaptaciones entre los elementos del diseño conceptual y los elementos de diseño JADDEX. Sin embargo, a pesar del esfuerzo anterior, ello impediría analizar nuestro modelo desde la perspectiva de los procesos de más bajo nivel que desarrollan los distintos subsistemas de aire y tierra.

5. Modelado de los agentes críticos: agente Aeronave y agente ATC

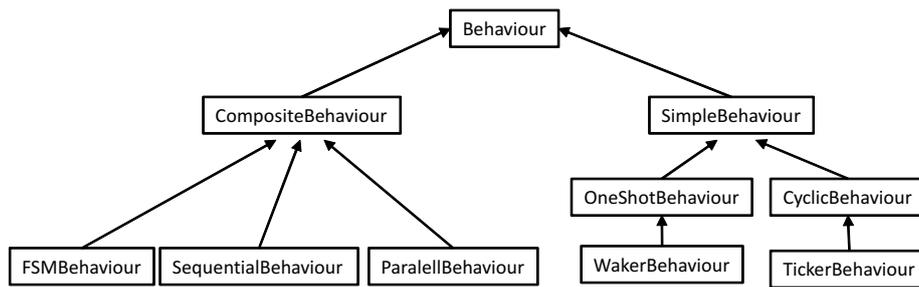


Figura 5.22: Comportamientos JADE

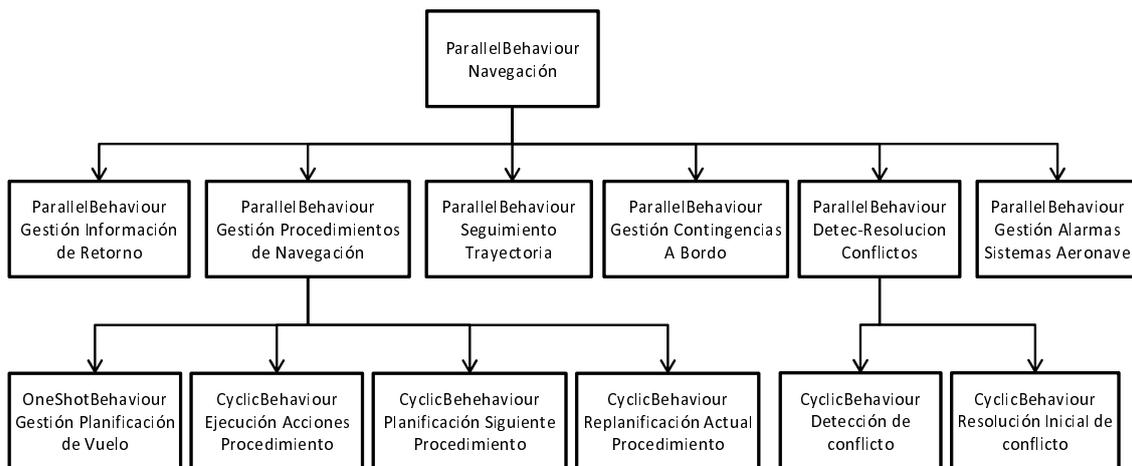


Figura 5.23: Arquitectura de comportamientos JADE del agente aeronave

comportamientos están constituidos por nuevos comportamientos. En particular el comportamiento que representa a la capacidad *Gestión de Procedimientos de Navegación* consiste también en un comportamiento paralelo que contiene cuatro sub-comportamientos hijos correspondientes a cada una de las sub-capacidades del modelo de agente. Estos últimos comportamientos se ejecutan bien de forma continua (*cyclicBehaviour*) o cada vez que sea necesario (*OneShotBehaviour*).

De forma progresiva los comportamientos anteriores podrían ser descompuestos en nuevos comportamientos, de modo que los comportamientos de nivel inferior corresponderían con los planes y sub-planes del modelo conceptual.

Como ya se ha comentado, junto a estos comportamientos, la plataforma JADE proporciona librerías específicas de clases para crear y gestionar el envío y recepción de mensajes de acuerdo al estándar FIPA-ACL (*ACLMessage*, *MessageTemplate*, etc.) [Bellifemine et al. 2007]. Por tanto, los procesos de comunicación que forman parte de nuestro diseño se implementan incluyendo en los comportamientos anteriores los métodos ofrecidos por estas clases.

5.5. Conclusiones

La arquitectura interna de agentes aeronave y ATC obtenida en esta fase de diseño detallado está constituida por un conjunto de capacidades organizadas modularmente en varios niveles. Para cada una de estas capacidades se identificaron los eventos que reciben o generan así como los principales planes básicos que contienen. Estos planes implementan los procesos internos de los agentes y sus funcionalidades. Entre estos planes se encuentran los que implementan los procesos que corresponden a los protocolos de negociación diseñados en el *capítulo 4* así como los que implementan el modelo dinámico de las aeronaves y el modelo desarrollado en el *capítulo 2* para el guiado y control 4D.

Esta arquitectura de capacidades es válida para todas las operaciones de vuelo y permiten identificar la posición interna que ocupan los distintos planes de cada agente así como los eventos que los disparan y los eventos que producen. De este modo, para incluir nuevos procedimientos es suficiente con añadir planes que implementen nuevos protocolos y procesos para estos procedimientos en la capacidad encargada de su gestión. También es posible desarrollar el resto de capacidades mediante la definición de esquemas específicos para la gestión de contingencias, la actualización de la información de entorno del agente, etc.

Tanto el agente aeronave como el ATC disponen de capacidades afines para lograr sus respectivos objetivos. Estas capacidades son las de gestión de información de entorno, detección y resolución de conflictos, gestión de contingencias y gestión de procedimientos.

En cambio la aeronave dispone de otras capacidades específicas tales como la de gestión de alarmas de sus sistemas y la de seguimiento de trayectoria. Por su parte el ATC también dispone de una capacidad diferenciada para la monitorización del tráfico.

De acuerdo a los objetivos de esta Tesis, la capacidad de gestión de procedimientos se desarrolló a más bajo nivel para detallar el contenido de los planes que implementan los procesos asociados a las negociaciones aire-tierra y aire-aire.

En el caso de las aeronaves, la arquitectura interna de éstas alberga los planes para la planificación de vuelo puerta a puerta (*Planificación de vuelo*), para la planificación o actualización de trayectorias para cada fase o etapa del vuelo antes de su ejecución (*planificación de siguiente procedimiento*) y para la planificación de modificaciones de trayectoria que se encuentran en fase de ejecución (*re-planificación de trayectoria*). Una vez negociada una trayectoria (o parte de ésta) una nueva sub-capacidad genera eventos específicos para implementar dicha trayectoria. Entre estos planes, se encuentran los que implementan la negociación aire-tierra y aire-aire. El primero forma parte de la capacidad *planifica siguiente procedimiento* mientras que el segundo forma parte de la capacidad *re-planifica actual procedimiento*.

En el caso del ATC, hay que tener en cuenta que la gestión de procedimientos, en lugar

5. Modelado de los agentes críticos: agente Aeronave y agente ATC

de ser vista desde el punto de vista de la fase del vuelo, es vista desde el punto de vista de la región de espacio aéreo y del tipo de tráfico asignado dentro de esta región. En este sentido los planes para la negociación aire-tierra se encuentran dentro de la capacidad *separación estratégica* que, a su vez, forma parte de la capacidad de *gestión de procedimientos ATC*.

Los elementos de esta arquitectura de agentes son además los elementos del modelo conceptual que son directamente implementables para obtener un modelo ejecutable. Dependiendo de las funcionalidades implementadas, el modelo ejecutable puede ser utilizado tanto en simulación continua como en simulación de eventos discretos.

La elección de la plataforma de implementación está ligada a las características de este modelo. De esta forma, es posible utilizar plataformas que implementen el modelo BDI de agentes, o bien, teniendo en cuenta que el modelo está dirigido por eventos y que las comunicaciones jugarán un papel fundamental dentro del diseño, es posible utilizar otras plataformas como JADE.

Por otro lado la modularidad de la arquitectura interna alrededor del concepto de capacidad proporciona una correspondencia directa entre éstos y la de los sistemas funcionales para llevar a cabo operaciones TBO.

En el caso de las aeronaves, las capacidades de gestión de procedimientos de navegación junto con la de guiado de trayectoria son el núcleo de un futuro prototipo de Sistema de Gestión de Navegación para TBO. Este sistema realiza las funciones de planificación de vuelo y navegación de los actuales FMS y además incorpora otras funciones para: *(i)* dirigir los procesos de negociación de trayectoria, *(ii)* evaluar las propuestas de trayectoria procedentes otros agentes y generar contrapropuestas y *(iii)* proporcionar guiado a lo largo de trayectorias 4D.

De la misma manera, en el ATC las capacidades de gestión de procedimientos junto con la de monitorización de trayectorias constituyen el núcleo del sistema de control de tráfico. Ello facilita la automatización de las tareas de planificación estratégica de trayectorias así como las de gestión de contingencias. También, las prestaciones de los actuales sistemas de monitorización de ATC se ven mejoradas con la incorporación de la gestión de los datos sobre el estado de los procedimientos enviados por las aeronaves.

Capítulo 6

Conclusiones generales y líneas futuras de investigación

6.1. Conclusiones generales

En esta Tesis se ha desarrollado un modelo conceptual de los escenarios de tráfico aéreo en un entorno de Operaciones Basadas en Trayectoria. Esta propuesta da respuesta a la actual demanda de modelos conceptuales que cumplan con los requisitos planteados al definir los objetivos y ámbito de esta Tesis. De acuerdo a estos requisitos, el modelo presenta las siguientes características:

- Incorpora procedimientos automatizados para la navegación aérea y el control de tráfico aéreo basados en trayectorias 4D.
- Pone de manifiesto las interdependencias que existen entre los procedimientos de operación, los sistemas requeridos para su ejecución y los modelos matemáticos subyacentes a dichos sistemas.
- Ofrece una arquitectura modular y robusta que posibilita la incorporación de nuevas propuestas de los elementos anteriores a medida que vayan siendo diseñadas.
- Presenta un diseño detallado y estructurado que facilita la posterior obtención de un modelo ejecutable para la simulación analítica y la validación de conceptos.

El modelo obtenido es resultado de un análisis y diseño metodológico para describir las operaciones de tráfico aéreo de llegada y aproximación en áreas terminales como un sistema multiagente. La variabilidad de las condiciones operacionales y la elevada carga de trabajo de los principales operadores del sistema (pilotos y controladores aéreos) en esta fase de las operaciones han aportado información suficiente para definir un esquema de gestión

6. Conclusiones generales y líneas futuras de investigación

automatizada de procedimientos y una arquitectura funcional de los sistemas de aeronave y ATC, extensible a todas las operaciones puerta a puerta.

El enfoque metodológico aplicado se basó en la metodología *Prometheus* de diseño de sistemas multiagente. Este enfoque se ha mostrado apropiado en la medida en que el mismo:

- Da lugar a un modelo estructurado en varios niveles de abstracción. Esta naturaleza estructurada permitió la verificación de la integridad y la consistencia del modelo en cada una de sus tres etapas de diseño: especificación, diseño de arquitectura y diseño detallado.
- Proporciona pautas concretas para obtener una especificación del sistema basada en una estructura jerárquica de objetivos. A su vez, los objetivos fueron definidos a partir de un conjunto organizado de escenarios que ilustran el comportamiento operacional del sistema. Los objetivos de nivel inferior permitieron además determinar las diferentes funcionalidades, datos, acciones y percepciones del sistema.
- Aporta una visión funcional de la estructura del sistema de tráfico aéreo a través del diseño de una arquitectura en la que se ponen de manifiesto los roles de los agentes que la constituyen y sus interacciones. Las interacciones se han descrito en términos de mensajes o protocolos de comunicación entre los agentes que cooperan, bien para incrementar su conocimiento del entorno, o bien para negociar las características de las trayectorias a llevar a cabo por las aeronaves.
- Propone una arquitectura interna de los agentes basada en planes. Los planes implementan tanto los procesos derivados de los protocolos de interacción con otros agentes como las funcionalidades de éstos. En dicha arquitectura, los planes destinados a lograr objetivos afines están organizados modularmente alrededor del concepto de capacidad. Esta arquitectura modular permite modificar o incluir nuevos planes en el diseño, proporcionando así un carácter flexible al modelo a la hora de implementar nuevos protocolos y funcionalidades que mejoren las capacidades de los agentes. Además, el grado de detalle de esta arquitectura interna y su naturaleza estructurada es uno de los elementos claves para obtener un modelo ejecutable mediante las actuales plataformas de agentes.
- Relaciona de una forma natural los componentes del modelo que ofrecen una perspectiva dinámica del mismo con aquellos otros que aportan una visión estructural. Los protocolos y procesos que recogen el comportamiento dinámico representan a los procedimientos para un entorno TBO. La arquitectura interna basada en las capacidades y planes que implementan procesos y funcionalidades se corresponden

con los sistemas funcionales requeridos por los agentes para llevar a cabo los procedimientos.

El modelo propuesto es por tanto el elemento vertebrador alrededor del cual se han materializado las demás contribuciones de esta Tesis que se indican a continuación.

1. Una estructura de escenarios para describir los aspectos operacionales de un entorno TBO y para definir objetivos

La estructura de escenarios propuesta desarrolla las pautas generales recogidas en los conceptos DAG-TM y TBO. El despliegue de estos escenarios se basa en la propuesta de un esquema para la gestión de procedimientos de aeronave y de ATC para la planificación y ejecución de trayectorias de vuelo.

Esta estructura de escenarios presenta las siguientes ventajas:

- Considera las perspectivas de las diferentes entidades que participan en las operaciones de tráfico desarrollando escenarios para la gestión de sus respectivas tareas.
- Tiene en cuenta las interdependencias de las gestiones de las entidades anteriores a través de sub-escenarios comunes a varios agentes para la coordinación de tareas y la negociación de propuestas.
- Es aplicable a todas las fases del vuelo mediante la incorporación de nuevos sub-escenarios de bajo nivel que recojan los correspondientes protocolos y procesos.
- Permite definir los objetivos de cada entidad de una manera estructurada y detallada.

2. Una especificación de las funcionalidades para TBO

Estas funcionalidades fueron identificadas a partir de los objetivos de nivel inferior. Su especificación en términos de datos usados y producidos, así como los cálculos que éstas llevan a cabo, se basó en el análisis de las actuales propuestas sobre modelos matemáticos y algoritmos para operaciones TBO. Esta especificación permitió caracterizar el interfaz entre agentes y entorno a través del conjunto de percepciones y acciones vinculadas a las funcionalidades.

3. Un modelo para guiado y control 4D para operaciones de descenso

Este modelo fue propuesto con el fin cubrir la ausencia de especificaciones para los sistemas de guiado y control 4D para las operaciones de descenso. Estas especificaciones son particularmente necesarias para este tipo de operaciones debido a la

6. Conclusiones generales y líneas futuras de investigación

variabilidad de las componentes horizontal y vertical de la velocidad en esta fase del vuelo.

El modelo propuesto en esta Tesis se basa en un esquema de control dinámico híbrido. Este esquema combina el seguimiento de trayectorias 4D con los actuales procedimientos de descenso que establecen velocidades constantes para cada segmento de descenso. Además incorpora estados lógicos discretos dentro del sistema de control para caracterizar las desviaciones longitudinales y desviaciones verticales alrededor del perfil de descenso negociado. Dichos estados discretos describen las actuaciones de la aeronave a partir de las restricciones espacio-temporales que impone la trayectoria de referencia. Por esta razón, estos estados fueron incluidos como parte de la información de estado de los agentes aeronave (estados de procedimiento). Esta información es además enviada al ATC, complementando así la información utilizada por este agente en la monitorización de las trayectorias asignadas a las aeronaves.

4. Identificación de agentes

La arquitectura del sistema incluye a las distintas entidades autónomas y proactivas que forman parte del escenario de operaciones de llegada: aeronaves, control de tráfico aéreo, compañías aéreas, proveedores de servicio información al tráfico, etc. En esta arquitectura, los agentes aeronave y al ATC son los agentes críticos que deben conciliar sus respectivos objetivos. Los agentes proveedores de servicio de información meteorológica y de recursos de espacio aéreo gestionan la información procedente de distintas fuentes para contribuir a incrementar la base de conocimientos de aeronaves y ATC. Entre estas fuentes se incluyen los dos agentes anteriores.

Asimismo, se han considerado otros agentes con el fin de extender el modelo propuesto a todos escenarios de las operaciones puerta-a-puerta. Entre estos agentes se encuentran los que coordinan las tareas de transferencia y recepción de tráfico de llegada con el ATC-Llegadas: ATC-Rutas, ATC-Aeropuerto y ATC-Salidas. También se ha incluido al agente Control de Operación de Compañía que define en cada instante los objetivos de las aeronaves adscritas a él.

5. Desarrollo de protocolos de negociación entre agentes

Entre las distintas interacciones entre agentes que fueron consideradas en esta Tesis, se diseñaron de manera detallada aquellas que representan el núcleo de las negociaciones para la planificación estratégica y táctica de trayectorias. En este último caso se ha abordado la negociación aire-aire como una extensión de las capacidades de los actuales prototipos para la autoseparación.

Junto a los protocolos anteriores se desarrollaron los procesos que se derivan de

los mismos, tanto en el agente aeronave como en el ATC. Los protocolos y sus procesos han proporcionado información suficiente para llevar a cabo el diseño de la arquitectura del agente.

6. Protocolos y procesos como parte integrante de los procedimientos

Se ha constatado que los protocolos y sus correspondientes procesos forman parte de los procedimientos en la medida en que recogen las tareas de planificación, ejecución y modificación de trayectorias. En este contexto se propuso la variable de estado de procedimiento para capturar la información relativa a su comportamiento dinámico. Esta variable facilita la gestión automatizada de los procedimientos a la vez que posibilita una alta comprensión de su evolución por parte de pilotos y controladores. Además esta información puede intercambiarse con los sistemas de tierra y otros sistemas de aeronave con el fin de mejorar los mecanismos de vigilancia y coordinación en escenarios TBO.

7. Arquitectura interna de los agentes aeronave y ATC

La arquitectura de capacidades de los agentes es válida para todas las operaciones de vuelo y contiene todos los elementos del modelo conceptual que son implementables. Por tanto los descriptores de estos elementos proporcionan la información necesaria para desarrollar un modelo ejecutable para la simulación analítica destinada al diseño y validación operacional de los componentes del modelo: procedimientos, sistemas y algoritmos subyacentes. Esta arquitectura, junto con la arquitectura del sistema, también se pone de manifiesto las bondades de la tecnología de los SMA para modelar e implementar plataformas de simulación que requieran una alta modularidad, flexibilidad y extensibilidad.

8. Arquitectura de los sistemas funcionales de aviónica y ATC para entornos TBO automatizados

La modularidad de la arquitectura interna de los agentes alrededor del concepto de capacidad, proporciona una correspondencia directa entre éstas y los sistemas funcionales requeridos para gestionar sus respectivos procedimientos. En el caso de las aeronaves, las capacidades propuestas constituyen el modelo de un nuevo sistema de gestión de procedimientos. Este sistema extiende las capacidades de los actuales FMS e incorpora la gestión automática de procedimientos de navegación y el seguimiento de trayectorias 4D. En el caso del ATC, también se obtiene una arquitectura de sistemas para la gestión automatizada de los procedimientos de llegada y para la monitorización de trayectorias de aeronaves.

6.2. Líneas futuras de investigación

El modelo desarrollado en esta Tesis permite incorporar nuevos diseños sobre procedimientos y funcionalidades para TBO. Teniendo en cuenta además los objetivos de este trabajo, las líneas de investigación abiertas tienen que ver con la necesidad de completar, a partir del modelo propuesto, el ciclo de vida de los procesos de diseño y evaluación de procedimientos y subsistemas.

De acuerdo a este planteamiento, las líneas de trabajo futuro se pueden agrupar en cuatro bloques principales. Los tres primeros recogen diferentes extensiones del modelo presentado con el fin de incorporar de manera progresiva procedimientos y subsistemas que extiendan la automatización de las operaciones a todas las fases del vuelo. El cuarto bloque de actividades se refiere a la obtención de modelos ejecutables para la simulación analítica destinada a la validación operacional de los referidos procedimientos y sistemas.

Estas cuatro áreas de investigación son las siguientes:

1. Descripción del comportamiento dinámico del sistema de tráfico extendida a todas las fases de las operaciones de vuelo.

Para ello es preciso desarrollar los diversos tipos de interacción identificados en la arquitectura desarrollada en el *capítulo 3*. Ello requiere proponer nuevos protocolos de coordinación y de negociación específicos de acuerdo a las pautas empleadas en el *capítulo 4* para diseñar los protocolos aire-tierra y aire-aire. Junto a estos protocolos también es necesario completar un modelo de intenciones para definir la trayectoria y un lenguaje de dominio para expresar otros conceptos ligados a las operaciones del vuelo.

Los nuevos protocolos de coordinación y negociación podrán incorporarse al modelo conceptual propuesto con el fin de evaluar y validar los procedimientos a los que pertenecen. En particular, los siguientes aspectos deberán ser explorados y desarrollados:

- El diseño de protocolos de negociación aire-tierra para modificaciones de tipo táctico de las trayectorias para la resolución de contingencias, así como protocolos de coordinación tierra-tierra para la transferencia y recepción de tráfico entre dependencias.
- La extensión del modelo propuesto en esta Tesis de negociación aire-aire para incluir soluciones que impliquen adelantamientos laterales así como la negociación intergrupala.

El modelo de intenciones de aeronave debe recoger las distintas maneras posibles de expresar la trayectoria para un determinado intervalo espacio-temporal así como

los argumentos para formular preferencias de aeronave e instrucciones de ATC. Las intenciones se corresponderán con una trayectoria 4D definida de forma unívoca o bien con conjunto de restricciones que corresponda a un conjunto limitado de trayectorias 4D. La información anterior tiene la finalidad de facilitar la automatización y la interoperabilidad de los sistemas FMS de las aeronaves y los sistemas de control de ATC.

El lenguaje de dominio para las operaciones TBO deberá definirse mediante una ontología para las comunicaciones aire-tierra, aire-aire y tierra-tierra. Esta ontología se podrá desarrollar a partir del esquema de gestión de procedimientos y de los distintos eventos recogidos en nuestro modelo conceptual.

2. Desarrollo de las capacidades de agentes.

Ello permitirá incrementar los mecanismos coordinación para la toma de decisiones compartida en un entorno de gestión automatizada de las operaciones de tráfico aéreo. El desarrollo de estas capacidades gira principalmente alrededor de la capacidad de gestión de contingencias, la cual vincula la gestión de los procedimientos con los eventos procedentes de las demás capacidades.

Las capacidad de gestión de contingencias tanto a nivel de aeronave como de ATC, podría incorporar esquemas de razonamiento específicos para la búsqueda de planes alternativos en función de los distintos tipos de contingencias definidos en esta Tesis. La arquitectura BDI de estos agentes y los objetivos definidos para esta capacidad sugiere la utilización de esquemas de razonamiento basado en reglas.

Además de la capacidad anterior, otras capacidades deberán incorporar planes específicos para el logro de todos sus objetivos. En particular, la capacidad de gestión de procedimientos deberá completarse para incluir en ella planes que recojan todos los procedimientos para las operaciones puerta a puerta.

Por otra parte, la arquitectura interna de los agentes basada en capacidades también sugiere un nuevo esquema de diseño de los agentes críticos (por tratarse de los más complejos) como sistemas multiagente. De acuerdo a esta propuesta, las capacidades de los agentes de nuestro modelo serán consideradas como agentes de estos nuevos sistemas multiagente.

3. Desarrollo de funcionalidades.

Entre estas funcionalidades cabe destacar la necesidad de llevar a cabo nuevos estudios para validar un prototipo FMS4D a partir del modelo presentado en esta Tesis. Estos estudios deben contemplar:

6. Conclusiones generales y líneas futuras de investigación

- Un análisis de su estabilidad numérica frente a modelos de viento no estacionario aplicados sobre modelos aerodinámicos de seis grados de libertad.
- Un análisis de los efectos en las estimaciones debidos a la incertidumbre sobre la posición espacial de la aeronave.
- La extensión del modelo de sendas laterales para incluir correcciones longitudinales y verticales de forma simultánea, así como desviaciones laterales durante el viraje en los *waypoints* de la ruta.

Además del prototipo FMS4D, es necesario desarrollar interfaces de usuario para introducir percepciones y presentar adecuadamente las acciones de los agentes.

4. Obtención de un modelo ejecutable a partir del modelo conceptual propuesto en esta Tesis, así de como aquellas otras extensiones que resulten del desarrollo de los aspectos anteriores.

La obtención de un modelo ejecutable para la simulación analítica cierra el ciclo de vida de los procesos de diseño, evaluación y validación preliminar de procedimientos y sistemas para operaciones TBO. La implementación de un modelo para la simulación continua requiere que el modelo conceptual disponga no sólo de un modelo dinámico específico de las aeronaves sino también de sistemas evaluadores y generadores de propuestas de trayectoria y para el guiado 4D. En ausencia de éstos componentes también es posible implementar un modelo de eventos discretos para el análisis y evaluación de diferentes esquemas de gestión de procedimientos y de contingencias. En este caso, la generación de eventos puede realizarse a partir de modelos estadísticos que representen procesos de evaluación y generación de propuestas así como variaciones de las condiciones del entorno.

Apéndice A

Verificación de integridad y consistencia del modelo

El diseño del modelo presentado en los capítulos anteriores lleva implícito diversos controles para verificar su integridad y consistencia a medida que se diseña. El proceso de verificación se lleva a cabo cruzando la información autocontenida en cada uno de sus componentes. El carácter estructurado del modelo y de sus elementos facilita la automatización de la mayoría de las tareas de comprobación a través de herramientas software como *Prometheus Development Tool* (PDT) [Padgham y Winikoff 2008].

De acuerdo al esquema metodológico descrito en el *capítulo 3* y representado en la figura 3.1, las comprobaciones se realizan tanto en forma vertical como en forma horizontal. Las comprobaciones verticales permiten analizar la consistencia entre los artefactos que corresponden a distintas fases del diseño. Las comprobaciones horizontales aseguran la consistencia entre las perspectivas dinámica y estructural en cada fase y entre éstas sus descriptores.

Las pautas seguidas para la verificación de integridad del modelo se resumen a continuación.

A.1. Integridad y consistencia de las especificaciones

La comprobación de la integridad y la consistencia de las especificaciones mediante la verificación de los siguientes aspectos:

- Consistencia de los nombres utilizados, de forma que un mismo elemento (objetivo, funcionalidad, dato, etc.) no sea referenciado con distintos nombres en diferentes partes del diseño.
- Vinculación de todos los objetivos a algún escenario y funcionalidad. Es decir, los

A. Verificación de integridad y consistencia del modelo

objetivos deben estar incluidos dentro de algún escenario. Todos los sub-objetivos pertenecientes a un objetivo que esté incluido en un escenario también forman parte de dicho escenario. Además los objetivos que no sean abstractos deben estar asociados a alguna funcionalidad. La vinculación de objetivos a escenarios y funcionalidades asegura que la especificación del sistema esté realizada de acuerdo a los objetivos del sistema.

- Vinculación de todas las acciones y percepciones a escenarios y funcionalidades. Esta verificación tiene la finalidad de comprobar que todas las acciones y percepciones definidas están recogidas en el modelo.

A.2. Integridad y consistencia de la arquitectura

Las tareas de verificación de la integridad y consistencia de la arquitectura se agrupan en cuatro categorías:

- Consistencia entre los descriptores de agentes y los descriptores de las funcionalidades que contiene.
- Consistencia entre diagramas de interacción, protocolos y escenarios.
- Consistencia de las especificaciones de comunicación.
- Consistencia entre los descriptores de agentes y el diagrama del sistema.

Las dos primeras categorías consisten en verificaciones de tipo vertical que cruzan información de los componentes obtenidos en la fase de especificación, mientras que las dos últimas consisten en comprobaciones horizontales realizadas entre los artefactos obtenidos en la fase de diseño de la arquitectura.

La consistencia entre agentes y sus funcionalidades implica comprobar que cada funcionalidad esté asignada a cada agente. Para ello se realizan otras comprobaciones más detalladas tales como:

- Las acciones y los objetivos incluidos en el descriptor de cada agente son los mismos que los que se obtienen mediante la unión de los campos equivalentes de los descriptores de sus funcionalidades.
- La información usada y producida por las funcionalidades se corresponde con los datos leídos o escritos por el agente así como con sus datos internos.

La consistencia entre escenarios, diagramas de interacción y protocolos se logra mediante las siguientes comprobaciones:

- Cada escenario debe tener su correspondiente diagrama de interacción, salvo que todas funcionalidades del escenario pertenezcan al mismo agente.
- Los diagramas de interacción correspondientes a un determinado escenario deben cumplir los siguientes requisitos:
 - Cada uno de los agentes que forman parte de la interacción recibe algún tipo de información (bien en forma de mensaje procedente de otro agente o a través de una percepción o un disparador interno) antes de enviar cualquier mensaje.
 - Cada uno de los mensajes de entrada y/o salida de cada agente están vinculados a alguna funcionalidad propia.
- Los diagramas de interacción que impliquen algo más que un simple mensaje (posiblemente con respuesta), están representados dentro de algún protocolo¹. Dichos protocolos se verifican de la siguiente manera:
 - Cada uno de los protocolos debe estar incluido en algún escenario. Cuando no sea así, es necesario volver a la fase de especificación para crear un escenario en el cual incluirlo. De esta forma los escenarios son una parte importante del documento de diseño final para la comprensión del modelo.
 - Los protocolos que describen una cierta interacción deben cubrir todas las posibilidades. De esta forma si un protocolo está referido a un escenario compuesto de diversos sub-escenarios, entonces el mismo deberá incluir en su secuencia de mensajes todas las variaciones de dicho escenario².

La comprobación de la consistencia de las especificaciones de la comunicación es una verificación de tipo horizontal que se realiza para cada uno de los siguientes componentes del modelo: los protocolos, el diagrama general del sistema y los descriptores de los agentes. Los protocolos definidos en el diagrama general del sistema deben estar mencionados tanto en los descriptores del diagrama general del sistema como en los descriptores de los agentes ligados por el protocolo. También los mensajes que forman parte del protocolo, así como los agentes implicados en la comunicación (con indicación expresa del agente de procedencia o destino) están especificados tanto en los descriptores de dichos protocolos como en los del diagrama general y en el de los agentes implicados. De manera inversa, si el descriptor de un agente indica que interactúa con otro agente, entonces la interacción

¹Las intersecciones únicas pueden ser mostradas bien mediante un protocolo degenerado o por un mensaje individual o un mensaje más un respuesta.

²En esta Tesis, los protocolos de negociación están asociados a escenarios que no requieren ninguna descomposición a nivel inferior.

debería estar evidenciada en el descriptor de protocolo (o en el descriptor de un mensaje único o pareja de mensajes si el protocolo no se usa para este caso).

Por último, la verificación de la consistencia entre descriptores y el diagrama del sistema se realiza mediante la comprobación de los siguientes ítems:

- Todos los agentes están representados en el diagrama del sistema junto con las distintas acciones, percepciones y datos persistentes almacenados.
- Todas las percepciones y acciones del diagrama están ligadas a los agentes a través de sus respectivos descriptores.
- Las lecturas y las escrituras de los datos almacenados son consistentes con los descriptores de los agentes así como con los descriptores de los datos.

A.3. Integridad y consistencia del diseño de los agentes

Las tareas de comprobación de integridad y consistencia de los agentes se agrupan en tres categorías: integridad de los agentes, ausencia o redundancia de ítems y consistencia entre artefactos.

- La integridad de los agentes se verifica comprobando que éstos incluyen todas las funcionalidades creadas para ellos y que todos los mensajes requeridos por el agente para su participación en un protocolo son generados o recibidos por éste. En general, el hecho de que todas las funcionalidades estén representadas por capacidades asegura que todas las funcionalidades del agente están recogidas. Por otra parte, y dado que los planes implementan los detalles de las funcionalidades, una revisión de los disparadores de esos planes asegura que todas las situaciones están cubiertas por algún plan. También se puede revisar la superposición de planes en esta etapa
- Los ítems cuya ausencia o redundancia se comprueba durante el diseño de los agentes son los mensajes, acciones y percepciones y los datos almacenados.

Cada uno de los mensajes debe ser enviado al menos por un plan. De la misma manera cada mensaje debe ser recibido como mínimo por un plan bien como un disparador de dicho plan o bien como un elemento que contiene información que se procesa por éste. Para ello se comprueban los mensajes entrantes y salientes que están incluidos en los descriptores de cada plan.

También las acciones deben ser ejecutadas por algún plan. La recepción de una percepción da lugar a alguna de las tres circunstancias siguientes³: (i) dispara al-

³La herramienta PDT verifica de forma automática las percepciones que se utilizan para disparar planes, mientras que los otros dos casos deben ser verificados manualmente.

gún plan, *(ii)* actualiza automáticamente los datos que representan las creencias y conocimiento del agente(s) sin usar ningún plan específico ó *(iii)* es incorporada a la ejecución de un plan.

La comprobación de datos, requiere identificar qué entidades del sistema los usan y cuáles los producen⁴. Como ya se comentó durante el diseño, los datos se generan por el propio sistema o bien se obtienen a partir de fuentes de datos externas, mensajes externos y percepciones del entorno. También se puede incluir, aunque no es nuestro caso, los datos provenientes de fuentes de almacenamiento de datos externas.

- Las tareas para verificar la consistencia entre artefactos se agrupan a su vez en cuatro grupos:
 - Consistencia entre diagramas de entidades. Es decir, los enlaces entrantes y salientes desde un agente mostradas en el diagrama del sistema deben corresponder con las entradas y salidas mostradas en el diagrama del agente. De la misma forma, las entradas y salidas mostradas en este último diagrama para cada capacidad deben corresponder con las entradas y salidas de cada uno de los diagramas de dichas capacidades. Este principio también se aplica a las capacidades anidadas.
 - Consistencia entre diagramas y descriptores. En este caso se trata de verificar que los descriptores de las capacidades, planes, mensajes, acciones, percepciones y datos recogen las especificaciones del diagrama de capacidad y a la inversa.
 - Consistencia de escenarios, procesos y conjunto de planes. Se trata de una comprobación vertical para asegurar que los escenarios son capturados por procesos y éstos por un conjunto de planes dentro de cada agente.
 - Consistencia de procesos con protocolos y diagramas. Dado que los procesos son una descripción detallada del comportamiento dinámico de cada agente, es necesario verificar su consistencia frente a los protocolos a los que están vinculados asegurando que los mensajes entrantes y salientes en el proceso se corresponden con los mensajes intercambiados en el protocolo. De la misma manera los mensajes y percepciones que disparan los procesos deben estar contenidos en el diagrama de agente. Hay que señalar además las tareas de verificación de consistencia entre protocolos y procesos no son fácilmente automatizables y por lo tanto se han realizado de forma manual.

⁴Aunque no es el caso del diseño presentado en este trabajo, en ocasiones los datos pueden ser producidos por el sistema exclusivamente para propósitos externos.

A. Verificación de integridad y consistencia del modelo

Apéndice B

Pautas para la implementación en plataforma JACK

Un programa JACK consiste en un conjunto de declaraciones de las entidades siguientes: agentes, capacidades, planes, eventos y conjunto de creencias (*beliefsets* o data base en JACK). Cada una de estas entidades se declara como una clase Java cuya declaración enlaza con las otras entidades que contiene o maneja.

Los conceptos de capacidad y planes de *Prometheus* tienen nombres equivalentes en la plataforma JACK. En cambio, las percepciones, los mensajes entre agentes y los mensajes internos se consideran todos ellos como diferentes tipos de eventos. También la adquisición de nuevos objetivos se implementa mediante eventos JACK. Por último, las acciones programan de manera convencional en código Java dentro del cuerpo de los planes.

Agentes

Los agentes se declaran a partir de la clase *Agente* de JACK. El cuerpo del agente contiene las declaraciones que especifican el conjunto de creencias (*beliefsets* o *database* en JACK). También incluye los eventos que maneja (*handles*), envía a otros agentes (*sends*) o que se envían internamente entre planes (*posts*). Las creencias son los datos de nuestro modelo. Estos datos pueden ser almacenados como una instancia *software* o son instanciados a partir de una clase específica cuando se trata de una base de datos relacional. Los eventos que maneja el modelo son las percepciones y los mensajes procedentes de otros agentes. La estructura del esqueleto del código es la siguiente:

```
// Declaración del agente
public agent Aeronave extends Agent {
//Declaración de bases de conocimiento usadas por el agente
//Los datos pueden ser definidos como #agent, #global ó #private
```

B. Pautas para la implementación en plataforma JACK

```
#private data recursos RecursosEA_dat(/*lista_arg*/);
#private data meteorología DatosMeteo_dat(/*lista_arg*/);
#private data terreno BDTerreno_Aeron_dat(/*lista_arg*/);
#private data restricciones AreasRestringidas_dat(/*lista_arg*/);
#private data tráfico EstadoIntencionesTrafCircundant_dat(/*lista_arg*/);
#private data estadosAeronave EstadoProced_dat(/*lista_arg*/);
#private data procedimientos BDProced_dat(/*lista_arg*/);
#private data perfomance BDModeloAPM_dat(/*lista_arg*/);
.....
// Percepciones (requieren crear planes para su manejo)
#handles event SensoresTempPres ;
#handles event Altimetro ;
#handles event RadarMeteo ;
#handles event ReceptoresSistemPosicion ;
#handles event TCAS ;
#handles event AlarmasSistemAeron ;
#handles event ControlVueloPrimario ;
#handles event VectorVuelo ;
#handles event ContTripulaciónPasaje ;
#handles event PlanificaVuelo ;
#handles event MenúOpcionesNegoc ;
#handles event MenuOpcionesSolCont ;
...
// Mensajes entrantes de agentes
#handles event DifusionMeteo ;
#handles event InfoMeteo
#handles event MensajeTISB ;
#handles event InformRecursosEA ;
#handles event MensajeADSB ;
...
#handles event ContATC ;
#handles event ContOtraAeronave ;
#handles event ContCompañía ;
...
#handles event AutorizadaNegAireAire ;
#handles event MensajeATCConfTr0 ;
#handles event MensajeATCPropTr1 ;
```

```

#handles event MensajeATCAceptTr2 ;
...
// Eventos internos recibidos por planes
#handles event ContCambioSignEntorno ;
#handles event ContConflicto ;
#handles event ContFalloSistema ;
#handles event ContSeguimientoTrayectoria ;
#handles event ContsSalidaPlanifSteProc ;
#handles event ContsSalidaModifActualProc;
#handles event EjecutaTrayectoriaVector ;
#handles event PruebaTrayectoria ;
#handles event ConflictoPrueba ;
...
// Mensajes salientes
#sends event MensajeADSB mensajeadsb_s;
#sends event MensajeADSC mensajeadsc_s;
#sends event SolicitoInfoRecEA solicitoinforecea_s;
#sends event SolicitoInfoMeteo solicitoinfometeo_s;
#sends event ReqTr0 solicitoinfometeo_s;
#sends event AcepTr1 acepTr1_s;
#sends event PropTr2 propTr2_s ;
#sends event ContAeronave contaeronave_s;
...
// Eventos internos enviados a planes
#posts event ContCambioSignEntorno contCambioSigEnt_p;
#posts event ContConflicto contConf_p
#posts event ContFalloSistema contFalloSist_p ;
#posts event ContSeguimientoTrayectoria contSegTr_p ;
#posts event ContSalidaPlanifSteProc contSalidaPlanifSteProc_p ;
#posts event ContSalidaModifActualProc contsSalModifActualProc_p;
#posts event EjecTrayectoriaVector ejecTrVector_p;
#posts event PruebaTrayectoria pruebaTr_p;
#posts event ConfPrueba confPrueba_p;
...
//Planes usados por el agente
#uses plan InformasSobreEstadoIntencionesAeronave ;
#uses plan RepresentaEstadoProcedimiento ;

```

B. Pautas para la implementación en plataforma JACK

```
...
//Declaración de capacidades del agente
#has capability GestionProcedimientosNavegacion gestProcNav_cap ;
#has capability GestionContingenciasa bordo gestConta bordo_cap ;
#has capability DeteccionResolucionConflictos detecResolConf_cap ;
#has capability SeguimientoTrayectorias seguimientoTr_cap ;
#has capability GestionInformacionEntornoAeronave gestInfoEntAeron_cap ;
#has capability GestionAlarmasSistemasAeronave gestAlarmSistAero_cap ;
....
// Constructor
public Aeronave(String nombre /*Otros Parametros*/) { super(nombre/*Otros
parámetros*/); }
// Acciones:
/* Acción: Visualiza estado procedimientos */
/* Acción: Visualiza datos contingencia a bordo */
/* Acción: Visualiza información entorno aeron */
/* Acción: Visualiza datos conflicto a bordo */
/* Acción: Visualiza información alarma */
...
}
```

Capacidades

Las declaraciones de capacidad son similares a las declaraciones de agente.

```
// Declaración de la capacidad Gestión de Procedimientos de Navegación
public capability GestionProcedimientosNavegacion extends Capability {
//Declaración de planes usados por la capacidad
// Percepciones
#handles external event PlanificaVuelo ;
#handles external event MenuOpcionesNeg;
#handles external event ContSalidaPlanifSteProc
#handles external ContsSalidaModifActualProc;
#handles external ConflictoPrueba ;
...
// Mensajes entrantes
#handles external event AutorizadaNegAireAire ;
#handles external event MensajeATCCConfTr0 ;
#handles external event MensajeATCPropTr1 ;
```

```

#handles external event MensajeATCAceptTr2 ;
....
// Eventos internos
#handles event FinPlanificacion ;
#handles event PlanifSteProced ;
.....
// Mensajes salientes
#sends event SolicitoInfoRecEA solicitoinforecea_s;
#sends event SolicitoInfoMeteo solicitoinfometeo_s;
#sends event ReqTr0 solicitoinfometeo_s;
#sends event AcepTr1 acepTr1_s
#sends event PropTr2 propTr2_s
...
// Eventos salientes hacia otras capacidades de igual nivel
// Una declaración de eventos internos enviados a capacidades de nivel superior
// tiene la forma “posts external TipoEvento nombreEvento”;
#posts EjecTrayectoriaVector ejecTrVector_p;
#posts event PruebaTrayectoria pruebaTr_p;
#posts event ConfPrueba confPrueba_p;
....
    //Declaración de sub-capacidades
#has capability PlanifSteProcedimiento planifSteProc_cap ;
#has capability PlanifVuelo planifVuelo_cap ;
#has capability ReplanifActualProcedimiento replanifActualProc_cap ;
#has capability EjecAccionesProcedimiento ejecAccionesProc_cap ;
....
// Declaración de la base de conocimiento usadas por la capacidad.
// #agent | #global | #exports | #imports | #private
#imports data recursos RecursosEA_dat();
#imports data meteorología DatosMeteo_dat();
#imports data terreno BDTerreno_Aeron_dat();
#imports data procedimientos BDProced_dat();
#private data perfomance BDModeloAPM_dat(/*lista_arg*/);
...
#private data ListaProcedimientos_dat(/*lista_arg*/);
    ....
}

```

Eventos y mensajes

JACK proporciona diferentes tipos de eventos que se clasifican en eventos normales y eventos BDI.

Los eventos normales corresponden a los eventos convencionales en la programación dirigida por eventos. Son transitorios e inician una única e inmediata respuesta. Si la recepción de un evento normal dispara un determinado plan y la ejecución de este plan no logra sus objetivos del agente, no intenta un nuevo plan. En este caso los eventos se instancian bien a partir de la clase *Event* (por ejemplo para las percepciones) o de la clase *MessageEvent* (para los mensajes).

En cambio los eventos BDI se utilizan para representar un cambio en las creencias de un agente. Estos cambios en las creencias no tienen porqué implicar una reacción inmediata pero sí una modificación de los deseos, que pueden generar nuevos eventos que disparan planes alternativos. Existen tres tipos de eventos *BDIEvent*: *BDIFactEvent* (que sólo surgen internamente y permite al agente realizar razonamiento meta-nivel pero no plantean que éste pueda reconsiderar planes alternativos si falla el plan. Un evento *BDIMessageEvent* es un tipo mensaje enviado entre agentes y que tampoco se propone que éste reconsidere planes alternativos. Los eventos *BDIGoalEvent* que representan objetivos que el agente desea alcanzar a través de diversos planes alternativos.

Planes

Los planes se declaran a partir de la clase *Plan*. Describe una secuencia de acciones que tienen lugar cuando ocurre un evento. Cada plan es capaz de manejar un único evento. La ejecución de un plan comienza por la ejecución de su método *body()*.

Los mecanismos para la ejecución de los planes en respuesta los eventos es proporcionado por la plataforma. La declaración de plan incluye los eventos tipo *posts* y *sents* así como el acceso a datos. Esta información puede ser vista en el diagrama de la capacidad en la que se muestran los datos. El cuerpo del plan necesita ser expresado en términos de código específico. En el lenguaje JACK el cuerpo del plan se escribe en Java con la extensión de la declaración @ (por ejemplo @*achieve* o @*send*).

Para ilustrar cómo se implementan los procesos en los planes, se describe a continuación el código esqueleto de los planes de aeronave en los que implementan los procesos vinculados al protocolo de negociación aire-tierra propuesto en el *capítulo 4*. Estos planes se encuentran dentro de la *capacidad planifica siguiente procedimiento*. Como se señaló en el *capítulo 5*, entre estos planes se encuentra el plan encargado de seleccionar los sucesivos procedimientos y el plan encargado de planificar la trayectoria vinculada al procedimiento.

```

/* Declaración del Plan*/
public plan SelecciondeProcedimientoeInidioPlanificación extends Plan {
//Declaración de eventos gestionados por el plan
#handles event PlanificaSiguieteProced planificaSteProced _h;
#handles event Cont.SalidaPlanifSteProced contSalPlanifSteProced _h;
#posts event PlanificaSID planificasid _p;
#posts event PlanificacionEnRuta planificacionenruta _p;
#posts event PlanificaLlegadaAproximacion planifllegadaaprox _p;
.....
// Declaración de datos a los que accede el plan
#reads data procedimientos listadeProcedimientosNav _dat;
context() {
    //condiciones en las que se ejecuta este plan (por defecto, siempre que sea disparado)
    true;
}
body()
{
// Cuerpo del plan. Pasos que el agente realiza cuando ejecuta el plan
// an agent performs when it executes this plan.
SeleccionaSteProcedLista();
EjecutaProceimiento(procedimientoX);
}
}

```

De la misma manera el plan Planificación Llegada-Aproximación se implementa de la siguiente forma:

```

package plans;
import events.*;
import data.*;
public plan PlanificacionLlegadaAproximación extends Plan
{
//Declaración de eventos gestionados por el plan
// evento de disparo
#handles event PlanificaLlegadaAproximación planifLlegadaAprox _h;
// Percepciones
#handles event MenuOpcionesNegociacion menuOpcNeg _h;
// Mensajes entrantes
#handles event InformTr4 informtr4 _h;

```

B. Pautas para la implementación en plataforma JACK

```
#handles event ConfirmTr0 confirmtr0_h;
#handles event ProposeTr1Rt proposetr1rt_h;
#handles event AceptTr2 acepttr2_h;
#handles event ProposeTr3Rt proposetr3rt_h;
#handles event ConfirmTr3 confirmtr3_h;
#handles event CancelTr3 canceltr3_h;
#sends event RejectTr3 rejecttr3_p;
#sends event InformTr1 informtr1_p;
#sends event RequestTr0Arg requesttr0arg_p;
#sends event ProposeTr2Arg proposetr2arg_p;
#sends event AceptTr3 acepttr3_p;
#sends event EvaluaPropuesta evaluapropuesta_p;
#sends event CalculaTrayectoria calculatrayectoria_p;
#sends event AceptTr1 acepttr1_p;
// Eventos internos enviados
#posts event ActualizaRestricciones actualizarestricciones_p;
#posts event Actualizaestadoproced actualizaestadoproced_p;
/
body()
{
// @subtask(ActualizaRestricciones())
// @subtask(ActualizaEstadoProcedimientos())
// trayectoria, Tr0=CalculaTrayectoria(preferencias, restricciones)
// @sends(Request(Tr0))
// swhich (@receive)
case: Propose(Tr,Rt)
@subtask(Evalua Propuesta())
if Tr=Tr1
@subtask(Acept(Tr1))
else
Tr2=Tr;
@sutask(Propose(Tr2));
// EvaluaTrayectoria()
}
}
.....
```

Datos

Los datos pueden almacenarse en JACK bien como objetos o bien como una base de datos relacional. Los objetos se programan de manera convencional en JAVA. Los datos almacenados en bases de datos relacionales se identifican en JACK como conjunto de creencias (*beliefsets*). Las clases *beliefset* de JACK facilitan el mantenimiento de estas creencias permitiendo añadir las, eliminarlas o recuperarlas. También permiten la generación automática de eventos cuando se produzcan cambios en dichas creencias. Entre estas clases se encuentran las clases *CloseWorld* y *OpenWorld*. La primera considera que los datos almacenados en la base de datos son hechos y cualquier otro dato no almacenado en la misma es considerado como falso. En cambio la clase *OpenWorld* trata los datos almacenados como positivos y negativos mientras que la información no almacenada es considerada como desconocida.

B. Pautas para la implementación en plataforma JACK

Bibliografía

- [Saraf y Slater 2006] Saraf, A. y Slater G., 2006. An Efficient Combinatorial Optimization Algorithm for Optimal Scheduling of Aircraft Arrivals at Congested Airports. IEEE Aerospace Conference.
- [Alliot et al. 2000] Alliot, J.M., Durand, N. y Granger, G., 2000. Faces: a free flight autonomous and coordinated embarked solver. Air Traffic Control Quarterly, Vol. 8, N^o 2, pp. 109–130.
- [Andrews 1978] Andrews, J.W., 1978. A Relative Motion Analysis of Horizontal Collision Avoidance, M.I.T. Lincoln Laboratory, SAFE Journal, Vol. 8, No. 2.
- [Ayodele y Parsons 1998] Ayodele, A. y Parsons, S., 1998. A framework for building negotiating agents. Technical Report, Department of Electronic Engineering, Queen Mary and Westfield College.
- [Aumann y Hart 1994] Aumann, R.J. y Hart, S., 1994. Handbook of game theory with economic applications, Netherlands: North Holland.
- [Baley y Verhoeven 1999] Bailey, E., Verhoeven, R., 1999. PHARE Airborne Programme Final Report, DOC 98-70-19, EUROCONTROL, Bruxelles, Belgium.
- [Ballin et al. 2002] Ballin, M.G., Sharma, V., Vivona, R.A., Johnson, E.J. y Ramiscal, E., 2002. A Flight Deck Decision Support Tool for Autonomous Airborne Operations. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Moterey, CA, EEUU.
- [Ballin et al. 2002] Ballin, M., Hoekstra, J., Wing, D. y Lohr, G., 2002. NASA Langley and NLR Research of Distributed Air/Ground Traffic Management. En AIAA Aircraft Technology, Integration, and Operations Conference. Los Angeles, California.

BIBLIOGRAFÍA

- [Belkin y Stengel 1987] Belkin, B. L. y Stengel, R. F., 1987. Cooperative rule-based systems for aircraft control. 26th IEEE Conference on Decision & Control, Los Angeles, CA.
- [Bergh et a. 1996] Bergh C.P., Krzeczowski K.J. y Davis T.J., 1996. TRACON Aircraft Arrival Planning and Optimization through Spatial Constraint Satisfaction. *Air Traffic Control Quarterly*, Vol. 3, N^o 2, pp. 117-138.
- [Betts 1998] Betts, J.T., 1998. Survey of numerical methods for trajectory optimization. *Journal of Guidance control and dynamics*, 21(2), 193-207.
- [Bilimoria 2000] Bilimoria, K. D., 2000. A geometric optimization approach to aircraft conflict resolution. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Denver.
- [Bramer 1999] Bramer, E., 1999. ASAS: Investigations into Airborne Separation Assurance in a Distributed Simulation Environment—Final Report, EUROCONTROL Experimental Centre-Berlin University of Technology Institute of Aerodynamics and Astronautics.
- [Bellifemine et al. 2007] Bellifemine F, Caire G. y Greenwood, D., 2007. Developing Multi-Agent System with JADE. John Wiley & Sons, Ltd. England.
- [Bratman 1987] Bratman, M., 1987. *Intention, Plans, Practical Reason*. Harvard University Press.
- [Braubah y Pokahr 2002] Braubah L. y Pokahr A., 2002. Jadex BDI Agent System. University of Hamburg. URL <http://vsiis-www.informatik.uni-hamburg.de/projects/jadex>.
- [Brooker 2008] Brooker, P., 2008. SESAR and NextGen: Investing In New Paradigms, *The Journal of Navigation*, 61, pp. 195-208, UK.
- [Brooks 1991a] Brooks, R., 1991. Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, 47, pp. 139-159.
- [Borroks 1991b] Brooks, R., 1991, *Intelligence without Reason*. 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Sydney, Australia.

- [Busi et al. 2001] Busi, N., Ciancarini P., Gorrieri, R. y Gianluigi, Z., 2001. Coordination models: a guided tour. *Coordination of Internet agents: models, technologies, and applications*. Springer-Verlag, pp. 6-24.
- [Canino et al. 2006] Canino, J.M., González, J. y Gómez, L. A fast numerical optimization algorithm for aircraft continuous descent. 2006. ER-COFTAC2006, Las Palmas de Gran Canaria.
- [Canino et al. 2007] Canino, J. M., Gómez, L. García J., Besada, J. y Casar, J.R., 2007. A model to 4D descent trajectory guidance. *Digital Avionic Systems Conference, DAS'07*, Dallas, TX, USA.
- [Canino et al. 2007a] Canino, J. M., García J, Besasa J., Gómez L., 2007. EATS: An Agent-Based Air Traffic Simulator. *IADIS International Conference Intelligent Systems and Agents*, Lisbon, Portugal.
- [Canino et al. 2008] Canino, J. M., García J, Besasa J., Gómez L., 2008. EATS: An Agent-Based Air Traffic Simulator. *IADIS International Journal of Computer Science and Information Systems*, Vol. 3, Issue 2.
- [Canino et al. 2008a] Canino, J. M., Gómez, L. García J., Besada, J. y Casar, J.R., 2008. A 4D Trajectory Negotiation Protocol for Arrival and Approach Sequencing. *Integrated Communications Navigation and Surveillance (ICNS) Conference*. Bethesda, MD, USA.
- [Canino et al. 2008b] Canino, J. M., Gómez, L. García J., Besada, J. y Casar, J.R., 2008. Design of an air-air negotiation protocol to reorder aircraft arrivals sequence. *27th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. IEEE/AIAA pp. 3.C.6-1-3.C.6-11.
- [Canino et al. 2009] Canino, J. M., Gómez, L. García J., Besada, J. y Casar, J.R., 2009. An Agent Oriented Analysis and Modeling of Airborne Capabilities for Trajectory Based Operations. *28th Digital Avionic Systems Conference*, Orlando, FL, USA.
- [Canino et al. 2009a] Designing a Cockpit Functionalities Architecture for Trajectory Based Operations: A Methodological Agent-Oriented Analysis and Modelling. Canino, J. M., Gómez, L. García J., Besada, J. y Casar, J.R., 2009. *8th EUROCONTROL Innovative Research Workshop & Exhibition (INO-2009)*, EUROCONTROL Experimental Center, Brétigny-sur-Orge, France.

BIBLIOGRAFÍA

- [Caire et al. 2002] Caire, G. et al., 2002. Agent Oriented Analysis Using Message/UML. *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 119-135.
- [Cernuzzi y Rossi 2002] Cernuzzi, L. y Rossi, G., 2002. On the evaluation of agent oriented modeling methods. En *Proceedings of Agent Oriented Methodology Workshop*, Seattle, November.
- [Clari et al. 2002] Clari, M., Ruigrok, R., Heesbeen, B. y Groeneweg, J., 2002. Research Flight Simulation of Future Autonomous Aircraft Operations. *Proceedings of Winter Simulation Conference*, San Diego, USA.
- [Callantine et al. 2001] Callantine, T., Prevot, T., Smith, N. y Palmer, E., 2001. Simulation of CTAS/FMS Air Traffic Management. 4th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Santa Fe, NM.
- [Callantine et al. 2006] Callantine, T.J., Homola, J., Prevot, T. y Palmer, E.A., 2006. Concept Investigation via Air-Ground Simulation with Embedded Agents. *Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, Reston, VA, USA.
- [Callantine et al. 2006a] Callantine, T.J., Palmer, E.A., Homola, J., Mercer, J., Prevot, T., 2006. Agent-Based Assessment of Trajectory-Oriented Operations with Limited Delegation. En *Proc. 25th Digital Avionics Systems Conf.*, Portland, OR.
- [Coppenbarger et al. 2001] Coppenbarger, R.A., Kanning, G. y Salcido, R., 2001. Real-Time Data Link of Aircraft Parameters to the Center-TRACON Automation System (CTAS). 4th USA/Europe ATM R&D seminar, Santa Fe, NM.
- [DAG-TM 1999] DAG-TM Team, 1999. *Advanced Air Transportation Technologies Program, Concept Definition for Distributed Air/Ground Traffic Management (DAG-TM), Version 1.0*, NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA.
- [de Boer et al. 2003] de Boer, F., van Eijk, R.M., van der Hoek, W. y Meyer, J.J., 2003. A fully abstract model for the exchange of information in multi-agent systems. *Theoretical Computer Science*, 290(3):1753-1773.

- [de Jonge 2002] de Jonge, H.W.G., 2002. Refined Flow Management: An operational concept for Gate-to-Gate 4D flight planning. NLR-TP-2002-057. National Aerospace Laboratory NLR.
- [de Jonge y Terlouw 2002] de Jonge, H.W.G. y Terlouw, J.C., 2002. Collaborative flight planning in Europe: A contribution from NLR to identify operational concepts in ACARE. NLR-TP-2002-225. National Aerospace Laboratory NLR.
- [De Mata 2002] De Mata, J., 2002. Sistemas CNS/ATM Aena, Madrid. España.
- [Ding et al. 2003] Ding, Y., Rong, J. y Valasek, J., 2003. Automation Capabilities Analysis Methodology for Non-Controlled Airports. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit. Austin, Texas.
- [Duong y Zeghal 1997] Duong, V. y Zeghal, K., 1997. Conflict resolution advisory for autonomous airborne separation in low-density airspace. IEEE Conference on Decision and Control, San Diego.
- [Durand et al. 1995] Durand, N., Alliot, J.M. y Chansou, O., 1995. Optimal resolution of en route conflicts. Air Traffic Control Quarterly, Volumen 3, Núm. 3, pp. 139-161.
- [Durand et al. 1995] Durand, N., Alliot, J. y Chansou, O., 1995. An optimizing conflict solver for atc Air Traffic. Quarterly, 3 (3): 139 -161.
- [Dura et al. 2008] Durá D., Canino, J.M., García, J., Besada J., Gómez, L., 2008. Simulador de Tráfico Aéreo con fines experimentales basado en Sistemas Multiagente. 3^a Conferencia Ibérica de Sistemas y Tecnologías de la Información (CISTI). Orense, España.
- [Durfee 1999] Durfee E. H., 1999. Practically coordinating. Artificial Intelligence Magazine, Vol. 20, Núm. 1, pp. 99-116.
- [Durfee 2002] Durfee, E., 2002. Delegation of separation assurance to aircraft: towards a framework for analysing the different concepts and underlying principles. International Council of the Aeronautical Sciences Congress (ICAS), Harrogate, UK.
- [Eby y Kelly 1995] Eby, M.S., 1995. A self-organizational approach for resolving air traffic conflicts. The Lincoln Laboratory Journal, 7(2), 239-254.

BIBLIOGRAFÍA

- [Eby y Kelly 1999] Eby, M.S. y Kelly, W., 1999. Free flight separation assurance using distributed algorithms. En Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. pp. 429-441.
- [EEC et al. 1995] Memo on the Calculation of Energy Share Factor. EEC/-FAS/BYR/95/50, Vol. 22.
- [Ernst y Krishnamoorthy 2001] Ernst, A. T., Krishnamoorthy, M., 2001. Algorithms for Scheduling Aircraft Landings, CSIRO Mathematical and Information Sciences, Clayton VIC Australia.
- [Erzberger 1993] Erzberger, H., Davis, T.J. y Green, S., 1993. Design of Center-TRACON Automation System. AGARD Guidance and Control Symposium on Machine Intelligence in Air Traffic Management, Berlin, <http://www.ctas.arc.nasa.gov>
- [Erzberger 2004] Erzberger, H., 2004, Transforming the NAS: The Next Generation Air Traffic Control System. Proceedings of the International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS), Yokohama, Japan.
- [Erzberger 1995] Erzberger, H., 1995. Design Principles and Algorithms for Automated Air Traffic Management. AGARD Lecture Series, Vol. 200.
- [Erzberger 2006] Erzberger, H., 2006. Automated Conflict Resolution for Air Traffic Control. 25th International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS).
- [Esteva et al. 2001] Esteva, M., Rodríguez-Aguilar, J.A., Sierra, C., Garcia, P. y Arcos, J.L., 2001. On the formal specifications of electronic institutions. Lecture Notes in Artificial Intelligence, pp 126-147. Springer.
- [Eurocontrol 1987] Eurocontrol, 1987. Aircraft Modelling Standards for Future ATC Systems; Eurocontrol Division E1 Document No. 872003. Bruxelles.
- [Eurocontrol 1997] Eurocontrol, 1997, Phare: EFMS Phase 1.b. Technical Report DOC 96-70-15, Bruxelles.

- [Eurocontrol 1994] Graham, R.V., Young, D., Pichancourt, I., Marsden, A., y Irkiz, A., 1994. ODID IV Operational Display and Input Development, Version IV. Simulation Report. http://www.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/document/eec/report/1994/025_ODID_IV_simulation.pdf.
- [Eurocontrol 2009a] Eurocontrol, 2009. User Manual For The Base Of Aircraft Data (Bada) - REVISION 3.7. http://www.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/document/eec/report/2009/003_BADA_3_7_User_manual.pdf
- [Eurocontrol 2009b] Eurocontrol, 2009, SESAR Programme Home, http://www.eurocontrol.int/sesar/public/subsite_homepage/...homepage.html.
- [FAA 1999] Federal Aviation Administration, 1999. National Airspace System Architecture, Version 4.0, ASD-1, Washington, DC.
- [FAA 2005] Federal Aviation Administration, 2005. U.S. Terminal and En Route Area Navigation (RNAV) Operations, FAA Advisory Circular 90-100, F, Washington, DC.
- [FAA 2007] Federal Aviation Administration, 2007, Federal Aviation Administration National Airspace System Operational Evolution Partnership, Version 8, Washington, DC, www.faa.gov/programs/oep/partnership/Index.
- [Fahle et al. 2003] Fahle, T., Feldmann, R., Gotz, S., Grothklags, S. y Monien, B., 2003. The aircraft sequencing problem. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 2598, pp. 152-166.
- [Fatima et al. 2004] Fátima, S., Wooldridge, M. y Jennings, N., 2004. An agenda-based framework for multi-issue negotiation. Artificial Intelligence, Vol. 152, Núm. 1, pp. 1-45.
- [Ferguson 1992] Ferguson, I. A. 1992. TouringMachines: An Architecture for Dynamic, Rational, Mobile Agents. PhD thesis, Clare Hall, University of Cambridge, UK.
- [Gallo et al. 2006] Gallo, E., Navarro, FA, Nuic, A. y Iagaru, M., 2006. Advanced Aircraft Performance Modeling for ATM: BADA 4.0 Results.

BIBLIOGRAFÍA

- 25th Digital Avionics Systems Conference, IEEE/AIAA. pp. 1-12, Portland, OR.
- [Gallo et al. 2007] Gallo, E., Lopez-Leones, J., Vilaplana, MAE, Navarro, FA y Nuic, A. 2007. Trajectory computation infrastructure based on bada aircraft performance model, 25th Digital Avionic System Congress, Dallas.
- [Granger et al. 2001] Granger, G., Durand, N. y Alliot, J.M., 2001. Token allocation strategy for free-flight conflict solving. Innovative Applications of Artificial Intelligence — Conference Proceedings. Seattle, WA, USA, pp. 59-64.
- [Garcia 1990] Garcia, J., 1990. MAESTRO - A Metering and Spacing Tool. Proceedings of American Control Conference, San Diego, California, pp. 502-507.
- [Geisinger 1985] Geisinger, K.E., Airspace Conflict Equations, Transportation Science, Vol. 19, No. 2, 1985.
- [Georgeff y Lansky 1987] Georgeff, M y Lasnskym A.L., 1987. Reactive reasoning and planning. Sixth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-87), Seattle, WA.
- [Geser y Muñoz 2002] Geser, A., Munoz, C., 2002. A geometric approach to strategic conflict detection and resolution, AIAA/IEEE Digital Avionics for Commercial and Military Systems — Proceedings, vol. 1. Irvine, CA, USA, pp. 6B11-6B111.
- [Wing et al. 2002] Wing, D.J., Barmore, B.E. & Krishnamurthy, K., 2002. Use of Traffic Intent Information by Autonomous Aircraft in Constrained Operations. AIAA Guidance Navigation and Control Conference. Monterey, CA.
- [Glaser 1996] Glaser, N., 1996. Contribution to Knowledge Modelling in a Multi-Agent Framework (the CoMoMAS Approach). PhDthesis, Lniverstit Henri Poincar, Nancy I, France.
- [Glover y Ligeros 2004] Glover, Willian, John Lygeros, 2004. A multi-aircraft model for conflict detection and resolution algorithm evaluation, Technical Report WP1, Deliverable D1.3, HYBRIDGE, <http://www.nlr.nl/public/hostedsites/hybridge/>.

- [Glover y Ligeros 2004] Glover, Willian, John Lygeros, 2004, Simplified models for conflict detection and resolution algorithms, Technical Report WP1, Deliverable D1.4, HYBRIDGE, Available from World Wide Web: <http://www.nlr.nl/public/hostedsites/hybridge/>.
- [Glover y Ligeros 2004] Glover, W. y Lygeros, J., 2004. A Stochastic Hybrid Model for Air Traffic Control Simulation. En *Hybrid Systems: Computation and Control*. LECTURE NOTES IN COMPUTER SCIENCE. pp. 372-386.
- [Gong y Chan 2002] Gong, C. y Chan, W.N., 2002. Using Flight Manual Data to Derive Aero-Propulsive Models for Predicting Aircraft Trajectories. Los Angeles, CA.
- [Green et al. 1998] Green, S.M., Vivona, R.A., and Grace, M.P. 1998. Field Evaluation of Descent Advisor Trajectory Prediction Accuracy for En Route Clearance Advisories. AIAA Paper 98-4479, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Conference, Boston, MA.
- [Haddadi y Burmeister 1997] Haddadi, A. y Burmeister, B. 1996. Belief-Desire-Intentions Agent Architectures. En *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*, 169-185. O'Hare G. M. P., Jennings N.R. Edit. Willey-Interscience Publication.
- [Harper et al. 1999] Harper, K.A., Mulgund, S.S., Guarino, S.L., Mehta, A.V. y Zacharias, G.L., 1999. Air traffic controller agent model for Free Flight. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, pp. 288-301, Portland, OR.
- [Hoffman et al. 1999] Hoffman, E., Zeghal, K., Cloerec, A., Grimaud, I. y Nicolaon, J.P., 1999. Operational Concepts for Limited Delegation Of Separation Assurance to the Cockpit. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Portland.
- [Howden et al. 2001] Howden, N., Rönnquist, R., Hodgson, A. y Lucas A., 2001. JACK intelligent agents: Summary of an agent infrastructure. 5th International Conference on Autonomous Agents. Citeseer.
- [Hu et al. 2004] Hu, X.B., Wu, S.F. y Jiang, J., 2004. On-line free-flight path optimization based on improved genetic algorithms. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 17(8), 897-907. Elsevier.

BIBLIOGRAFÍA

- [Huhns y Stephens 1999] Huhns, M.N. y Stephens, L.M., 1999. Multiagent systems and societies of agents. The MIT Press.
- [ICAO 1964] International Civil Aviation Organization, 1964. Manual of the ICAO Standard Atmosphere. ICAO Document Manual of the ICAO Standard Atmosphere, N^o 7488, 2nd Edition.
- [ICAO 2002] International Civil Aviation Organization, 2002. Review of the most recent version of the separation assistance service (ASAS) Circular. Air Traffic Management Operational Concept Panel (ATMCP)-ICAO Meeting of the working group of the whole. 9^o Meeting. (ATMCP-WG/WHL/9-WP/231).
- [ICAO 2007] International Civil Aviation Organization, 2007. Global Air Navigation Plan for CNS/ATM Systems. Montreal: International Civil Aviation. Doc. 9750. AN/963, Third Edition.
- [Idris et al. 2007] Idris, H., Vivona, R., Garcia-Chico, J.L. y Wing, D., 2007. Distributed traffic complexity management by preserving trajectory flexibility. IEEE/AIAA 26th Digital Avionics Systems Conference, 2007.
- [Idris et al. 2007] Idris, H., Wing, D., Vivona, R. t Garcia-Chico, J.L., 2007. A Distributed Trajectory-Oriented Approach to Managing Traffic Complexity. 7th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference (ATIO). Citeseer.
- [Iglesias et al. 1996] Iglesias, C.A., Garijo, M., Gonzalez, J.C. y Velasco, J.R., 1996. A methodological proposal for multiagent systems development extending CommonKADS. Proceedings of the 10th Banff Knowledge Acquisition for Knowledge-Based Systems Workshop.
- [Isaacson y Erzberge 1997] Isaacson, D y Erzberger, H., 1997. Design of a conflict detection algorithm for the center/TRACON automation system, Proc. 16th Digital Avion. Syst. Conf., Irvine, CA, pp. 9.3-1–9.3-9.
- [Jacobson et al. 2000] Jacobson, I., Booch, G., Rumbaugh, J., 2000. El proceso unificado de desarrollo de software. Addison Wesley, Madrid.

- [Janic 2000] Janic, M., 2000. Air Transport System Analysis and Modelling: Capacity, Quality of Services and Economics, CRC Press.
- [JDPO 2004] Joint Development and Planning Office (JDPO), 2004. Next Generation Air Transportation System: Integrated Plan.
- [Jennings 2000] Jennings, N. R., 2000. On agent-based software engineering. *Artificial Intelligence*, 117, 277-296.
- [Jennings et al. 2001] Jennings, N. R., Faratin, P., Lomuscio, A. R., Parsons, S., Sierra, C. y Wooldridge M., 2001. Automated Negotiation: Prospects, Methods and Challenges. *Group Decision and Negotiation*, 10(2), 199-215.
- [Julian 2002] Julian, V., 2002, RT-MESSAGE: Desarrollo de Sistemas multi-agente de Tiempo Real. PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia.
- [Julian et al. 2002] Julian, V., Botti, V., 2002. Developing Real- Time Multi-Agent Systems. En *Actas de 4th Iberoamerican Workshop on Multi-Agent Systems (Iberagents'02)*, Málaga.
- [Kahne y Frolow 1996] Kahne, S., y Frolow, I., 1996. Air traffic management: evolution with technology. *Control Systems Magazine, IEEE* 16, no. 4: 12-21. doi:10.1109/37.526911.
- [Kosecka et al. 1997] Kosecka, J., Tomlin, C., Pappas, G. y Sastry, S., 1997. Generation of conflict resolution maneuvers for air traffic management. *Proc Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, (Grenoble, France), pp. 1598–1603.
- [Korn et al. 2006] Korn B., Helmke, H., Kuenz A., 2006, 4D Trajectory Management in the Extended TMA: Coupling AMAN and 4D FMS for Optimized Approach Trajectories. *Proceedings of the ICAS 2006 conference*, Hamburg, Germany.
- [Korn et al. 2006] Korn, B. y Kuenz, A., 2006. 4D FMS for Increasing Efficiency of TMA Operations. *IEEE/AIAA 25th Digital Avionics Systems Conference*. pp. 1–8.

BIBLIOGRAFÍA

- [Kowalczyk 2000] Kowalczyk, R., 2000. On negotiation as a distributed fuzzy constraint satisfaction problem. En Proceedings of the Third International Symposium on Soft Computing for Industry of the World Automation Congress. pp. 631–637.
- [Kraus et al. 1998] Kraus, S., Sycara, K., y Evenchik, A., 1998. Reaching agreements through argumentation: A logical model and implementation. *Artificial Intelligence*, 104(1–2): 1–69, 1998.
- [Krosnick 1991] Krosnick, J., 1991, Response strategies for coping with the cognitive demands of attitude measures in surveys, *Applied Cognitive Psychology*. Vol 5, 213-36.
- [Krozel et al. 1996] Krozel, J., Mueller, T., Hunter, G., 1996. Free Flight Conflict Detection and Resolution Analysis. AIAA Guidance, Navigation and Control Conf., San Diego, CA.
- [Kuchar y Yang 1997] Kuchar, J.K., Yang, L.C., 1997. Survey of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods. 1st USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Saclay, France.
- [Labrou et al. 1999] Labrou, Y., Finin, T. y Peng, Y., 1999. Agent communication languages: The current landscape. *Intelligent Systems*, 14(2):45–52.
- [Landry et al. 2005] Landry, Steven. J., Todd. Farley, Ty Hoang, 2005, Expanding the Use of Time-Based Metering: Multi-Center Traffic Management Advisor, Proceedings of the 6th USA/Europe ATM 2005 R&D Seminar, Baltimore, MD.
- [Lay y Lin 2002] Lai, R. y Lin, M.W., 2002. Agent negotiation as fuzzy constraint processing. *Fuzzy Systems, 2002. FUZZ-IEEE'02*. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on.
- [Lee et al. 2004] Lee, Paul, Jean-Francois D'Arcy, Paul Mafera, Nancy Smith, Vernol Battiste, Walter Johnson, Joey Mercer, Everett A. Palmer, Thomas Prevot, 2004, SJSU/NASA Ames Research Center, Moffett Field.
- [Lopez-Leones et al. 2007] Lopez-Leonés, Miguel A. Vilaplana, Eduardo Gallo, Francisco A. Navarro, Carlos Quejet, 2007, The Aircraft Intent Description Language: a key enable for air-ground synchroniza-

- tion in trajectory-based operations, 25th Digital Avionic System Congress, Dallas.
- [Ljungberg y Lucas 1992] Ljungberg, M. & Lucas, A., 1992. The OASIS air-traffic management system. En Proceedings of the Second Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence, PRICAI.
- [Luck et al. 2004] Luck, M.M., Ashri, R. y D’Inverno, M., 2004. Agent-Based Software Development, Artech House.
- [Luo et al. 2003] Luo, X., Jennings N. R., Shadbolt, N. Leung H.-F. y Lee H.-M, 2003. A fuzzy constraint-based knowledge model for bilateral, multi-issue negotiations in cooperative environments. Artificial Intelligence, 148 (1-2): 53-102.
- [Parson et al. 1998] Parsons, S., Sierra, C. y Jennings, N., 1998. Agents that reason and negotiate by arguing. Journal of Logic and Computation, 8(3):261–292.
- [Lucas et al. 1994] Lucas, A. et al., 1994. New techniques for air traffic management for single and multiple airports. Technical note, 51.
- [MacConkey et al. 2002] MacConkey, Edwin D. Eric H. Bolz, 2002. Analysis of the Vertical Accuracy of the CTAS Trajectory Perturbations Process, NASA Ames Research Center, Moffett field, California.
- [Magill 1996] Magill, S.A.N., 1996. On the Vertical Speeds of Airways Traffic, Journal of Navigation, Vol. 49, N^o 1.
- [Malone y Crowston 1994] Malone, T.W. y Crowston, K., 1994. The interdisciplinary study of coordination. ACM Computing Surveys (CSUR), 26(1), 87-119.
- [Maes 1990] Maes, P., 1990. Situated agents can have goals. Designing autonomous agents: Theory and practice from biology to engineering and back, pages 49–70. The MIT Press: Cambridge, MA.
- [Matos et al. 1998] Matos, N., Sierra, C. y Jennings, N., 1998. Determining successful negotiation strategies: an evolutionary approach. ICMAS ’98: Proceedings of the 3rd International Conference on Multi Agent Systems. Washington, DC, USA. IEEE Computer Society.

BIBLIOGRAFÍA

- [Menon y Sweriduk 1999] Menon, P. K. y Sweriduk, G. D., 1999. Optimal strategies for free-flight air traffic resolution. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 22 (2).
- [Menon et al. 1999] Menon, P., Sweriduk, G. y Sridhar, B., 1999. Optimal strategies for free-flight air traffic conflict resolution, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 22, pp. 202–211.
- [Mondoline et al. 2002] Mondolini, Stephane, Mike Paglione, Steve Green, 2002, Trajectory Modelling Accuracy for Air traffic Management Decision Support Tools, ICAS Congress, Toronto.
- [Morrel 1985] Morrel, J.S., 1985. The Mathematics of Collision Avoidance in the Air, *Journal of Navigation*, Vol. 11.
- [Moir y Seabridge 2003] Moir, I. y Seabridge, A., 2003. Civil avionics systems. AIAA Education Series.
- [Müller H. 1996] Muller, H. J., 1996. Negotiation Principles. Foundations of Distributed Artificial Intelligence. G. M. P. O’Hare and N. R. Jennings eds., John Wiley & Sons, Inc.
- [Müller J. 1996] Müller, J. P. 1996. The Design of Intelligent Agents: A Layered Approach. N^o 1177 en *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. Springer.
- [NARSIM] NARSIM Air Traffic Simulations. <https://www.narsim.org/>.
- [NLR 2004] The NLR Air Traffic Control Research Simulator (NARSIM). URL: <http://www.narsim.org/5>.
- [NASA 1999] NASA, 1999. Advanced Air Transportation Technologies Project: Concept Definition for Distributed Air/Ground Traffic Management (DAG-TM). Version 1.0
- [NASA 2009] NASA, 2000. Overview of CTAS. <http://www.aviationsystemsdivision.arc.nasa.gov/research/foundations/index.shtml>
- [Nash 1950] Nash, J.F., 1950. The bargaining problem. *Econometrica* 18 (1950) 155–162.

- [Nash 1950] von Neumann, J. y Morgenstern, O., 1950. Theory of games and economic behavior, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- [NCOIC 2008] NCOIC-AviationIPT, 2008, Comparison of the SESAR and NextGen Concepts of Operations. [https://www.ncoic.org/apps/group_public/download.php/...12026/SESAR_NextGen_Comparison %2020090317FINAL.pdf](https://www.ncoic.org/apps/group_public/download.php/...12026/SESAR_NextGen_Comparison%2020090317FINAL.pdf)
- [NASA ARC 2002] NASA, 2002. Pseudo Aircraft Systems (PAS) an ATC Simulation Tool. URL: http://www.ctas.arc.nasa.gov/project_description/pas.html
- [NASA 2006] NASA, 2006. Next Generation Air Transportation System (NGATS) Air Traffic Management (ATM)-Airspace Project. Reference Material. http://cafefoundation.org/v2/pdf_tech/NASA.Aeronautics/...PAV.NASA.ARMD.NGATS.pdf
- [Newell 1982] Newell, A., 1982. The knowledge level. Artificial Intelligence, Vol. 18(1). pp. 87-127
- [Nuic et. al 2005] Nuic, A. et al., 2005, Advanced Aircraft Performance Modeling for ATM: Enhancements to the BADA Model. En Proceedings of the 24th digital avionics systems conference, Washington, DC.
- [OACI 2007] OACI, 2007, Procedimientos para los servicios de navegación aérea. Gestión del tránsito aéreo. Doc. 4444-ATM/501, 15^a ed.
- [OACI 2005] OACI, 2005, Concepto operacional de gestión del tránsito aéreo mundial. Doc.9854 AN/458
- [OACI 1995] OACI, 1995, Manual de planificación de los Servicios de Tránsito Aéreo, doc 9426.
- [OACI 2006a] OACI 2006, Anexo 10: Telecomunicaciones aeronáuticas, Vol II: Procedimientos de comunicaciones incluso los que tienen categoría de PANS.
- [OACI 2006] OACI 2006, Anexo 10: Telecomunicaciones Aeronáuticas, Vol. I: Radioayudas para la navegación, Vol. III: Sistemas de comunicaciones y Vol. IV: Sistema de radar de vigilancia y sistema anticolidión

BIBLIOGRAFÍA

- [OACI 2003] OACI, 2003. Anexo 11, Servicios de Tránsito Aéreo, 13^a ed.
- [Oh 1999] Oh, J.H., 1999. SDP relaxation approach to air traffic control under free flight. IEEE Conference on Control Applications — Proceedings, vol. 1. Kohala Coast, HI, USA, pp. 158–163.
- [O’Hare y Jennings 1996] O’Hare, G. M. y Jennings, N. R., 1996. Foundations of Distributed Artificial Intelligence. John Wiley & Sons.
- [Padgham y Winikoff 2004] Padgham, L. y Winikoff, M., 2004. Prometheus: A methodology for developing intelligent agents. Lecture Notes in Computer Science, 174-185.
- [Padgham y Winikoff 2008] Lin Padgham, John Thangarajah and Michael Winikoff, 2008. Prometheus Design Tool, (System Demonstration), Proceedings of the Twenty-Third AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI), Chicago, Illinois, USA.
- [Paielli y Erzberger 1997] Paielli, R.A. & Erzberger, H., 1997. Conflict probability estimation for free flight. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 20(3), 588-596.
- [Painter 2002] Painter, J.H., 2002. Cockpit multi-agent for distributed air traffic management. En AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Monterey, CA.
- [Pallottino et al. 2002] Pallottino, L., Bicchi, A., Pancanti, S., 2002. Safety of a decentralized scheme for free-flight ATMS using mixed integer linear programming. Proceedings of the American Control Conference, vol. 1. Anchorage, AK, USA, pp. 742–747.
- [Panzarasa et al. 2002] Panzarasa, P., Jennings N. R., y Norman T.J., 2002. Formalising collaborative decision making and practical reasoning in multi-agent systems. Journal of Logic and Communication, 12 (1): 55-117.
- [Pavón y Gómez-Sanz 2003] Pavón, J. y Gómez-Sanz, J., 2003. Agent Oriented Software Engineering with INGENIAS. Lecture notes in computer science, pp. 394-403. Springer.
- [Pavón et al. 2005] Pavon, J., Gomez-Sanz, J. y Fuentes, R., 2005. The INGENIAS methodology and tools. Agent-oriented methodologies, pp. 236–276.

- [Pokahr et al. 2003] Alexander Pokahr y Lars Braubach y Winfried Lamersdorf, 2003. Jadex: Implementing a BDI-Infrastructure for JADE Agents. EXP - in search of innovation (Special Issue on JADE) Journal, vol. 3, N^o 3, páginas 76-85.
- [Prevot 2002] Prevot, T., 2002. Exploring the many perspectives of distributed air traffic management: The Multi Aircraft Control System MACS. Proceedings of the HCI-Aero, 149-154.
- [Pynadath y Tambe 2002] Pynadath D. y Tambe, M. 2002. Multiagent team work: Analyzing key teamwork theories and models. En c. Castelfranchi and L. Jhonson, editors. Proceedings of the 1st International Joint Conference On Autonomus Agent and Multiagent systems (AAMAS-2002), pages 873-880, New York, USA, ACM Press.
- [Prevot et a. 2003] Prevot, T., Battiste, V., Palmer, E. y Shelden, S., 2003. Air Traffic Concept Utilizing 4D Trajectories and Airborne Separation Assistance. AIAA Guidance Navigation and Control Conference. Austin, TX.
- [Prevot et al. 2003] Prevot, T., Lee, P., Callantine, T. y Palmer, E., 2003. Trajectory-Oriented Time-Based Arrival Operations: Results and Recommendations. ATM2003, FAA/Eurocontrol R&D Seminar, Budapest, Hungría.
- [Quon 2006] Quon, L., 2006. Modeling and Simulation Needs for Next Generation Air Transportation System Research, AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, pp. 21-24.
- [Rahwan et. al 2004] Rahwan, I., Ramchurn, S. D., Jennings, N. R., McBurney, P. , Parsons S. y Sonenberg L., 2004. Argumentation-based negotiation. The Knowledge Engineering Review,18(04), 343-375.
- [Robinson III et al. 1997] Robinson III, J.E., Davis, T.J. & Isaacson, D.R., 1997. Fuzzy reasoning-based sequencing of arrival aircraft in the terminal area. En AIAA guidance, navigation and control conference, New Orleans, LA.
- [Rong 2002] Rong, J., 2002. Intelligent Executive Guidance Agent For Free Flight. AIAA-2002-15 . Reno, NV.

BIBLIOGRAFÍA

- [Rong et al. 2002] Rong, J. and Geng, S. and Valasek, J. and Ioerger, T.R., 2002. Air traffic conflict negotiation and resolution using an onboard multi-agent. 21st Digital Avionics Systems Conference on Air Traffic Management Systems, Irvine, CA.
- [Rong et al. 2002] Rong, J. and Bokadia, S. and Shandy, S. y Valasek, J., 2002. Hierarchical agent based system for general aviation CD&R under free flight. Proc. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Monterey, California.
- [Rong et al. 2003] Rong, J. and Ding, Y. and Valasek, J. and Painter, J., 2003. Intelligent system design with fixed-base simulation validation for general aviation. Proc. IEEE International Symposium on Intelligent Control, Houston, Texas.
- [Rosenschein y Zlotkin 1994] J. S. Rosenschein y G. Zlotkin, 1994. Rules of Encounter: Designing Conventions for Automated Negotiation among Computers. MIT Press.
- [Rosenschein y Zlotkin 1995] J. S. Rosenschein y G. Zlotkin, 1995. Designing Conventions for Automated Negotiation. AI magazine 15 (3), 29-46.
- [Rosenschein y Zlotkin 1996] Zlotkin, G. & Rosenschein, J.S., 1996. Mechanisms for Automated Negotiation in State Oriented Domains. Arxiv preprint cs.AI/9610101.
- [RTO 2001] NATO Research & Technology Organization (RTO), 2001. ATM Modeling and Simulation Architecture Study, Technical Research in Advanced Air Transportations Concepts Technologies (AATT) Project, NASA Ames Research Centre.
- [Rubinstein 1982] Rubinstein, A., 1982. Perfect equilibrium in a bargaining model. Econometrica 50 (1) pp 97-109.
- [Ruigrok and Korn 1999] Ruigrok, R.C.J. y Korn, B., 1999. Combining 4D y ASAS for Efficient TMA Operations, National Aerospace Laboratory NLR Report, NLR-TP-2007-759.
- [Stijn et al. 2009] Stijn B.J., Dam, V., Mulder, M. y van Paassen, M.M., 2009. The use of intent information in an airborne self-separation assistance display design. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Chicago, Illinois.

- [RTCA 1995] Radio Technical Commission for Aeronautics, 1995. Report of the RTCA Board of Directors' Select Committee on Free Flight, RTCA, Inc., Washington, DC.
- [Rusel y Norving 1995] Russell, S. y Norving, P., 1995. Artificial Intelligence: a modern approach. Prentice-Hall.
- [Sesar 2006] SESAR Consortium, 2006. Air Transport Framework. The performance Target, Deliverable 2.
- [Sesar 2007] SESAR Consortium, 2007. The ATM Target Concept, Deliverable 3.
- [Sandholm 1999] Sandholm, T. W. 1999, Distributed Rational Decision Making. Multiagent Systems (ed. G. Weiss), Cap. 5, pp. 201-258. MIT Press, Cambridge, MA.
- [Satapathy y Manikonda 2004] Satapathy, G. y Manikonda, V., 2004. Agent Infrastructures for Modeling and Simulation of CNS in the NAS. En Fairfax, VA..
- [Shandy y Valasek 2001] Shandy, S. y Valasek, J., 2001. Intelligent agent for aircraft collision avoidance. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Montreal, Canada.
- [Shehory y Sturm 2001] Shehory, O. y Sturm, A., 2001. Evaluation of modeling techniques for agent-based systems. Proceedings of the fifth international conference on Autonomous agents. ACM New York, NY, USA, pp. 624-631.
- [Shewchum et al. 1997] Shewchum, J.M., Oh, J.H. y Feron, E., 1997. Linear matrix inequalities for free flight conflict problems. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control, vol. 3. San Diego, CA, USA, pp. 2417-2422.
- [Schreiber et al. 1994] Schreiber, G., Wielinga, B., de Hoog, R., Akkermans, H. y Van de Velde, W., 1994. CommonKADS: a comprehensive methodology for KBS development. IEEE Intelligent Systems and Their Applications, 9(6), 28-37.
- [Schubert 1990] Schubert, M., 1990. COMPAS system concept. The COMPAS System in the ATC Environment 19 p(SEE N 92-19041 10-04)

BIBLIOGRAFÍA

- [Shoham y Tennenholtz 1995] Shoham, Y. y Tennenholtz, M., 1995. On social laws for artificial agent societies: Off-line design. *Artificial Intelligence*, 73(1-2), 231-252.
- [Sierra et al. 1997] Sierra, C., Faratin, P. y Jennings, N. R., 1997. A Service-Oriented Negotiation Model between Autonomous Agents. *Proc. 8th European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World (MAAMAW-97)*, Ronneby, Sweden.
- [Sierra et al. 1998] Sierra, C., Jennings, N. R., Noriega, P., y Parsons, S. A., 1998. Framework for argumentation-based negotiation. *Proc. Intelligent agents IV: agent theories, architectures, and languages: 4th International Workshop, ATAL'97*, Providence, Rhode Island, USA.
- [Skynet 2002] SKYNET, 2002. ATC interactive for the future of Air Traffic Control. URL: <http://users.skynet.be/atcsim>.
- [Sorensen 2000] Sorensen, J. A., 2000. Detailed Description for CE-11 Terminal Arrival: Self Spacing for Merging and In-trail Separation. Moffett Field, CA and Hampton, VA, NASA Ames Research Center and NASA Langley Research Center.
- [Stengeul y Niehaus 1989] Stengel, R. F. y Niehaus, A., 1989. Intelligent guidance for headway and lane control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2(4), 307-314.
- [Stengel 1993] Stengel, R.F., 1993. Toward intelligent flight control. *Systems, Man and Cybernetics. IEEE Transactions on*, 23(6), 1699-1717.
- [Stengel 2004] Stengel, Robert F., 2004. *Flight Dynamics*. ISBN: 0-691-11407-2, Princeton University Press.
- [Sturmy y Shehory 2004] Sturm, A. y Shehory, O., 2004. A Framework for Evaluating Agent-Oriented Methodologies. *Lecture notes in computer science*, 94-109.
- [Suchkhov et al. 2003] Suckhov, A., Swierstra, S., Nuic, A., 2003, Aircraft Performance Modeling for Air Traffic Management Applications, 5th USA-Europe Seminar on ATM R&D Budapest, Hungary.

- [Sycara 1989] K. Sycara, 1989. Argumentation: Planning other Agents' Plans. Proceedings of the 11th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 517-523, Citeseer.
- [Sycara 1990] Sycara, K.P., 1990. Persuasive argumentation in negotiation. Theory and Decision, 28(3), 203-242.
- [Sweet et al. 2002] Sweet, D.N., Manikonda, V., Aronson, J.S., Roth, K. y Blake, M., 2002. Fast-Time Simulation System for Analysis of Advanced Air Transportation Concepts. Proceedings of the AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. Monterey, California.
- [Teutsch y Hoffman 2004] Teutsch, J. y Hoffman, E., 2004. Aircraft in the future ATM system - exploiting the 4D aircraft trajectory. 23th Digital Avionics Systems Conference, DASC 04, Vol. 1, pp 3.B.2-1 – 3.B.2.22.
- [TGF 2009] Target Generation Facility. <http://hf.tc.faa.gov/capabilities/tgf.htm>
- [Tomlin et al. 1997] Tomlin, C., Pappas, G. , Lygeros, J., Godbole, D. y Sastry, S., 1997. A next generation architecture for air traffic management systems, Technical Report UCB/ERL M97/7, University of California, Berkeley.
- [Tomlin et al. 1997a] Tomlin, C., Pappas, G. y Sastry, S., 1997 Noncooperative conflict resolution, en Proc. IEEE Int. Conf. on Decision and Control, (San Diego, California), December 1997.
- [Tomlin et al. 1998] Tomlin, C., Pappas, G. y Sastry, S., 1998. Conflict resolution for air traffic management: A study in multi-agent hybrid systems, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 43, num. 4, pp. 509–521, 1998
- [Tong et al. 2007] Tong, K.O., Schoeming, D., Boyle, D.A. Sharl, J, Haraldsdottir, J et al., 2007. Descent profile options for continuous descent arrival procedures within 3D path concept. 26th Digital Avionics Systems Conference, Dallas, TX, EEUU.
- [Tuomola 2000] Tuomola R., 2000. Cooperation: A Philosophical Study. Kluwer Academic Publishers.

BIBLIOGRAFÍA

- [van Gool y Schröter 1999] van Gool, M. y Schoröter, H., 1999, PHARE Final Report, EUROCONTROL, Bruselas.
- [Vulkan y Jennings 2000] Vulkan, N. y Jennings, N.R., 2000. Efficient Mechanisms for the Supply of Services in Multi- Agent Environments. *Int. Journal of Decision Support Systems*, 28 (1-2), pp. 5-19.
- [Wangerman y Stengel 1996] Wangermann, J.P. y Stengel, R.F., 1996. Distributed optimization and principled negotiation for advanced air traffic management. *Proceedings of the 1996 IEEE International Symposium on*. pp. 156-161.
- [Wangerman y Stengel 1999] Wangermann, J.P. y Stengel, R.F., 1999. Optimization and Coordination of Multiagent Systems Using Principled Negotiation. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 22(1), 43-50.
- [Wangerman y Stengel 1998] Wangermann, J.P. y Stengel, R.F., 1998. Principled negotiation between intelligent agents: a model for air traffic management. *Artificial Intelligence in Engineering*, 12(3), 177-187.
- [Weber y Cruck 2007] Weber, R. y Cruck, E., 2007. Subliminal ATC Utilizing 4D Trajectory Negotiation. *Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference, 2007. ICNS '07*.
- [Wilson 1998] Wilson, I., 1998. Trajectory Negotiation in a Multi-Sector Environment. DOC 97-70-14, EUROCONTROL, Bruxelles, Belgium. www.eurocontrol.int/phare/gallery/content/public/...97-70-14traj_neg.pdf.
- [Wilson y Hafner 2005] Wilson, I. y Hafner, F., 2005. Benefit Assessment of Using Continuous Descent Approaches at Atlanta. *24th Digital Avionics Systems Conference, Washington D.C., 2005*.
- [Wilson 2007] Wilson, I., 2007. 4-Dimensional Trajectories and Automation Connotations and Lessons learned from past research. *Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference. ICNS'07*. pp. 1-10.
- [Wooldridge y Jennings 1995] Wooldridge, M. y Jennings, N. R., 1995. Intelligent agents: theory and practice. *Knowledge Engineering Review*, vol. 10(2), pp. 115-152.

- [Wooldridge 2002] Michael Wooldridge, 2002. An Introduction to MultiAgent Systems , England: John Wiley and Sons.
- [Zeghal y Ferber 1993] Zeghal, K. y Ferber, J. 1993. A reactive approach for distributed air traffic control. Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and Expert Systems, pp. 381-390, Avignon, France.
- [Zeghal y Hoffman 2002] Zeghal, K. y Hoffman, E., 2002. Delegation of separation assurance to aircraft: towards a framework for analysing the different concepts and underlying principles. En International Council of the Aeronautical Sciences Congres (ICAS), Harrogate, UK.