

## **Modelo y Simulación de Agentes en el Contexto de Vida Artificial aplicado al Control Aéreo en un Ambiente de Vuelo Libre**

**J. Ierache**<sup>1,2</sup>, **Victor Battista**<sup>1</sup>, **D. Rodríguez**<sup>3</sup>, **P. Britos**<sup>3,2</sup>, **R. García-Martínez**<sup>3,2</sup>

1. Instituto de Sistemas Inteligentes y Enseñanza Experimental de la Robótica. Facultad de Informática, Ciencias de la Comunicación y Técnicas Especiales. Universidad de Morón

2. Laboratorio de Sistemas Inteligentes. Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires

3. Centro de Ingeniería del Software e Ingeniería del Conocimiento. Escuela de Postgrado. Instituto Tecnológico de Buenos Aires

jierache@yahoo.com.ar, jierache@unimoron.edu.ar, victor2206@gmail.com, rgm@itba.edu.ar

Tel: +5411 56272000 (189/746)

### **Abstract**

In this work one appears the results of a simulation in an artificial life environment and an approach of a model multiagents under an architecture based on beliefs, desires and intentions of the agents who implement the concept of free flight “Free Flight”, this concept proposes a solution before the vertiginous growth of the aerial traffic, that today is a problematic one at world-wide level. The airways with the passage of time are multiplied to the rate of the rising world-wide economic markets. In Free Flight, the airplanes, are their own controllers, can choose their own routes of navigation, speed, height, regimes of ascent and reduction, maneuvers. For the support, analysis and management of one ambient of free flight, the characterization of a model of simulation is considered based on surroundings of artificial life in order to observe the evolution of the airspace under this concept, being considered a initials of airships with diverse intentions with respect to its destination airports.

**Key words:** Simulation, Artificial Life, Agents, Air Traffic Controller, Free Flight

### **Resumen**

En este trabajo se presenta los resultados de una simulación en un ambiente de vida artificial y una aproximación de un modelo multiagentes bajo una arquitectura basada en creencias, deseos e intenciones de los agentes que implementan el concepto de vuelo libre “Free Flight”, este concepto propone una solución ante el crecimiento vertiginoso del tráfico aéreo, que hoy es una problemática a nivel mundial. Las rutas aéreas con el paso del tiempo se multiplican al ritmo de los nacientes mercados económicos mundiales. En Free Flight, los aviones, son sus propios controladores, pueden elegir sus propias rutas de navegación, velocidad, altura, regimenes de ascenso y descenso, maniobras. Para el apoyo, análisis y gestión de una ambiente de vuelo libre, se considera la caracterización de un modelo de simulación basado en un entorno de vida artificial a fin de observar la evolución del espacio aéreo bajo este concepto, considerando una población inicial de aeronaves con intenciones diversas respecto a sus aeropuertos de destino.

**Palabras Claves:** Simulación, Vida Artificial, Agentes, Trafico Aéreo, Vuelo Libre.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el campo demográfico, 14 centros urbanos del mundo tendrán más de 15 millones de habitantes; cuatro de ellos, más de 20 millones (Tokio, con alrededor de 30 millones, seguido por Lagos, Bombay y Sao Paulo) [1]. En el pasado, como en el presente, Europa, Asia Oriental y Estados Unidos son referentes económicos y generadores de tráfico aéreo. Sin embargo, en los últimos años han ganado mucho terreno la India, China y el sur de Sudamérica. Los dos primeros apoyados por una fuerte expansión económica y la última por el potencial turístico que ostenta. La aviación comercial desde sus comienzos al día de hoy ha avanzado notablemente logrando un medio de transporte seguro y efectivo. Hacia finales de febrero de 2006, la empresa Boeing anunció que había entregado 5.009 aviones de la familia '737' [2]. En la actualidad, el crecimiento del tráfico aéreo es analizado intensamente. El congestionamiento ha alcanzado límites tales que alrededor del mundo distintos pronósticos señalan el colapso de los sistemas de control de vuelo en los años próximos. Las rutas aéreas con el paso del tiempo se multiplican, el tránsito aéreo es cada vez más intenso y las pérdidas económicas a causa de los retrasos y congestionamiento son millonarias [3]. La solución clásica a este tipo de problemáticas era el incremento del número de aeropuertos y la creación de nuevas pistas de aterrizajes. Con esta perspectiva de la realidad, un cambio de enfoque en el control de tráfico aéreo surge como la solución más ventajosa dada las desventajas o implicancias de las propuestas clásicas. En el presente trabajo se describe aproximación a un modelo al control del tráfico aéreo diferente al enfoque actual en uso. La propuesta es un modelo multiagente considerando los roles más significativos e incorporando el concepto de vuelo libre [4], [5] para la elección de las rutas de vuelo.

## 2. CONTROL AÉREO INTELIGENTE

El modelo de sistema multiagente que se desea desarrollar se desenvuelve en un ambiente altamente ágil y dinámico. Si bien, los componentes identificados son unos pocos, el modelo puede ser especialmente complejo de acuerdo a la cantidad de instancia de un elemento esencial: las aeronaves. Cada una de ellas, en el sistema, se modelizan a través de un agente "Piloto Aeronave". El mismo, por definición deberá mostrar un comportamiento flexible. Dicha flexibilidad le permitirá, a pesar de las distintas evoluciones que presente el ambiente, alcanzar su objetivo: lograr el aterrizaje a tiempo en su destino. Si pensamos en los distintos desafíos que un agente "Piloto Aeronave" puede encontrar durante un vuelo veremos que entran a jugar un amplio rango de eventos que pueden influenciar de forma positiva o negativa. Por ejemplo, supongamos que una aeronave parte de un aeropuerto A y se dirige a un aeropuerto B. Al principio, el agente determinará una ruta de vuelo posible según un estudio primario de sus creencias en relación al ambiente: condiciones meteorológicas, congestionamiento del aeropuerto, distancias de vuelo, rutas de vuelo tradicionales, su capacidad de combustible, entre otras. Así el agente aeronave parte con una intención/plan de vuelo para cumplir con su deseo de arribar al aeropuerto de destino en el menor tiempo con el menor consumo de combustible. Sin embargo, el sistema puede variar drásticamente, en ocasiones espontáneamente apelando a las características reactivas del Agente; otras veces, paulatinamente dando lugar a un comportamiento más pro-activo. La formación de tormentas eléctricas, la aparición de aeronaves, las condiciones meteorológicas en general, son sólo algunas de las distintas manifestaciones del ambiente en el cual se moviliza el agente "Piloto Aeronave". Finalmente, la aeronave se aproxima al espacio aéreo correspondiente al área terminal. Es en este momento, donde quizás la capacidad de negociación del agente "Piloto Aeronave" cobra vital importancia. La aeronave que se traslada de un aeropuerto A a otro B debe aterrizar. El primer problema es que la pista de aterrizaje es de por sí un recurso finito y su disponibilidad sólo ocurre en pequeñas "ventanas" de tiempo. La pista de aterrizaje es un recurso que todas las aeronaves

deberán compartir en un instante de tiempo particular, sólo una de ellas podrá hacer uso de la misma para despegar o aterrizar. Esto genera una situación de competencia entre los distintos agente “Piloto Aeronave”. Puede resultar que la aeronave a su llegada al aeropuerto se encuentre sólo esperando autorización para aterrizar, de modo que no tendrá problemas en hacerlo. Sin embargo, sabemos que esto no será así en las mayorías de los casos; precisamente es esta la motivación que da lugar a este trabajo de investigación. Frecuentemente, el Agente aeronave deberá llegar a un acuerdo tripartito con otros agentes aeronaves y controladores aéreos, teniendo en cuenta la disponibilidad de la pista y rutas de vuelo, el combustible con el que cuenta cada aeronave, su autonomía, afluencia de tráfico, entre otros aspectos para conseguir un lugar en la cola de aterrizajes. El objetivo del sistema se centra en alcanzar la maximización del aprovechamiento de los recursos aeroportuarios en orden de aliviar la congestión en los mismos. Además, el sistema deberá gestionar los recursos para que cada uno de los aviones pueda realizar sus vuelos de forma segura. Ante el crecimiento de la congestión del tráfico aéreo la autoridad de aviación civil australiana<sup>1</sup> ha dado origen al programa de mejoramiento del manejo de tráfico aéreo. En un desarrollo conjunto, con el Instituto de Inteligencia Artificial Australiano, dio lugar a OASIS<sup>2</sup>[6]. Un sistema de administración de tráfico aéreo prototipo desarrollado para el aeropuerto Kingsford Smith de Sydney. Dicho proyecto fue tomado como referencia para este trabajo. Considerando el nuevo enfoque innovador sobre la problemática, se ha considerado el concepto importante y de especial auge dentro del área del control de vuelo: el vuelo libre (Free Flight). El control de vuelo clásico, utilizado, se ha dejado de lado en favor de la implementación del vuelo libre. Los aviones, así, son sus propios controladores. Pueden elegir sus propias rutas de navegación, velocidad, altura, regimenes de ascenso y descenso, maniobras, en este contexto el objetivo del sistema es la planificación de los aterrizajes de las aeronaves como se detalla en la figura 1. El sistema le brinda total libertad al piloto para que vuele según sus convicciones, sin embargo, un sistema de control de vuelo descentralizado analiza el ambiente con el objetivo de velar por el cumplimiento del objetivo final: un vuelo seguro y sin inconvenientes. En consecuencia se pretende alcanzar un alto grado de cooperación y la capacidad de trabajar por un mismo objetivo.



Figura 1. Objetivos del sistema

### 3. FREE FLIGHT

Free Flight [7], propone un sistema de control que abandona el monitoreo centralizado, desde tierra, del tráfico para adoptar una arquitectura descentralizada y altamente cooperativa. El concepto descansa sobre dispositivos digitales altamente precisos para la ubicación de aeronaves (GPS: Global Positioning System), un sistema de comunicación de datos digital, que brinda información a todos los involucrados, apoyados con la automatización de gran parte de las tareas de los controladores aéreos.

<sup>1</sup> Denominada *Airservices Australia*

Bajo el “vuelo libre” los controladores no acaparan responsabilidades sino que ellas son delegadas a los pilotos. Los pilotos son sus propios controladores de vuelo, son libres de escoger trayectorias de vuelos, altitudes, velocidades como alguna vez lo hicieron antes de que existieran los primeros sistemas de control. El “vuelo libre” podría reducir la congestión de los aeropuertos más concurridos elevando el promedio de aterrizajes por unidad de tiempo. El concepto de free Flight [8] se define como una capacidad de operación de vuelo bajo condiciones de vuelo por instrumentos en el cual los operadores tienen la libertad de elegir su trayectoria y velocidad en tiempo real. Las restricciones al tráfico aéreo se imponen sólo para asegurar la separación, para evitar el exceso de capacidad de aeropuerto, para prevenir vuelo no autorizado a través espacio aéreo de uso restringido/prohibido, y para garantizar la seguridad del vuelo.

#### 4. MODELO MULTIAGENTE PARA CONTROL AÉREO

El modelo propuesto se compone principalmente por cinco roles: Vigilancia y Control, Planificador, Meteorólogo, Controlador, Piloto Aeronave; según se detalla en la figura 2.

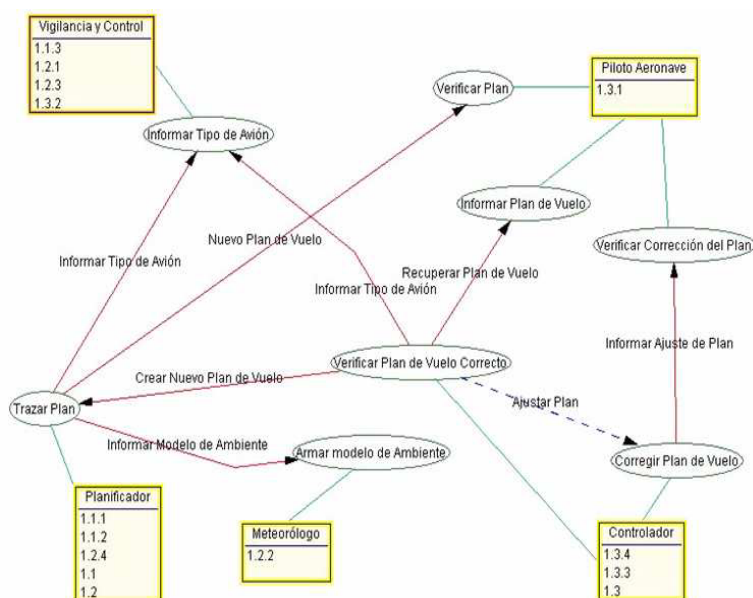


Figura 2. Modelo de roles del sistema

El rol “Vigilancia y Control” es el encargado de individualizar cada aeronave que ingresa en el espacio aéreo de su área de control. Deberá, entre otras cosas, informar la posición actual de la aeronave e identificarla.

El rol “Planificador” sugiere un plan de vuelo eficaz con base en el análisis de la aeronave, las condiciones climáticas y la programación de aterrizaje. Se encarga de armar un plan de vuelo eficaz para la aeronave y lo informa como directivas similares al formato de una ‘lista de tareas’ pendientes.

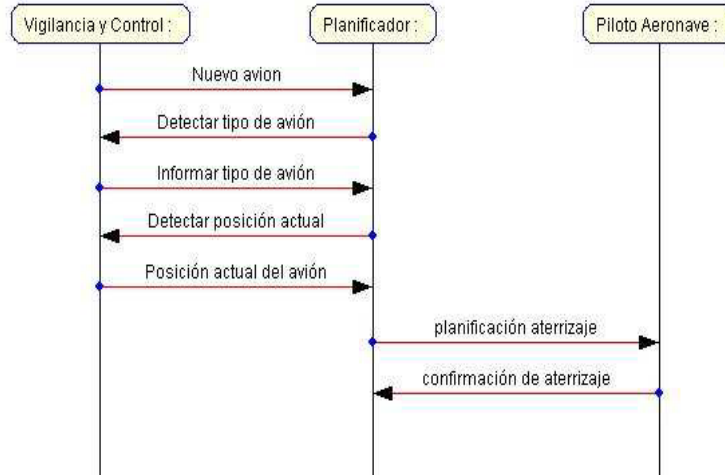
El rol “Meteorólogo” actualiza la información ambiental a través de los datos que puedan recoger los distintos aviones en el aire junto con la que él mismo posee y además brindan los sensores meteorológicos del área.

El rol “Controlador” es el designado para hacer el seguimiento del desempeño de los aviones próximos al aeropuerto. Además, es el encargado de detectar cualquier tipo de inconveniente, accidente o problema que pudiera surgir, deberá corregir los planes de vuelo evaluando la situación actual de la

aeronave y, a partir de allí, componer una serie de modificaciones al plan de vuelo original. Periódicamente verificará que la trayectoria del aeronave se encuentre dentro del margen de error aceptable para el plan de vuelo estimado.

El rol “Piloto Aeronave” se encargará de tomar las decisiones de vuelo, por ejemplo, sobre: la velocidad, la altitud, la dirección. Verificará que el plan de vuelo estimado esté dentro de las posibilidades técnicas de la aeronave. Mantendrá actualizada, y disponible para el sistema, toda la información del plan de vuelo de la aeronave. Todas las correcciones al plan de vuelo original serán verificadas con el objetivo de constatar que sean compatibles con las capacidades de la aeronave.

El comportamiento de un agente aislado queda determinado por sus motivaciones individuales, sus creencias acerca del mundo y sus propias habilidades. De este modo, esta caracterización resulta insuficiente para modelar a un agente con una actitud cooperativa. La coordinación de los agentes, al igual que en otros dominios, es un aspecto importante para lograr un comportamiento coherente. La distribución de los datos y el control entre varios agentes autónomos a menudo deriva en situaciones de conflictos como consecuencia de la existencia de distintos puntos de interés, los recursos escasos y las motivaciones particulares u objetivos. El aspecto de la comunicación entre los agentes es un factor fundamental a considerar. La tendencia actual, es utilizar lenguajes de comunicación de agentes basados en la teoría de “speech acts” como por ejemplo KQML [9] y FIPA ACL [10]. En el caso de JADE es un middleware que proporciona un entorno para desarrollar agentes, que explota el potencial de la plataforma java. Otro aspecto importante es que el Framework, ofrece como servicios propios funcionalidades básicas que requiere un agente y permite centrarse en el desarrollo de los aspectos lógico de los agentes, algunas de las características que presenta JADE en cuanto a su Portabilidad: La API que proporciona JADE es independientemente de la red sobre la que va a operar, así como de la versión de Java utilizada, teniendo la misma API para J2EE [11], J2SE [4] y J2ME [12], Finalmente, JADE simplifica la comunicación y la cooperación entre los agentes; los agentes JADE pueden controlar su propio ciclo de vida, y pueden ser programados para que dejen de funcionar o empiecen a hacerlo dependiendo del estado del sistema y de la función que debe realizar el agente; JADE cumple con la especificación de FIPA [13], por lo tanto, puede comunicarse con agentes realizados en otros entornos pero que utilicen este estándar el Framework de desarrollo de agentes provee un amplio soporte para las comunicaciones entre agentes a partir del estándar FIPA ACL. Para ejemplificar este esquema, consideremos el caso en que dos aviones se aproximen en una área de control a un aeropuerto y se comunican con el controlador del área para establecer su lugar en la cola de aterrizajes. En este caso, ambos agentes “Piloto Aeronave” ingresan en una situación de competencia en relación a un recurso escaso, como lo es la pista de aterrizaje. Si bien éste no es un recurso agotable tiene la particularidad que puede estar disponible sólo para un agente en un instante de tiempo puntual. Cada uno de los agentes “Piloto Aeronave” tiene como uno de sus objetivos principales el ahorro de combustible y la construcción de un plan de vuelo que apunte a la maximización de este recurso. Por esta condición, al momento de ingresar al área de control, el agente “Piloto Aeronave” deberá interactuar con el agente “Vigilancia y Control” y para conseguir un lugar en la cola de aterrizajes deberá negociar con el “Planificador” quien tiene como objetivo lograr la mejor configuración del espacio aéreo para todos los agentes involucrados, según se detalla en la figura 3.

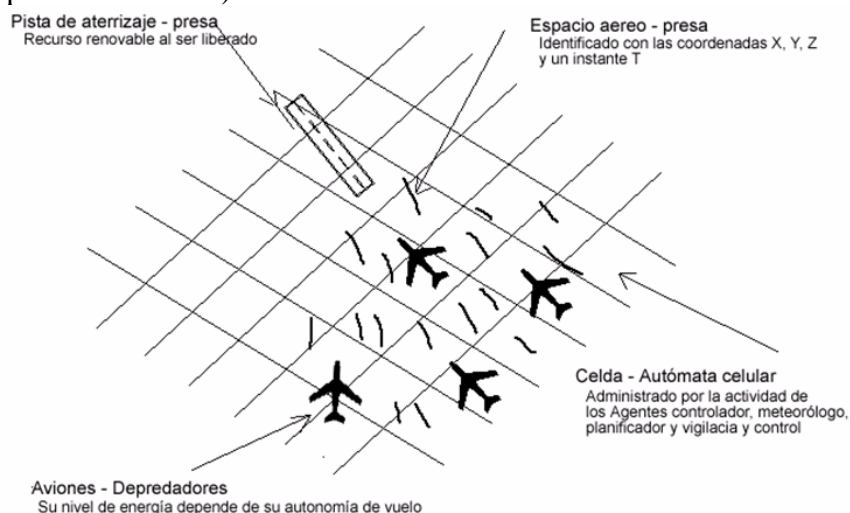
**Figura 3. Diagrama de secuencias correspondiente al ingreso de un aeronave**

Cada uno de los agentes que componen el sistema ha sido modelado desde la perspectiva BDI [14]. El agente “Vigilancia y Control” tiene el deseo, objetivo de lograr individualizar e identificar cada aeronave que se desplaza en el espacio aéreo. Sus creencias se conforman de la información que le suministran distintos sensores de vigilancia y control del espacio aéreo. Finalmente, sus intenciones o acciones se focalizan en la transmisión de información actualizada acerca de los aviones en su espacio aéreo. El agente “Planificador” posee el deseo de programar los aterrizajes para lograr que el agente “Piloto Aeronave” pueda trazar un plan de vuelo eficaz. Sus creencias se basan en la meteorología, sus conocimientos acerca de la aeronave en cuestión, su autonomía de vuelo y la disponibilidad del recurso de la pista de aterrizaje, entre otras. Sus intenciones son la gestión de la cola de aterrizajes en el aeropuerto y sugerir al piloto las maniobras más convenientes para su aproximación dentro del área terminal con destino a su aeropuerto de aterrizaje. El agente “Meteorólogo” tiene el objetivo de actualizar la información ambiental a través de la información que puedan recoger los distintos aviones en el aire (sus creencias), apoyado con los sistemas meteorológicos, su intención es brindar un modelo de ambiente meteorológico. El agente “Controlador” debe detectar los inconvenientes, potenciales incidentes o problemas que pudiera surgir con las rutas de vuelo de los agentes “Pilotos aeronaves”. Recabará información a través de mensajes con los distintos agentes “Pilotos aeronaves” en vuelo y con el agente “Vigilancia y Control” quien le brindará la situación del espacio aéreo. Entre sus actividades se enumeran la evaluación de las rutas de vuelo y la configuración del espacio aéreo y la alerta de colisiones al agente “Piloto aeronave”. El agente “Piloto Aeronave” tiene el deseo de alcanzar un aeropuerto de destino llevando adelante un vuelo seguro y eficaz sin complicaciones. Se nutre de la información que obtiene del amplio rango de instrumental de vuelo (TCAS [15], GPS) para generar sus creencias. Para alcanzar su objetivo llevará adelante verificaciones periódicas del plan de vuelo y la corrección del mismo ante una alerta de colisión.

## 5. MODELO DE SIMULACIÓN PARA EL CONTROL AÉREO EN AMBIENTE DE VUELO LIBRE

En este contexto según se representa sintéticamente en la figura 4, se propone una aproximación para el ambiente de vuelo libre caracterizado en un entorno de vida artificial [16], seleccionado este por su capacidad para la simulación de sistemas descentralizados donde los autómatas celulares resultan un marco para explorar fenómenos de autoorganización, presentes en el concepto de vuelo libre, donde no se cuenta con diseñador centralizado para el control aéreo. Observando las características de un hábitat

de vida artificial se considera como Depredadores a los agentes “Piloto aeronave” y como Presas se presentan dos tipos constituidos por la presa principal denominada como presa tipo pista de aterrizaje, correspondiente a su destino y la presa tipo espacio aéreo (X,Y,Z) a ocupar por un agente “Piloto aeronave” durante un tiempo (T), suficiente para asegurar las separaciones entre aeronaves y evitar colisiones, si bien son un recurso renovable como alimentos para sus depredadores, se encuentran agotados durante un margen de tiempo al ser consumidos por otro depredador representado por el agente “Piloto aeronave”. Como Hábitat de los Depredadores y Presas se considera el espacio aéreo y aeroportuario a través de parcelas o celdas organizadas en una grilla de modo similar al de un autómatas celular con depredadores que deambulan por encima (aeronaves que vuelan en el espacio aéreo), cada parcela se caracteriza por la acción de los agentes Planificador, Controlador, Meteorólogo, Vigilancia y Control y la presencia de una Presa representada por el espacio aéreo que se corresponden con un juego de valores límites XYZ de la celda salvo los casos de espacios prohibidos de vuelo o restringidos temporalmente para el uso en los cuales no se consideran presas, las celdas podrán estar ocupadas por depredadores agentes “Piloto aeronave” respetando los límites de separación entre aeronaves considerados para garantizar la seguridad aérea, y también por presas del tipo pista de aterrizaje. La energía de los depredadores (agentes “Pilotos aeronaves”) se considera en función del consumo de combustible, pudiendo agotarla o no para poder cumplir su vuelo en los márgenes de tiempo establecidos, ocurriendo la muerte del depredador si se agota su combustible o aterriza fuera de los márgenes de tiempo establecidos. El observador mira a los depredadores (agentes “Pilotos aeronaves”) y administrar las tasas de creación de nuevos depredadores y su agotamiento en función de los márgenes de tiempo que establece para el consumo de su presa, (representado por el arribo de la aeronave a su pista del aeropuerto de destino), además el observador monitorea la actividad de las presas y de las parcelas o celdas del hábitat (espacio aéreo). La extinción de la especie se daría por el agotamiento de la energía de los depredadores, y el consumo de sus presas en un instante de tiempo de acuerdo a los márgenes seleccionados por el observador para lo cual los depredadores agentes “Pilotos aeronaves” no puedan consumir a su presa elegida (espacio aéreo X,Y,Z durante un tiempo T, pista de aterrizaje del aeropuerto de destino).



**Figura 4. Ambiente de vuelo libre modelado en un entorno de vida artificial.**

Para el desarrollo del modelo se analizaron herramientas orientadas a agentes como JADE [17], la especificación FIPA ACL [10] para mensajes interagentes, Protegè [18] para crear una ontología del sistema, MaSE [119] como metodología., StarLogo [20] para vida artificial. En Jared et al [21] presenta los resultados de una simulación basada en teoría de juegos para la toma de decisiones en vuelo libre por parte de las aeronaves considerando una actitud altruista específica para la negociación en un ambiente multiagente a fin de evitar incidentes aéreos entre aeronaves en un entorno de vuelo libre, sin embargo en nuestra propuesta se considera que las aeronaves cuentan con sistemas TCAS (sistema de alerta de colisión entre aeronaves) para alertar incidentes aéreos en su espacio aéreo y realizar las maniobras de evasión a fin de mantener una separación vertical y horizontal considerada para las aeronaves que conforman el hábitat de simulación en un entorno de vida artificial. La Simulación implementada en nuestra propuesta se recrea en un ambiente de vida artificial, que se caracteriza por:

- Permitir la simulación en nuestro caso de diez aviones en competencia por los aeropuertos, la simulación se puede llevar adelante con dos (2) o tres (3) aeropuertos.
- Energía Máxima de los aviones. Este concepto es análogo a la cantidad de combustible que el avión posee para realizar su vuelo. Máximo parametrizable: cuatrocientos (400)
- Consumo de energía. Es la cantidad de energía que un avión consume al viajar una (1) unidad de distancia en busca de alcanzar su destino.
- Capacidad del aeropuerto. Es la cantidad de aviones que podrán permanecer en un aeropuerto, en un instante de tiempo dado, antes de volver a despegar. Máximo diez (10).

El Hábitat Simulado evoluciona enmarcado en las siguientes reglas:

- Los aviones tienen como objetivo lograr su aterrizaje en un destino conocido.
- Los aviones tienen un consumo de energía ligado a la distancia recorrida en busca de un aeropuerto. Al acabarse dicha energía si el avión no alcanza su destino principal o alternativa, sufre el siniestro.
- Los aviones no vuelan a una altura predefinida. Cada avión elige su altitud arbitrariamente.
- Cuando un avión llega a destino sólo hará el aterrizaje si la capacidad del aeropuerto no está colmada. De ser así, el avión recibe un nuevo destino de alternativa.
- Cuando el avión logra el aterrizaje permanecerá en “reposo” en el aeropuerto durante un tiempo, equivalente al que estuvo en vuelo, con el objetivo de recuperar la energía perdida. Mientras el avión permanece en el aeropuerto ocupa una plaza de capacidad disponible del aeropuerto.
- Los aviones en maniobras de despegue o de aterrizaje demoran un determinado tiempo “X” ocupando una plaza de capacidad disponible del aeropuerto, tiempo en el cual el recurso no puede ser explotado por otro avión.
- Los aviones en vuelo deben respetar un límite de separación, tanto vertical como horizontal. Esto define un área de seguridad que permite que el avión vuele sin riesgos de colisión.

Se presenta en la figura 5 la pantalla principal del simulador, en la que se genera el ambiente para iniciar la simulación utilizando los valores parametrizables detallados.

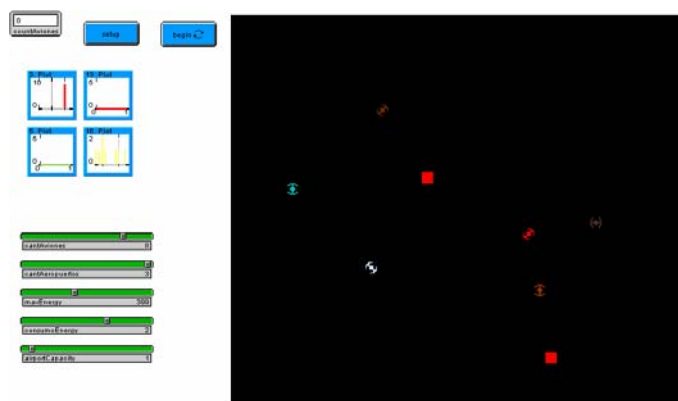


Figura 5. Pantalla de simulación en Starlogo.

La interfase de representación de la simulación cuenta, además con un monitor ubicado en el sector superior para medir el comportamiento de las aeronaves en su hábitat en tiempo real, brindando información en primer lugar: relacionada con la disponibilidad de combustible/energía de los aviones, según se detalla en la figura 6. El segundo se brinda información de la evolución de la separación vertical promedio calculada a partir de la separación con respecto al avión más próximo que registra cada avión, según se detalla en la figura 7

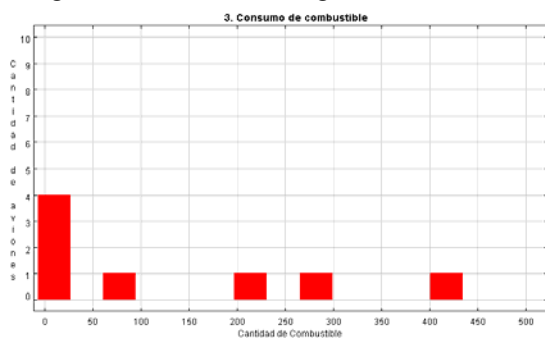


Figura 6. Disponibilidad de combustible.

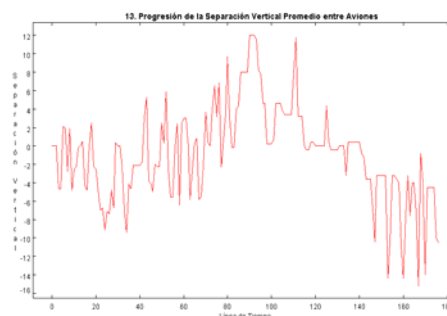


Figura 7. Evolución de la separación vertical

El tercer lugar se brinda información de la evolución de la separación horizontal promedio calculada a partir de la separación con respecto al avión más próximo que registra cada avión. Según se detalla en la figura 8.

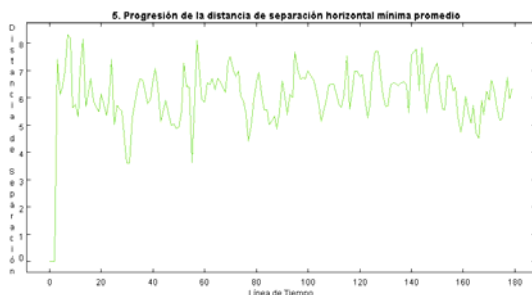


Figura 8. Evolución de la separación horizontal

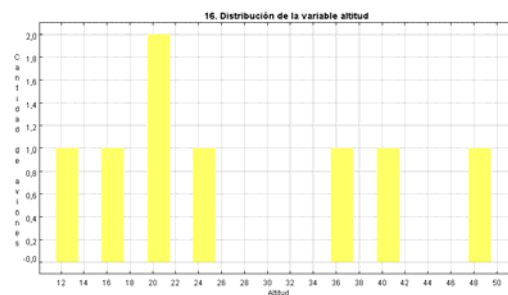


Figura 9. Distribución de la altitud entre aviones.

El cuarto lugar se brinda información de la distribución de la variable altitud de los diferentes aviones en vuelo. Según se detalla en la figura 9

## 7. RESULTADOS

Nuestro simulador han sido puesto a prueba en ambientes de simulación similares a los que otros investigadores han utilizado [22], [23], [24], [25]. El simulador elegido es el Starlogo dado que nos permite trabajar con ambientes densamente poblados sin problemas. Si bien es cierto que el potencial de esta herramienta es muy alto, también es cierto que dada la alta demanda de recursos de hardware necesarios para la simulación, algunas de las restricciones que hemos impuesto para nuestro modelo se deben a esta causa. Entre ellas, podemos citar la cantidad máxima de aviones o aeropuertos a simular.

El espacio aéreo, una de las “presa”, es simulado a través de las “celdas” definidas en la grilla de simulación. A su vez, la “presa” aeropuerto, es también identificada por una “celda” pero particularmente diferente a las anteriores. Luego, los aviones serán agentes que reemplazarán las conocidas tortugas del simulador. Las distancias recorridas por los aviones se miden en cantidades de celdas, y el tiempo se mide en ciclos de reloj. Por cada ciclo de reloj el ambiente artificial evoluciona bajo las reglas que lo enmarcan. A pesar de que el ambiente de simulación está preparado para soportar aviones volando a distintas alturas, para llevar adelante las pruebas se restringirá la altura de vuelo a un valor único, igual para todas las instancias de agentes aviones. Así, los resultados podrán ser comparables a los obtenidos en otras investigaciones ya mencionadas. Además, como otros autores señalan, de esta forma, la facilidad para generar ambientes densamente poblados es mucho mayor, y nos brinda la posibilidad de experimentar la robustez y confiabilidad del modelo planteado. Los aviones, por cada ciclo de reloj, se trasladan hacia alguna celda contigua a la que ocupan. Cada una de las decisiones que el avión deba tomar acerca de su orientación y dirección de vuelo, se hace efectiva de forma inmediata y en el instante anterior a su traslación a su próxima celda. Los aviones cuentan con una “zona de exclusión” a su alrededor. Dicha zona, idealmente, libre de aviones, marca un sector de potencial peligro de colisión para las aeronaves. Los aviones escogen libremente su ruta de vuelo, sin embargo, cuando su ruta los lleva a ingresar en la “zona de exclusión” de otro avión, una señal de colisión se dispara y comienzan las acciones de evasión.

### 7.1 Escenario de espacio aéreo abierto

Este escenario se basa en la experiencia [22], y refleja el vuelo a cielo abierto. Los aviones no tienen otros obstáculos más que otros aviones y todos tienen un destino que alcanzar. En la experiencia original, como unidad de medida había sido elegida la milla. En nuestra experiencia, para poder generar una escala de equivalencias, cada milla será simbolizada por una “celda”. La disposición inicial de los aviones genera un círculo en cuyo interior se apostarán los distintos puntos de destinos de los aviones. Cada avión se instancia con una zona de seguridad a su alrededor de modo que pueda ingresar al ambiente de simulación libre de potencial peligro de colisión. La tabla 1 muestra los resultados promedio en un esquema de pruebas similar al estudiado por Hill. Aún en las densidades de tráfico más, ningún incidente fue reportado. Los incidentes, y alarmas de colisiones en los escenarios de baja densidad eran esporádicos y sólo se hizo presente una fuerte tendencia en alza a partir de que las poblaciones alcanzaban los 70 aviones.

### 7.2 Punto de intersección

Este escenario, descrito en [23], propone un punto de intersección entre dos rutas de vuelo definidas para un conjunto de aviones. Cada flujo de aviones, sigue una ruta a lo largo de uno de los ejes cartesianos de la grilla de simulación; ya sea el eje “X” o el eje “Y”. De esta forma, en punto fijo ambas rutas confluyen materializando una zona de riesgo de colisión para los aviones. Los mismos, inicialmente parten de un punto fijo de la grilla y se les asigna un destino al lo otro lado de la grilla, de

modo que suponga una ruta de vuelo en línea recta. En todos los casos en que fue realizada la prueba, no se han constatado colisiones entre los aviones. Por el contrario, se divisó un bajo nivel de alarma de incidentes para el rango de aviones inferior al los 20 aviones y una alta eficacia al igual similar a la que se había podido experimentar en la simulación a espacio abierto. Sin embargo, se encontró un punto de inflexión en el cual los resultados marcan una leve tendencia al crecimiento tanto de las alarmas de incidentes como de la pérdida de eficiencia. Este patrón de comportamiento se comprobó como resultado de la disminución del delta de espacio de separación de las naves, a la hora de su instanciación, para alcanzar los límites exigidos por la prueba.

Aviones	Incidentes	Eficiencia (%)
> 20	25 – 35	< 98.5
< 20	< 15	99.0 – 99.5

**Tabla 1.** Resultados de simulación de espacio aéreo abierto

Aviones	Incidentes	Eficiencia (%)
90	0/20	97.0
80	0/15	97.1
70	0/9	97.6
60	0/1	97.9
50	0/0	98.1

**Tabla 2.** Resultados de simulación de Punto de Intersección

### 7.3 Escenario “Same Point - Same Time”

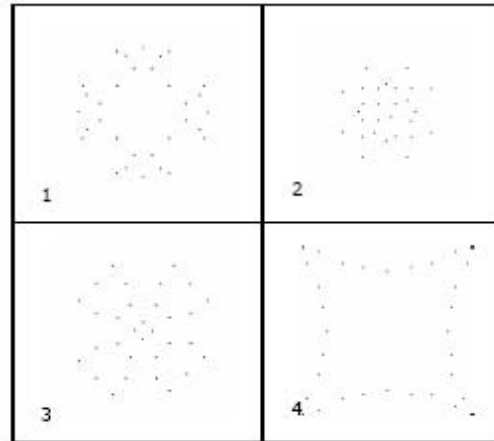
Este no es un escenario real, pero bien sirve para estudiar la reacción del sistema en condiciones delicadas que exigen un sistema robusto. Para la prueba, la población de aviones se dispone formando un círculo y a cada avión se le asigna un punto de destino al otro lado del círculo obligándolo a trazar una ruta de vuelo ideal a través del centro del mismo. De esta forma, si todos ellos siguieran esta ruta, alcanzarían el punto central del círculo al mismo tiempo desencadenando la tragedia. La figura “10” muestra la evolución del ambiente artificial. El trabajo de [25], para esta experiencia, describe que durante la simulación se forman patrones de organización de los aviones en forma de “olas”. En nuestro caso, dichos patrones no se generan, sin embargo, se consigue un patrón distinto. En principio, los aviones se acercan hacia el interior del círculo como, sin advertir el conflicto. Luego, cuando el conflicto es tangible, los aviones se empiezan a entrelazar desdibujando toda disposición geométrica. Una vez que los aviones logran atravesar el centro del círculo, se vuelven a trasladar en formación geométrica hacia su destino.

Aviones	Incidentes	Eficiencia (%)
32	0/29	90.4
28	0/23	91.7
24	0/17	93.4
20	0/13	95.0
16	0/10	97.0
12	0/7	97.5

**Tabla 3.** Resultados de simulación de Same Time”

Vuelos	Incidentes	Eficiencia (%)
800	8	97.0
1300	0/10	97.4

**Tabla 4.** Resultados de Simulación de Aeropuertos



**Figura 10.** Captura de pantallas para la simulación “Same Point Same Time”

Una vez más, los resultados no arrojan siniestros registrados. Sin embargo, el índice de incidentes conseguido fue superior a las experiencias de Hill. Esto se debe, principalmente, al método de resolución de la problemática. Como se explicó recién, en aquella simulación, los aviones, para sortear la posibilidad de incurrir en colisiones frontales o llegar a destino por una ruta lo más directa posible, generan “revoluciones” u “olas” haciendo que la eficiencia del algoritmo baje notablemente. En nuestro caso, los aviones al intentar seguir una ruta lo más parecida a la ideal, y sólo maniobrando para evitar violar la “zona de exclusión” de otro avión, los retrasos por maniobras caen de forma pronunciada aumentando visiblemente la eficiencia.

#### 7.4 Escenario: Aeropuerto

En un escenario real, los aviones trabajan uniendo destinos distantes. Cada avión en un instante de tiempo  $T$  tiene un destino que alcanzar. En su progresión el avión será responsable de elegir la ruta más eficiente. En su camino sólo tendrá un par de restricciones: otros aviones en vuelo; y la capacidad del aeropuerto en el que debe aterrizar. En espacio aéreo abierto, el avión deberá resolver los conflictos evitando violar las zonas de exclusión de otros aviones. Al intentar aterrizar el avión deberá tener en cuenta: no interrumpir otro avión en maniobras de aterrizaje o despegue; y verificar que la capacidad del aeropuerto no esté comprometida. En caso de que el avión no pueda llevar adelante el aterrizaje, queda en espera realizando circuitos de espera en las cercanías del aeropuerto hasta que el mismo quede libre.

## 8. CONCLUSIÓN Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La capacidad de coordinación y de cooperación de los agentes para cumplir con los objetivos facilita una aproximación de un modelo multiagentes bajo una arquitectura basada en creencias, deseos e intenciones de los agentes que implementan el concepto de Free Flight, los aviones, así, son sus propios controladores. Pueden elegir sus propias rutas de navegación, velocidad, altura, regímenes de ascenso y descenso, maniobras. Para el apoyo, análisis y gestión de una ambiente de vuelo libre dada

sus características propias de un sistema descentralizado sin un director central a cargo del control aéreo, se considero la caracterización de un modelo de simulación basado en un entorno de vida artificial a fin de observar la evolución del espacio aéreo bajo un concepto de Free Flight, para una población inicial de aeronaves con intenciones diversas, respecto a sus aeropuertos de destino. Dentro de las futuras líneas de investigación se considera la elaboración de un Framework para correr el modelo multiagente destinado al apoyo, análisis y gestión de una ambiente de vuelo libre, y la elaboración de ontologías para el concepto de Free Flight

## REFERENCIAS

- [1] Ronald E.G. Davies. <http://usinfo.state.gov/journals/ites/1000/ijes/trans6.htm>
- [2] Boeing Company. <http://www.boeing.com/>
- [3] Federal Aviation Administration. <http://www.faa.gov/>
- [4] J2SE. Java 2 Platform, Standard Edition. <http://java.sun.com/javase/>
- [5] NASA. Free Flight Simulation. <http://human-factors.arc.nasa.gov/cognition/research/freeflgt.html>
- [6] The OASIS Air Traffic Management System.
- [7] Air Traffic Control (ATC). Aspects of Free Flight. <http://www.freeflightatm.org/>,
- [8] Free Flight with airborne separation assurance. <http://www2.nlr.nl/public/hosted-sites/freeflight/>
- [9] Knowledge Query and Manipulation Language, KQML. <http://www.cs.umbc.edu/kqml>
- [10] FIPA. Foundation for Intelligent Physical Agents. <http://www.fipa.org/>
- [11] J2EE. Java 2 Platform, Enterprise Edition. <http://java.sun.com/javaee/>
- [12] J2ME. Java 2 Platform, Micro Edition. <http://java.sun.com/javame/>
- [13] The Foundation for Intelligent Physical Agents. <http://www.fipa.org/>, visitado en junio de 2006
- [14] Anand S. Rao, Michael P. Georgeoff. BDI Agents: From Theory to Practice. <http://www.agent.ai/doc/upload/200302/rao95.pdf>
- [15] Aeronautics Learning Laboratory <http://www.allstar.fiu.edu/AERO/TCAS.htm>
- [16] Adami, C, Introducción to Artificial Life, Springer-Verlag, Nueva Cork, 1998
- [17] JADE. Java Agent DEvelopment Framework. <http://jade.tilab.com/>
- [18] Proyecto Protegè. <http://protege.stanford.edu/>
- [19] MaSE. Multiagent Systems Engineering. <http://macr.cis.ksu.edu/projects/mase.htm>
- [20] StarLogo on the Web. <http://education.mit.edu/starlogo>
- [21] Jared et al A cooperative multi-agent approach to free flight, 2005
- [22] J. Krozel, M. Peters, K. D. Bilimoria, C. Lee, and J. S. B. Mitchell, "System performance characteristics of centralized and decentralized air traffic separation strategies," Fourth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, 2001.
- [23] D. Dugail, E. Feron, and K. Bilimoria, "Stability of intersecting aircraft flows using heading change maneuvers for conflict avoidance," American Control Conference, 2002.
- [24] Z.-H. Mao, E. Feron, and K. Bilimoria, "Stability and performance of intersecting aircraft flows under decentralized conflict avoidance rules," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 2, pp. 101–109, 2001.
- [25] J.C. Hill, F.R Johnson, J.M. Archibald, R.L. Frost, W.C. Stirling, "A Cooperative Multi-Agent Approach to Free Flight", AAMAS'05, Julio 25-29, 2005, Utrecht, Netherlands