



**Universitat Autònoma
de Barcelona**

Análisis del impacto de la configuración dinámica de los sectores en la capacidad de los sectores adyacentes.

Memoria del Trabajo de Fin de Grado en Gestión Aeronáutica

realizado por

Laia Corral Sánchez

y dirigido por

Miquel Àngel Piera Eroles

Escuela de Ingeniería

Sabadell, Septiembre de 2024

El abajo firmante, Miquel Àngel Piera Eroles, director/a del Trabajo de Fin de Grado, profesor de la Escuela de Ingeniería de la UAB,

CERTIFICA:

Que el trabajo al que corresponde la presente memoria
ha sido realizado bajo su dirección por Laia Corral Sánchez
Y para que conste firma la presente en Sabadell, Septiembre de 2024

Firmado: Miquel Àngel Piera Eroles

Título del Trabajo de Fin de Grado: Análisis del impacto de la configuración dinámica de los sectores en la capacidad de los sectores adyacentes.	
Autor[a]: Laia Corral Sánchez	Fecha: 30 de Agosto de 2024
Tutor[a]/[es]: Miquel Àngel Piera Eroles	
Titulación: Gestión Aeronáutica	
Conceptos clave: Early Handover, Sectorización, Capacidad sectores adyacentes, Simulador BlueSky, Eficiencia operativa, Gestión del tráfico aéreo	
<p>Resumen del Trabajo de Fin de Grado:</p> <p>El trabajo titulado “Análisis del impacto de la configuración dinámica de los sectores en la capacidad de los sectores adyacentes”, está centrado en analizar la forma en que la configuración dinámica de los sectores en el espacio aéreo pueden llegar a influir en la capacidad de los sectores adyacentes.</p> <p>El principal objetivo del proyecto, es proponer un procedimiento que mejore la competencia del espacio aéreo, se realiza mediante datos reales. Se pretende comprender el sistema actual de gestión del tráfico aéreo, buscando la mejora de aspectos y validación de mecanismos propuestos mediante códigos de programación y la visualización del simulador BlueSky Open Air Simulator.</p> <p>Este proyecto simula el tráfico aéreo de una zona en un escenario normal y analiza la entrega temprana de aeronaves a sectores adyacentes con una carga menor, Early Handover. Para la realización de esta técnica, se usan parámetros como el tiempo, latitud y longitud en coordenadas, tipo de aeronave y velocidad.</p> <p>Los resultados del trabajo, indican que la técnica de transferencia temprana es útil para reducir tiempos de inactividad y mejorar la capacidad de respuesta en los controladores, además de repartir sus cargas de trabajo.</p> <p>En el estudio, se concluye que la implementación de nuevas tecnologías junto con sistemas digitalizados puede mejorar la gestión del tráfico aéreo aumentando su capacidad y eficiencia.</p>	

Índice

Capítulo 1: Introducción.....	5
1.1. Presentación y objetivos del trabajo.....	6
1.2. Recursos y metodología.....	7
Capítulo 2: Espacio Aéreo.....	8
2.1 Futuras tendencias y desarrollos en la gestión del espacio aéreo.....	9
2.2 Causas de saturación del espacio aéreo y estrategias actuales.....	10
Capítulo 3: BlueSky Simulator.....	12
3.1 Características del software.....	12
3.1.1 Requisitos del sistema.....	14
3.2 Instalación y configuración.....	15
3.3 Objetivo del software.....	16
3.3.1 Aplicaciones.....	17
3.5 Uso del Software.....	19
3.5.1 Proceso de simulación y resultados.....	20
3.5.2 Ventajas del uso de Bluesky Air Traffic Simulator.....	21
3.6 Escenarios.....	22
Capítulo 4: Early Handover.....	31
4.1 Definición de Early Handover.....	31
4.2 Importancia y beneficios.....	34
4.3 Fundamentos y principios básicos.....	35
4.3.1 Conceptos clave.....	35
4.3.2 Principios básicos.....	36
4.4 Proceso de implementación.....	37
4.5 Validación del Sistema.....	38
Capítulo 5: Conclusiones.....	56
5.1 Limitaciones del Proyecto.....	58
5.2 Aplicaciones y beneficios prácticos.....	59
Capítulo 6: Bibliografía.....	60

Capítulo 1: Introducción

El sector aeronáutico constituye un recurso muy importante para la conectividad global y para el traslado de pasajeros, abarcando las mercancías. En este sector, los organismos internos intentan superar las pruebas necesarias para intentar mejorar la capacidad del espacio aéreo y disminuir los retrasos.

Sector estratégico debido a su importancia económica, a la innovación y al avance tecnológico aportado a otros campos, también por sus conexiones mundiales que facilitan el comercio y la movilidad, la independencia, seguridad nacional y debido al prestigio generado en el escenario global.

Un elemento clave dentro del sector aeronáutico, son los sistemas de gestión del tráfico aéreo (ATM- Air Traffic Management), aportan la base técnica de la navegación aérea. Dentro de ATM, se encuentra el control de tránsito aéreo (ATC- Air Traffic Control), que consiste en un servicio realizado por los controladores en tierra que proporcionan la información suficiente a través del espacio aéreo controlado y que además, apoyan a los pilotos.[1]

La parte técnica consiste en supervisar las aeronaves, estas deben circular de manera segura y con una separación apropiada. Podemos hablar de dos responsabilidades separadas en dos zonas; el área de control en tierra y el control de las torres, que están supervisadas y realizadas por los controladores aéreos. Además de esto, tenemos los servicios de comunicación, que tratan de proporcionar información a las operaciones en ruta y aeroportuarias.

La administración del tráfico aéreo se encuentra relacionada con los servicios de tránsito aéreo (ATS).

[2]

Surge una gran necesidad de desarrollar nuevas implementaciones para superar la saturación y congestión del sector aéreo debido a la constante expansión y la gran evolución de la demanda del tráfico aéreo.

Estas herramientas incluyen:

- Innovaciones tecnológicas en la gestión del tráfico aéreo, se implementan sistemas digitalizados basados en tecnologías para poder fortalecer la capacidad y eficiencia del espacio aéreo, así permitiendo supervisar el tráfico aéreo y su gestión de manera más precisa.
- Unificación de infraestructuras y datos, Esta integración en los sistemas da la capacidad de realizar una coordinación más eficiente en la planificación de vuelos y gestión de la infraestructura, además de tomar una decisión más conocedora.
- Sincronización a nivel mundial, establecer procedimientos comunes sobre el espacio aéreo y la seguridad internacionalmente para que así se puedan tener un flujo más coordinado.

Después de analizar detenidamente los datos y proyectar las tendencias futuras, se puede ver reflejada la necesidad de explorar nuevas alternativas o herramientas a corto plazo para poder incrementar la capacidad del espacio aéreo. [3]

1.1. Presentación y objetivos del trabajo

El objetivo del estudio es proponer un mecanismo con la intención de que el tránsito aéreo pueda mejorar su competencia del espacio aéreo a nivel de red, este objetivo se debe alcanzar mediante datos reales obtenidos.

Un requisito puede ser el hecho de realizar una comprensión completa del sistema actual de gestión del tráfico junto con los factores que influyen en el rendimiento para alcanzar el objetivo, para poder realizar la comprensión anteriormente nombrada, se deben utilizar datos realistas sobre el tráfico aéreo y analizarlos, en ellos se incluyen datos sobre las operaciones de vuelo como puede ser las rutas, los tiempos de vuelo, la velocidad y la capacidad.

La recopilación de datos sirve para identificar los puntos que requieren una mejora por parte de la gestión del tráfico aéreo, esto se puede conseguir mejorando la coordinación

entre diferentes sectores del área, creando rutas optimizadas o añadiendo nuevas mejoras que puedan permitir la saturación de las vías.

Podemos validar el estudio propuesto mediante mecanismos digitalizados de simulación, que permitirá la confirmación de su eficacia en diferentes escenarios, asegurando la eficacia y utilidad en diferentes contextos.

1.2. Recursos y metodología

Para validar el mecanismo propuesto, BlueSky Open Air Simulator, se utilizarán simulaciones y modelado como la implementación del sistema de Early Handover.

Para realizar la simulación y el modelado, se diseñará un escenario en el simulador BlueSky Open Air Simulator. Se utilizarán datos sobre el comportamiento del tráfico en el espacio aéreo para así poder evaluar diferentes situaciones.

Se tendrán en cuenta diversas condiciones como la velocidad de la aeronave, la capacidad del sector aéreo, la saturación del espacio aéreo y las incidencias registradas por congestiones o retrasos. Los resultados de dichas pruebas serán analizados y comparados

En el simulador, se implementará un método de Early Handover donde durante la realización se recopilarán los datos en detalle sobre el rendimiento del sistema, así pudiendo seleccionar las simulaciones más eficaces y determinando la capacidad de mejora del tráfico aéreo a nivel de red globalmente.

La implementación del simulador, permitirá validar los resultados en condiciones reales, dando valor a los resultados obtenidos mediante simulaciones.

Capítulo 2: Espacio Aéreo

El espacio aéreo se define como la sección de atmósfera terrestre, sobre tierra o agua, la cual está administrada y regulada por un país en concreto.

Se encuentra dividido en diferentes clases de espacios según el tipo de operaciones, con el fin de proporcionar altos niveles de seguridad y un flujo de aviones competente.

El espacio aéreo durante las operaciones de ruta está dividido en diferentes áreas supervisadas por controladores responsables de gestionar el tráfico en la zona perteneciente.

- Región de Información de Vuelo (FIR - Flight Information Region), según OACI, el mundo está dividido en nueve regiones de información de vuelo, que a su vez se dividen en espacio aéreo inferior (UIR - Upper Information Region) , con tránsitos a baja altitud o en salida/llegada y la espacio aéreo superior, con tránsitos en crucero a alta altitud.

Cada región es gestionada por una autoridad responsable de garantizar los servicios de control a las aeronaves que vuelan en su interior.

- Centro de Control de Área (ACC), los múltiples ACC existentes son los encargados de proporcionar los servicios de tráfico aéreo a los vuelos controlados en el espacio de su responsabilidad. En cada centro de control se encuentra un equipo de controladores clasificados en controladores ejecutivos y controladores planificadores.
- Sectores de Control, gestionan el tráfico de manera eficiente en áreas específicas. Cada uno de estos sectores tiene asignado un grupo de controladores, estos pueden guiarse por las rutas de vuelo, geografía o altitud

[3] [4]

2.1 Futuras tendencias y desarrollos en la gestión del espacio aéreo

En el sector aeronáutico existen ciertas carencias, es por eso que se deben innovar las herramientas utilizadas para así poder aumentar la capacidad en la demanda del tránsito aéreo, dichas herramientas tienen que cumplir los requisitos empleados por la OACI. Estos inconvenientes se encuentran especialmente en etapas con alta demanda. Cuando se habla de demanda, se refiere al total de operaciones en un sector de control en un tiempo determinado.

Según estudios realizados en el año 2023 sobre la demanda de pasajeros del transporte aéreo a nivel global, dicho año terminó con datos muy similares a momentos previos a la pandemia, tal como se indica en los siguientes datos:

- Durante el año 2023, se vivió globalmente un crecimiento en el tráfico del 36,9% en Revenue Passenger Kilometres (Kilómetro por pasajeros transportados), es decir llegando a un 94,1% en comparación a niveles previos a la pandemia. Este parámetro de kilómetros por pasajero transportado en el mes de diciembre aumentaron a un 25,3% alcanzando un 97,5% respecto al nivel del mes de diciembre de 2019. En el último trimestre, el cuarto, se llegaron a posicionar en un 98,2% respecto al año 2019, por tanto son indicios de que a finales de año hubo una recuperación.
- El tráfico a nivel internacional, durante el año 2023 aumentó un 41,6% interanual, es decir respecto un año antes y en comparación al año 2019 se encuentra en un 88,6%. En el mes de diciembre de 2023 aumentó un 24,2% respecto a 2022 y respecto a diciembre de 2019 se situó en un 94,7%. Como consecuencia el cuarto trimestre se situó en un 94,5% respecto a 2019.

[4]

Después de analizar detenidamente los datos y proyectar las tendencias futuras, se puede ver reflejada la necesidad de explorar nuevas alternativas o herramientas a corto plazo para poder incrementar la capacidad del espacio aéreo.

El aumento previsto de la demanda de tráfico tendrá un impacto negativo en la cantidad de regulaciones de vuelo en ruta si el ATC no propone nuevas estrategias para el futuro tráfico.

2.2 Causas de saturación del espacio aéreo y estrategias actuales

Habitualmente, un factor de restricción a la capacidad del sistema es la carga sobre el controlador, esto viene dado a causa de la demanda, cuando existe un incremento en el número de operaciones, se debe realizar una reestructuración de ATC.

Cuando la sección se encuentra saturada debido a un aumento de las operaciones en ruta, existe la posibilidad de mejorar el tráfico aéreo mediante estrategias.

Algunas pueden ser:

- Gestión de la velocidad, con la intención de mantener el constante tráfico y no provocar congestión en el espacio aéreo se reduce la velocidad de ciertas aeronaves para permitir que adelanten otras.
- Redistribución de rutas, consiste en modificar las rutas o establecer nuevas para así desviar el tráfico y disminuir la congestión.
- Capacidad flexible, se puede flexibilizar la capacidad del espacio aéreo usando rutas adicionales temporalmente o una reasignación de los sectores de control para gestionar de manera más eficiente la saturación.
- Reglamentos, Reglamentos son recursos de último momento el día de la operación que pueden afectar al operador, se utilizan en acontecimientos en tiempo real que provocan volúmenes de tránsito sobrecargados para restablecer la estabilidad del flujo y la capacidad del tránsito. Los reglamentos como la restricción de capacidad, asignación de franjas horarias y priorización de vuelos conllevan grandes pérdidas económicas, impactos en la eficiencia operativa y costos para las aerolíneas y pasajeros.

Estas son algunas de las herramientas que se han desarrollado para la gestión del tráfico aéreo basadas en planes de vuelo agregados, y los factores limitantes son las capacidades aeroportuarias y el sector ATC. [5]

Comúnmente se utiliza la DCB (Demand Capacity Balancing) como encargada de minimizar las interrupciones y optimizar las operaciones a través de previsiones que crean un equilibrio entre la capacidad y la demanda, para así dar margen de anticipación al aeropuerto. Se trata de una herramienta que emplea condiciones meteorológicas, datos de vuelos en directo y datos operativos para la toma de decisiones predictivas con la intención de que se realicen operaciones sin interrupciones.

- Predicción de la demanda con hasta 10 días de antelación con la cobertura de datos global con influencia de las futuras condiciones operativas y meteorológicas.
- Previsión de nuevas mejoras en la puntualidad y conectividad de los pasajeros con hasta 7 días de antelación.
- Optimización a través de resultados, observando los escenarios resultantes durante las interrupciones, permite a los equipos de operaciones planificar los escenarios y planificar con confianza.

Proporcionan buenos resultados a gran escala pero no tienen en cuenta los eventos del día de operación que impactan en la carga de trabajo de los controladores aéreo.

[6][7]

Capítulo 3: BlueSky Simulator

BlueSky Open Air Simulator es una herramienta digital, diseñada para simular el tráfico, con un objetivo claro, realizar estudios sobre los flujos y la gestión del tráfico aéreo.

El objetivo de este simulador es facilitar un software de simulación, visualización o análisis del tráfico aéreo, sin ningún tipo de limitación, restricción o licencia. Estas simulaciones pueden ser modificadas, copiadas y citadas.

El modelo es una representación tridimensional del espacio aéreo y la atmósfera, permitiendo modelar aeronaves con diferentes características de vuelo, además de las velocidades, capacidades, etc.

Simula los deberes que tienen los controladores de tráfico aéreo y sus interacciones con los sistemas de navegación y comunicación. Sus características le permiten configurar y personalizar escenarios, además de concretar parámetros como las condiciones meteorológicas.

Normalmente se utiliza para que los pilotos y controladores de tráfico aéreo puedan formarse, para el desarrollo de sistemas de gestión del tráfico aéreo y para la optimización del espacio aéreo y aeropuertos.

[8] [9]

3.1 Características del software

El simulador Bluesky tiene unas características que lo hacen una plataforma muy útil, permite explorar y evaluar el comportamiento del tráfico aéreo en diferentes situaciones simuladas. Algunas características que hacen de BlueSky una herramienta avanzada pueden ser:

Proceso de simulación en tiempo real y acelerado:

Este simulador tiene capacidad para ejecutar simulaciones de tráfico tanto en tiempo real como a una velocidad acelerada, dando la capacidad de estudiar los hechos de la misma forma en que ocurren o acelerando el tiempo para así poder analizar y evaluar a largo plazo, así creando estrategias y algoritmos de gestión.

Apoyo hacia múltiples aeronaves y controladores aéreos

Tiene capacidad para poder gestionar una gran amplitud de aeronaves y controladores. Es una forma de poder realizar escenarios.

Forma un apoyo para la visualización de escenarios voluminosos en cuestiones de tráfico, lo que permite a los usuarios de la aplicación investigar las distintas interacciones y sacar conclusiones, además permite la evaluación del rendimiento de sus sistemas y de los procedimientos simulando condiciones reales.

Visualización del espacio aéreo y sus rutas

BlueSky está formado por una herramientas de visualización que permiten la visión de representaciones del espacio aéreo a detalle, simulando las rutas de vuelo y las posiciones que forman las aeronaves en cada momento. Esta representación, mejora el análisis del comportamiento del tráfico aéreo mediante identificación y resolución de conflictos, y mejora de la productividad del espacio.

Capacidad de personalización y ampliación mediante scripts Python

Es una de sus características más destacadas. Los usuarios son capaces de modificar y ampliar las funciones de BlueSky mediante scripts generados por el programa Python.

Esto da lugar a una personalización según requerimientos especificados, integrando modelos, algoritmos y herramientas con mayor eficiencia.

Compatibilidad

Este software cuenta con compatibilidad en diversas plataformas como pueden ser MacOS, Windows y Linux. Esta propiedad permite que se pueda utilizar en diversos entornos de trabajo, ya que de este modo se permite la colaboración entre equipos e integración con diferentes herramientas de software. [10]

3.1.1 Requisitos del sistema

Existen unos requisitos para garantizar un rendimiento óptimo y una buena experiencia del usuario en la simulación y en el análisis del tráfico aéreo. Hablamos de aspectos que son importantes, como el hardware y el software del equipo.

Sistema Operativo

Bluesky encuentra compatibilidad con numerosos sistemas operativos, como pueden ser Windows 7/8/9, mac OS 10.10+ entre otros.

Procesador

Para poder utilizar Bluesky, y que funcione de manera seguida y fluida, se debe de tener un procesador quad-core con velocidad mínima de 2 GHz, aunque si se prefiere una experiencia más eficaz, es recomendable tener 3GHz.

Espacio de Disco

Es necesario al menos 1GB de espacio libre en el disco para realizar la instalación y el almacenamiento de los datos de Bluesky. Es preferente tener más espacio para poder realizar la creación de archivos de simulación y el registro de los datos necesarios.

Gráficos

Para conseguir generar gráficos en formato 3D es necesario tener una tarjeta con modalidad gráfica que soporte dichos gráficos.

Estos requisitos del sistema ayudan a que Bluesky trabaje de manera óptima, permitiendo ejecutar simulaciones y analizar posteriormente los datos para la gestión del tráfico aéreo. Un hardware más potente da margen a futuras actualizaciones y cargas de trabajo con mayor exigencia, dando lugar a resultados más precisos. El cumplimiento de estos requisitos proporciona que Bluesky funcione de manera óptima en el sistema, permitiendo ejecutar simulaciones y análisis de datos en la gestión del tráfico aéreo. Un hardware más potente da margen a futuras actualizaciones y cargas de trabajo con mayor exigencia, dando lugar a resultados más precisos. [11]

3.2 Instalación y configuración

Para realizar la instalación la aplicación de Bluesky air traffic simulator, lo primero que hay que hacer es abrir el siguiente enlace,

“<https://github.com/TUDELFT-CNS-ATM/bluesky>”

Al abrir el enlace, nos encontramos con la interfaz de la página, donde veremos información necesaria como puede ser carpetas, donde dentro de las mismas encontraremos información sobre actualizaciones, licencias y comandos

Bajaremos por la página y accederemos al siguiente enlace,

“<https://github.com/TUDELFT-CNS-ATM/bluesky/wiki>”, donde nos explica exactamente los pasos a seguir para la instalación, una mínima descripción, la tabla de contenido, en la cual viene indicado como instalarlo, tutorial, comandos. Al entrar al enlace, la misma página nos indica lo que encontraremos en ella

1. Install Bluesky from source.
2. Install Python 3.
3. Install BlueSky as a pip package.
4. Troubleshooting.

El paso previo a la instalación de Bluesky es descargar Python, por lo que si se necesita se deberá navegar por el siguiente enlace, (también proporcionado en la página) <https://github.com/TUDELFT-CNS-ATM/bluesky/wiki/Installation#Install-Python-3>, al

abrirlo, mostrará diferentes formas de instalación, según se trate de un sistema Windows o MacOS, en el caso actual, MacOS, se deberá dirigir al siguiente enlace <https://www.python.org/downloads/>, donde se debe descargar el archivo más reciente o en algunas ocasiones, el que más se adapte al ordenador. En el caso de macOS, al instalar Python hay que instalar el gestor de paquetes PIP. PIP es una herramienta que permite instalar y gestionar los paquetes de software en Python, aunque esto se verá más adelante.

En el caso de Mac, se puede hacer desde el terminal, dentro del terminal, lo primero que haremos será ir al directorio donde se encuentra el archivo, para eso hay que poner el siguiente comando : “% cd Desktop/bluesky-master”, una vez dentro del directorio, para asegurar que estamos en la carpeta correcta, pondremos el comando “ls (ls -l para más información) “. Ahora hay que instalar el paquete pip, anteriormente nombrado. Para ello hay que poner el siguiente comando: “python3 -m pip install requirements.txt “. Posteriormente, ejecutar el fichero (nombre archivo) % python3 BlueSky.py, al hacer esto, se abrirá la aplicación.

[12]

3.3 Objetivo del software

El objetivo de BlueSky Air Traffic Simulator es poder conseguir que sea un sistema avanzado para la simulación y el análisis del tráfico aéreo. Como es un software de código abierto, permite ser accesible y personalizable, por lo que consigue que los investigadores y profesionales puedan experimentar y desarrollar estrategias nuevas en la gestión del tráfico aéreo. Esto permite que aumente la investigación y el desarrollo, permitiendo simular distintos comportamientos.

Se trata de una herramienta fundamental para la formación de los controladores aéreos, ya que se proporciona un entorno virtual donde ensayar con diversas técnicas y procedimientos de control del tráfico de forma segura. Tiene unas capacidades que permiten representar condiciones realistas lo cual permite dar una formación práctica sin asumir los riesgos que se producen en una operación real de entrenamiento.

Permite validar nuevas tecnologías y procedimientos con su simulación de situaciones complejas, donde se pueden analizar problemas y optimizar soluciones antes de que se implemente en la vida real.

El objetivo principal del software en este entorno de simulación trata de:

Simular el tráfico aéreo en un escenario, esto permite generar situaciones en las que poder observar y analizar la gestión del tráfico aéreo, con los diversos inconvenientes y riesgos que pueden surgir a lo largo de su evolución.

Bluesky Simulator, evalúa los procedimientos y estrategias de gestión del espacio aéreo, permite observar los resultados y analizarlos antes de implementarlos en una situación real.

También permite probar técnicas y desarrollar nuevas estrategias, en un entorno en el que poder investigar sin peligros.

Muestra por pantalla la evolución de las aeronaves a lo largo del tiempo, lo que facilita la detección de zonas de congestión de tráfico además de visualizar la distribución de vuelos.

Detecta y visualiza por pantalla conflictos entre las aeronaves que forman parte de cada escenario, es decir las situaciones en que existen colisiones potenciales entre las aeronaves generadas en el sistema Bluesky. Al tratar de conflictos se puede referir a distintas situaciones como son las interferencias o los cruces en las trayectorias, situaciones de congestión o saturación y las colisiones potenciales entre aeronaves ya mencionadas anteriormente.

3.3.1 Aplicaciones

Existen diversas áreas de aplicación de Bluesky, teniendo como valor la mejora continua de la seguridad y la eficiencia en la aviación.

Ámbito académico:

La realización de estudios precisos relacionados con el tráfico aéreo, es muy relevante para el crecimiento del sector con la creación de nuevas tecnologías, teorías y morelos, mediante la investigación.

Dichos investigadores estudian las diferentes situaciones como son los patrones seguidos de tráfico, las relaciones entre aeronaves y controladores, y en análisis del impacto en seguridad y eficiencia. Consta de un código abierto que da lugar a la personalización del simulador según las preferencias de cada escenario e investigación.

Desarrollo de nuevas tecnologías y métodos:

El sector de la aviación se encuentra en necesidad constante de cambio debido a su evolución, es por eso su introducción continua de nuevas tecnologías y procedimientos. BlueSky nos permite probar estos procesos en un entorno controlado, realizando los procedimientos de prueba en ambientes controlados con el objetivo de generar nuevos sistemas avanzados de control de tráfico, algoritmos para optimizar rutas y nuevas metodologías para los controladores. Ayuda a identificar los problemas antes de implementarlos en una situación real.

Aprendizaje de controladores aéreos:

Para formar a los controladores aéreos se debe seguir un conjunto de tareas con prácticas intensivas dentro de un entorno vigilado. Este software, proporciona un entorno controlado y de simulación realista, además da lugar a la práctica de la toma de decisiones en situaciones complicadas y resolución de conflictos, es por eso que se utiliza para el entrenamiento de futuros controladores. Además de mejorar técnicas y formar a los controladores, permite mejorar la eficiencia y la seguridad del espacio aéreo.

Análisis y mejora de las políticas de gestión del espacio aéreo:

Los organismos reguladores y las autoridades hacen uso de Bluesky para evaluar las políticas y procedimientos sobre la gestión del tráfico aéreo y los optimizan. El simulador permite probar nuevos enfoques e implementación de nuevas regulaciones. Facilita la toma de decisiones y permite a las autoridades y reguladores anticipar y evitar los posibles problemas.

Modelado de emergencias y gestión de crisis:

También se utiliza para simular situaciones de emergencia y poder gestionar esa crisis en el tráfico aéreo. Permite a los profesionales analizar el sector además de estudiar y preparar las respuestas a eventos específicos como pueden ser fallos técnicos, emergencias de salud y desastres naturales. Al realizar simulaciones de estos escenarios mejora la preparación, dando una respuesta coordinada y eficaz en la vida real.

Al ser una herramienta multifuncional se encarga de mejorar la gestión del tráfico aéreo con la simulación de escenarios realistas, su personalización y flexibilidad, lo que lo convierte en una plataforma imprescindible para la investigación y desarrollo de la aviación.

3.5 Uso del Software

Bluesky Air Traffic Simulator, el software consta de una herramienta de uso avanzado para analizar y simular el tráfico aéreo en entornos realistas y controlados.

Se trata de una plataforma con capacidad de modelar y simular operaciones en el espacio aéreo. Da lugar a los profesionales del control del tráfico aéreo como son los ingenieros e investigadores de evaluar diferentes situaciones, escenarios, estrategias de gestión y tecnologías en un entorno controlado.

Las características principales son las siguientes:

Diseño detallado de escenarios

Estructura y configuración del espacio, permite la configuración de la estructura del espacio aéreo, teniendo en cuenta las aeronaves con sus rutas de vuelo, zonas de control, aeropuertos, división en sectores. Es una configuración imprescindible para hacer una simulación con condiciones concretas de tráfico y en eventos como despegues y aterrizajes. También establece parámetros para generar vuelos precisos con velocidades, altitudes máximas/mínimas, tipos de aeronaves y rutas. Estos parámetros generan un comportamiento realista y previenen posibles conflictos

Modelado de vuelos y sus comportamientos

Genera una simulación de un comportamiento realista en aeronaves, utilizando variables como altitud, latitud, velocidad. Estos datos mejoran la predicción sobre cómo interactúan las aeronaves en las diferentes condiciones, tanto de tráfico como meteorológicas.

Examina el comportamiento de las aeronaves al entrar en proximidad, teniendo en consideración la separación mínima requerida y las maniobras de evasión en emergencias.

Optimización de la gestión del tráfico

Bluesky trata de facilitar la implementación y evaluación de las diversas estrategias del tráfico:

- Early handover: permite transferir con antelación con el objetivo de optimizar la capacidad de los sectores y retrasar la aparición de congestiones. La simulación permite observar y analizar cómo afecta al flujo general de tráfico.
- Optimización de rutas: compara diferentes para la asignación de las rutas de vuelo, analiza cómo afectan sus cambios en la eficiencia del tráfico y tiempos de vuelo.

Seguridad operacional y ambiental en operaciones aéreas

Tiene capacidad de evaluar el impacto ambiental y la seguridad operacional de las operaciones simuladas.

- Seguridad operacional, realiza un análisis de la seguridad operacional empleando una detección de conflictos entre aeronaves y sectores de control. También cuenta con evaluación de posibles escenarios de colisión y comprobación de los protocolos de separación.
- Impacto ambiental, a través de simulaciones, realiza cálculos de las emisiones de gases contaminantes y de la contaminación acústica que pueden llegar a provocar las operaciones. [13]

3.5.1 Proceso de simulación y resultados

Dentro del software se genera un proceso de simulación.

Configuración Inicial,

Se deben configurar diversos parámetros iniciales antes de iniciar una simulación.

- Definir el escenario, hay que definir el entorno en que se va a simular, puede ser en condiciones de tráfico normal, o acelerado o situaciones de emergencia.
- Parámetros meteorológicos, se establecen las condiciones meteorológicas de la simulación, es decir la visibilidad, turbulencias y vientos. Es decir los parámetros que afectan directamente en las operaciones del tráfico aéreo y capacidad del espacio.
- Volumen de tráfico, se determina el número y tipo de aeronaves que participarán en la simulación.

Ejecución de las simulaciones y seguimiento,

- Monitoreo en tiempo real, durante la ejecución de las simulaciones, se realiza un seguimiento en tiempo real del desarrollo de las operaciones de tráfico aéreo. En este monitoreo se analiza la distribución del tráfico, respuesta de los controladores y eventos inesperados que puedan desarrollarse.
- Ajustes operativos, pueden realizarse ajustes en el vuelo y en las condiciones de simulación una vez se estén ejecutando las simulaciones con tal de explorar en los diferentes escenarios y condiciones.

Análisis y evaluación de los resultados,

Al finalizar la simulación, se analizan los resultados.

Comparativa de escenarios, se lleva a cabo una comparación de los resultados obtenidos en las configuraciones de simulación o escenarios con el objetivo de valorar la efectividad de la estrategia. En esta comparativa se debe tener en cuenta como afecta la estrategia a la capacidad del espacio aéreo, los tiempos de vuelo y seguridad operacional.

Elaboración de informes, se generan informes para documentar las conclusiones derivadas de la simulación. Son informes imprescindibles para guiar en decisiones en políticas de gestión del tráfico.

3.5.2 Ventajas del uso de Bluesky Air Traffic Simulator

Investigación y desarrollo avanzados, bluesky brinda una plataforma flexible para la investigación avanzada de la gestión del tráfico donde probar nuevas teorías y energías en entorno controlado.

Formación y capacitación, el software se usa en programas de formación y capacitación. A través de él, se puede aprender y tener un nivel práctico y realista, permitiendo a los estudiantes familiarizarse con operaciones complejas y mejorar la toma de decisiones.

Optimización de rutas y recursos, permite mejorar la eficiencia operativa y los costes asociados. La optimización de estos recursos puede mejorar la gestión del flujo de tráfico y una reducción de los tiempos de espera.

Validación de políticas y normas, la aplicación simplifica la validación de políticas y normas propuestas antes de implementarse en entornos reales. Por tanto, se asegura que las decisiones contribuyan a mejorar el sistema de gestión de tráfico. [14]

3.6 Escenarios

El primer escenario consta de un conjunto de datos extraídos de un tráfico real pero con un objetivo representativo de un tráfico normal. Se representa un tráfico aéreo que define sectores y representa un conjunto de vuelos con códigos extraídos del 20/06/2002, que constan de:

1. Tiempo, en formato 'hh:mm:ss'. En el escenario de tráfico normal, todas las aeronaves generadas empiezan al mismo tiempo en '0:00:00.00'.
2. CRE/DEST, en segundo lugar se encuentran esas etiquetas que pueden indicar la creación de un evento o el destino con el código IATA.
3. Identificación del vuelo, cuenta con un ID único para cada vuelo.
4. Modelo o tipo de aeronave generada.
5. Latitud y longitud, las coordenadas que representan la latitud y la longitud de la posición de la aeronave.
6. *Heading*, lugar hacia donde se dirige la aeronave en grados.
7. Altitud, donde se encuentra la aeronave en pies.

8. Velocidad, como se desplaza la aeronave.

Se definen unas coordenadas geográficas para establecer las áreas en que está dividido el espacio aéreo, en este caso se ha dividido en 5 sectores: Principal, Norte, Sur, Este y Oeste. Cada una se trata de un sector de Italia definido por unas coordenadas.

```

0:00:00.00>BOX Principal,40.299,11.2235,42.301,13.8765
0:00:00.00>BOX Norte,42.301,11.2235,44.303,13.8765
0:00:00.00>BOX Sur,38.297,11.2235,40.299,13.8765
0:00:00.00>BOX Este,40.299,13.8765,42.301,16.5295
0:00:00.00>BOX Oeste,40.299,8.5705,42.301,11.2235

00:00:00.00>CRE 3e232e B738 36.40 -4.23 53.9 FL306 180.0
00:00:00.00>CRE 407ac6 B738 40.87 13.44 117.0 FL319 246.0
.....

```

Para poder visualizar en la aplicación BlueSky los datos del fichero con datos de tráfico normales debemos de seguir unos pasos.

Primero se debe de abrir la terminal, navegando con una ruta hasta encontrar la aplicación bluesky es decir en este caso, 'cd /Desktop/blueskymaster', seguidamente abrimos python para bluesky con 'python3 BlueSky.py' con estos pasos directamente procede a abrirse el simulador BlueSky.

Allí encontramos con una consola donde se pueden introducir los diferentes comandos, teniendo en cuenta que el fichero donde se han creado los diferentes vuelos está nombrado como 'sectores-9-10.scn' escribimos en la consola: 'TC/Users/laiacorrall/Desktop/blueskymaster/sectores-9-10.scn', con esto ya podemos ver por pantalla la evolución de los diferentes vuelos.

El archivo early.scn se utiliza para definir las áreas geográficas y la creación de las aeronaves, en primer lugar del archivo se crean las áreas geográficas, en esta caso son 10 donde cada una toma 6 valores que incluyen la latitud mínima y máxima, longitud

mínima y máxima, altitud mínima y máxima en formato '(lat_min, lon_min, lat_max, lon_max, alt_min, alt_max)'.

Para introducir la lista de comandos CRE simplemente se debe de seguir el mismo formato e ir agregando nuevas líneas. El contenido del archivo es el siguiente:

Sector Principal

Vuelo	Tipo	Latitud	Longitud	Altitud de Crucero	Nivel de Vuelo	Velocidad
407ac6	B738	40.87	13.44	117.0	319	246.0
4d0227	B738	42.12	12.26	135.2	286	137.0
345218	B738	41.32	11.56	250.1	290	200.0
4d2330	B738	40.90	13.41	87.4	282	214.0
4aca12	B738	42.03	12.20	197.1	289	98.0
406e2e	B738	42.15	11.87	102.7	302	166.0
4d2280	B738	40.73	12.82	318.4	282	218.0
300624	B738	42.18	12.68	42.2	310	44.0
aa788b	B738	41.37	13.69	325.7	285	211.0
400db4	B738	41.72	13.37	317.2	324	213.0
300247	B738	42.15	12.23	147.8	313	51.0
02a1b3	B738	41.94	12.22	162.6	303	98.0
4b1809	B738	40.41	12.60	144.7	321	226.0
4d2027	B738	40.43	12.64	166.1	280	247.0
4ca9eb	B738	42.00	11.46	313.3	305	214.0
471f53	B738	41.63	11.51	69.6	297	235.0
32003e	B738	41.80	12.59	329.9	294	11.0
4bccb5	B738	42.20	12.48	102.7	303	227.0

407d10	B738	41.64	11.59	124.7	FL301	241.0
4076e3	B738	41.18	11.86	144.0	FL308	239.0
aac6ee	B738	41.80	11.47	275.9	FL286	189.0
344692	B738	42.01	12.08	52.3	FL326	103.0
344696	B738	41.57	11.89	243.6	FL327	177.0
484fde	B738	41.82	12.14	309.6	FL311	119.0
3994ef	B738	41.80	12.59	152.4	FL318	50.0
a88e71	B738	41.63	12.71	93.6	FL313	162.0
4d2368	B738	40.62	11.85	357.3	FL322	229.0
4bb186	B738	41.72	12.39	256.9	FL285	251.0

4ca758	B738	40.76	11.92	4.5	297	228.0
344693	B738	41.83	12.22	162.4	289	70.0
300363	B738	41.81	11.35	212.5	318	224.0
4d21ee	B738	41.81	12.58	315.9	309	143.0
320052	B738	41.64	12.46	131.8	295	65.0
4cad47	B738	41.80	12.24	250.3	283	84.0
4caa9b	B738	41.78	12.24	162.9	322	94.0
3003d0	B738	41.22	13.86	323.6	319	175.0
4ca800	B738	41.80	12.24	249.8	326	79.0

aa37ce	B738	41.80	12.23	249.8	FL289	94.0
46b8a3	B738	41.80	12.24	248.6	FL285	77.0
346185	B738	41.80	12.24	250.4	FL293	78.0
32000d	B738	41.65	12.42	311.4	FL287	35.0
300815	B738	41.95	12.50	339.8	FL325	37.0
aa5428	B738	41.80	12.23	248.4	FL306	91.0
4d21eb	B738	41.80	12.23	250.1	FL300	85.0
aaf47d	B738	41.80	12.24	250.0	FL300	89.0
a219ea	B738	41.80	12.23	249.3	FL325	96.0
461faa	B738	41.80	12.24	249.2	FL285	80.0
33fd0a	B738	41.66	12.44	307.3	FL326	92.0
8964fa	B738	41.80	12.24	250.2	FL310	86.0
33fda8	B738	41.66	12.43	304.2	FL317	78.0
3008b8	B738	41.70	13.07	300.1	FL315	74.0
33fd49	B738	41.47	12.54	0.9	FL292	68.0
02a190	B738	41.80	12.24	247.2	FL316	73.0
3443d5	B738	41.80	12.24	249.1	FL281	81.0
4d2272	B738	41.80	12.24	249.4	FL286	82.0
4ba9d2	B738	41.80	12.24	249.5	FL299	81.0
500214	B738	41.80	12.24	250.1	FL284	77.0
45ac30	B738	41.80	12.25	250.0	FL301	78.0
4ca8fc	B738	41.80	12.23	251.0	FL282	90.0

Tabla 1. Vuelos con origen en el sector principal.

Sector Norte

Vuelo	Tipo	Latitud	Longitud	Altitud de Crucero	Nivel de Vuelo	Velocidad
4ca6a5	B738	43.01	12.47	206.6	FL288	114.0
300681	B738	42.40	12.53	167.6	FL330	31.0
40711b	B738	43.97	12.25	160.9	FL288	236.0
76cef0	B738	43.43	12.84	314.8	FL319	243.0
471f39	B738	42.71	12.17	175.7	FL304	218.0
c01755	B738	43.79	11.82	163.4	FL305	257.0
300702	B738	44.24	12.14	142.0	FL310	66.0
3c66b1	B738	43.26	11.53	329.5	FL309	235.0
346612	B738	43.67	12.04	322.0	FL330	196.0
717cad	B738	43.78	12.13	130.9	FL324	87.0
44068a	B738	43.26	11.43	144.6	FL283	138.0
484966	B738	43.64	11.61	0.1	FL316	237.0
4ca4ee	B738	42.98	12.04	129.4	FL310	232.0
4d2243	B738	44.28	11.54	180.6	FL296	183.0
44014a	B738	42.58	12.31	326.9	FL330	220.0
4d2219	B738	44.21	11.53	332.5	FL318	208.0
47bfb3	B738	43.31	12.19	181.2	FL320	215.0
4d236b	B738	43.17	13.78	124.2	FL300	243.0
4d2286	B738	43.91	12.99	207.2	FL305	224.0
4ca9cd	B738	44.14	13.01	331.2	FL292	226.0
4d2228	B738	43.83	11.95	273.6	FL318	190.0
440c33	B738	44.00	11.59	355.8	FL329	230.0
4ca7e1	B738	43.54	11.43	142.0	FL298	234.0
49d381	B738	43.16	12.50	282.9	FL302	109.0

Tabla 2. Vuelos con origen en el sector Norte.

Sector Sur

Vuelo	Tipo	Latitud	Longitud	Altitud de Crucero	Nivel de Vuelo	Velocidad
5001dc	B738	39.73	13.08	282.4	FL309	232.0
346188	B738	39.10	12.96	152.8	FL300	189.0
4d2211	B738	39.97	11.84	339.0	FL307	222.0
471f8f	B738	38.49	12.88	346.8	FL296	192.0
4d20d1	B738	38.65	12.77	351.1	FL323	233.0
3c648b	B738	39.82	12.45	154.4	FL293	240.0
4d225d	B738	39.44	12.16	334.1	FL325	231.0
34660b	B738	40.06	11.27	102.0	FL324	235.0
346516	B738	39.08	12.46	181.9	FL323	239.0
4d2238	B738	38.72	13.34	0.3	FL330	201.0
489228	B738	40.09	11.79	335.1	FL286	230.0
4ca8f5	B738	39.56	12.79	161.5	FL316	228.0
ae03e0	B738	38.48	12.31	122.9	FL313	162.0
345699	B738	39.31	13.73	198.5	FL306	191.0
4ca783	B738	38.30	12.88	328.8	FL281	143.0

Tabla 3. Vuelos con origen en el sector Sur.

Sector Este

Vuelo	Tipo	Latitud	Longitud	Altitud de Crucero	Nivel de Vuelo	Velocidad
3c648e	B738	41.91	14.29	186.1	FL322	237.0
405b65	B738	41.38	14.37	139.0	FL283	162.0
4d2279	B738	40.79	14.01	272.8	FL287	223.0
4ca8f0	B738	40.78	13.94	147.3	FL316	229.0
471a79	B738	41.92	14.47	346.5	FL318	171.0
4ca80d	B738	40.32	16.47	117.0	FL308	236.0
4d225b	B738	42.13	15.27	299.8	FL314	216.0
30052f	B738	41.80	13.89	139.4	FL305	115.0
06a2e9	B738	40.74	15.07	91.5	FL317	256.0
471df7	B738	42.19	15.70	314.6	FL325	228.0
4d236c	B738	42.08	15.37	311.1	FL326	222.0

Tabla 4. Vuelos con origen en el sector Este.

Sector Oeste

Vuelo	Tipo	Latitud	Longitud	Altitud de Crucero	Nivel de Vuelo	Velocidad
4c4e94	B738	41.34	10.85	241.8	FL280	188.0
ae03f0	B738	42.22	8.61	327.5	FL314	146.0
ab00d6	B738	41.18	11.04	249.7	FL296	209.0
345249	B738	42.13	11.17	299.3	FL316	211.0
495151	B738	41.17	9.88	70.1	FL306	236.0
4cafd2	B738	40.89	9.00	267.4	FL316	218.0
0101b7	B738	40.34	9.94	289.9	FL313	229.0
3991e4	B738	40.45	8.62	151.2	FL308	235.0
3001f3	B738	41.47	9.41	355.1	FL312	175.0
347256	B738	41.33	9.81	17.2	FL297	180.0
300371	B738	41.16	10.17	65.9	FL291	193.0
4ca81c	B738	41.41	9.28	357.7	FL296	192.0
4ca5c3	B738	41.05	9.36	70.6	FL318	223.0
a0fc23	B738	41.57	8.89	318.8	FL317	217.0

Tabla 5. Vuelos con origen en el sector Oeste.

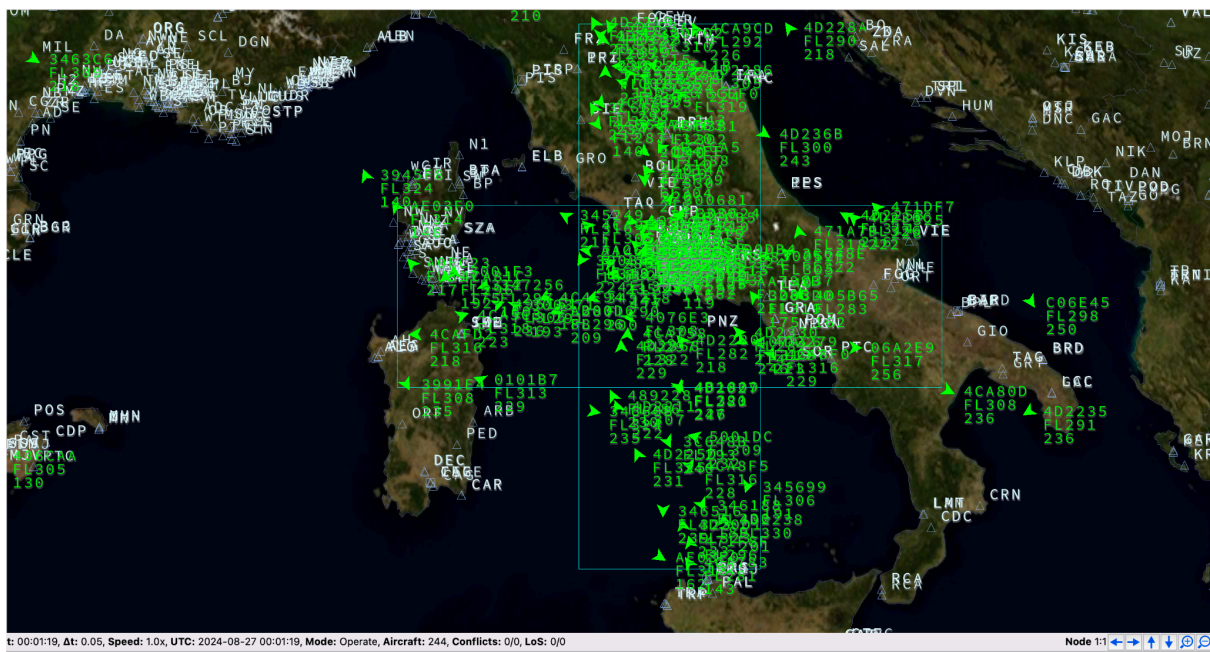


Figura 1. Mapa del tráfico aéreo global simulado

La ilustración anterior muestra el mapa de la aplicación bluesky, abajo muestra ciertos datos de la simulación, estos son el tiempo, es decir hora en que se observa la información del mapa, en esta ocasión 00:01:19; Delta tiempo, es la cantidad de tiempo que pasa entre actualizaciones de datos; velocidad en este caso es de 1.0x (es decir está aumentada); la hora UTC es: 2024-08-27 00:01:19; El sistema se encuentra en estado operate, es decir operativo, también existen otros modos de estado posibles como son: en espera (standby), desconectado (offline), mantenimiento (maintenance), prueba (test) o emergencia (emergency).

La aplicación muestra 224 aeronaves que han sido introducidas a través del archivo 'sectores-9-10'; en conflictos se refiere a que no ha sido detectado ni resuelto ningún conflicto en este momento; en línea de visión, muestra que no hay problemas detectados ni resueltos respecto a visibilidad u obstáculos.

Capítulo 4: Early Handover

4.1 Definición de Early Handover

Es un proceso referente al tráfico aéreo, donde un controlador transfiere su responsabilidad a otro antes.

Esta situación se da, porque los controladores están acostumbrados a que cuando una aeronave está muy cerca de salir y entrar en otro sector, donde el controlador planificador de un sector X solicita la aceptación del vuelo que está a punto de salir al controlador ejecutivo del sector Y, para que pase a estar controlado por el sector Y aunque siga presente en el sector X.

Early Handover se puede producir en diversas situaciones con el objetivo de gestionar el flujo de tráfico proporcionando seguridad. Algunas situaciones comunes son:

- Saturación del espacio aéreo, es la principal situación, cuando está congestionado se realizan para que no se produzca una acumulación en un área concreta y se redistribuye.
- Mejora de rutas, se utiliza en caso de identificarse una ruta con más eficiencia o menos saturación para un vuelo concreto, además se puede transferir la responsabilidad a un controlador con mejor posicionamiento para la gestión.
- Próximo a aeropuertos, en situaciones donde un avión entra en zona de aproximación, los controladores lo realizan para desplazar la responsabilidad al sector de llegada y así completar un aterrizaje seguro y eficiente.
- Cooperación internacional, referido a una situación en que varios países comparten el mismo espacio aéreo y se necesita un 'early handover' para que se de una correcta coordinación en la transferencia de responsabilidades.

Se realizan teniendo en cuenta que los vuelos transferidos reciban la asistencia perteneciente en el momento necesario y que los recursos sean óptimos.

Early Handover o transferencia anticipada en ATM (Gestión del Tráfico Aéreo) da un enfoque estratégico que permite mejorar la seguridad del tráfico aéreo. No es únicamente un proceso de transferencia de las responsabilidades entre controladores sino que conlleva un conjunto de prácticas que son creadas para garantizar un flujo de aeronaves seguro y eficiente a lo largo de su trayectoria.

Esta técnica en lugar de esperar a que la aeronave se encuentre cerca de los límites del sector, promueve que se transfiera de manera anticipada siempre que se cumplan criterios específicos, como son que la aeronave se encuentre en situación de ‘conflict-free’ y que el sector que recibe tenga la capacidad suficiente para poder gestionar y recibir la aeronave de manera eficiente.

El objetivo principal de utilizar esta transferencia es equilibrar la carga de trabajo de los controladores aéreos y así optimizar los recursos disponibles en el sistema. Al adelantar esta transferencia de responsabilidades, se intenta evitar la acumulación de aeronaves en áreas que se encuentran congestionadas en el espacio aéreo y así redistribuir el tráfico más uniformemente.

Early handover se observa en situaciones que conllevan necesidades específicas como puede ser la saturación del espacio aéreo, en este ejemplo permite redistribuir las aeronaves de manera temprana para evitar congestiones y retrasos. También se puede realizar un early handover para en situaciones donde se visualice una ruta más eficiente trasladando la responsabilidad a un controlador que se encuentre mejor posicionado.

Es especialmente relevante en momentos críticos como durante la aproximación a aeropuertos o cuando los vuelos atraviesan diferentes países. En estas situaciones el adelantar la transferencia de responsabilidades asegura que el cambio de control de la aeronave sea de forma segura. Esto ayuda a que el aterrizaje sea seguro y eficiente además de ayudar a la coordinación entre diferentes áreas geográficas o países.

Aspectos Avanzados de Early Handover,

- Integración de avances tecnológicos, los avances a nivel tecnológico como son los sistemas automatizados y herramientas de apoyo a la hora de tomar decisiones, juegan un papel crucial en la implementación de early handover. Mejoran las labores de los controladores como la anticipación de situaciones y optimización de la transferencia de responsabilidades.
- Mejora en la eficiencia del combustible, al realizarse esta técnica se puede contribuir a la eficiencia del combustible, ya que genera rutas óptimas en las que las aeronaves pueden volar de una manera más eficiente, así reduciendo las emisiones de carbono y el consumo de combustible en sí.
- Formación, para implementar la técnica early handover se debe realizar una formación intensiva a los controladores. Para capacitar a los controladores para manejar situaciones de transferencia anticipada de un modo eficiente, se debe hacer uso de simulaciones y prácticas.
- Comunicación y cooperación, debe tenerse una comunicación clara entre los diferentes sectores y controladores para que la técnica de transferencia anticipada surja con éxito. La confianza entre los equipos de control es imprescindible para tener una transición sin intereses.
- Evaluación y análisis, después de la implementación early handover, se deben realizar evaluaciones a nivel periódico para poder recoger el *feedback* de los controladores aéreos. Esta evaluación permite que se identifiquen las mejoras y se ajusten con tal de optimizar la gestión.
- Condiciones meteorológicas, estas condiciones pueden influir directamente en la necesidad de early handover. Puede ser en situaciones de clima adverso donde se necesite gestionar el tráfico y minimizar los riesgos asociados a fenómenos meteorológicos como tormentas y turbulencias.

En conclusión, Early Handover además de representar un proceso para la transferencia de responsabilidad, también tiene un enfoque estratégico que permite gestionar el tráfico de manera eficiente y segura. Los sistemas de gestión al anticipar las transferencias de control y adoptar las prácticas, garantizan un flujo continuo y seguro del tráfico. [15]

4.2 Importancia y beneficios

La transmisión temprana juega un papel importante en el desarrollo y algunos de sus aspectos importantes incluyen:

Menos carga de trabajo; Durante ciertos períodos de mucho tráfico, la carga de trabajo de los controladores aéreos puede ser significativamente mayor.

Este método reduce la carga al redistribuir las responsabilidades de manera más equitativa entre los superiores. La acumulación de tráfico en un área se puede evitar permitiendo que las aeronaves se desplacen hacia áreas vecinas.

Al optimizar la seguridad operativa, es muy importante que la seguridad operativa elimine la acumulación excesiva en un área. Esta ruta temprana nos permite trasladar los aviones a áreas vecinas antes de que se llenen, reduciendo así el riesgo de congestión y errores asociados con cargas de trabajo excesivas.

La gestión eficaz del espacio aéreo al facilitar las transiciones del espacio aéreo optimiza el uso del espacio aéreo disponible.

Esto da como resultado un control del tráfico aéreo más flexible y tiempos de espera de aeronaves reducidos, que son esenciales para mantener operaciones fluidas.

Adaptación a los cambios en el clima y el tráfico, la capacidad de entregar los aviones antes ayuda a garantizar una respuesta más rápida a eventos imprevistos como condiciones climáticas adversas o emergencias.

La asignación óptima de recursos a través de una planificación anticipada permite una asignación más eficiente de recursos humanos y tecnológicos. Esto incluye programar descansos para que los despachadores se mantengan alerta y puedan gestionar eficazmente situaciones críticas.

Entre sus ventajas destacan una gran cantidad de aspectos operativos y de seguridad:

Disminución de estrés y fatiga; Provoca una disminución al distribuir la carga de trabajo entre los controladores de forma más igualada.

Mejora de la planificación a nivel operativo: Anticiparse y planificar en la transferencia de aeronaves permite conseguir un mejor flujo del tráfico, esto hace que se produzca una reducción en los tiempos de espera y se utilicen todos los recursos.

Aumento de la capacidad y eficacia: Se puede conseguir una mejor capacidad mejorando la congestión de sectores específicos y optimizando la eficacia operativa, esto provoca que haya menos retrasos en los vuelos.

Flexibilidad y Adaptabilidad: Consiste en mejorar la flexibilidad por si surgen cambios repentinos en la demanda del tráfico, esto hace que el sistema se pueda ajustar a posibles cambios o problemas sin poner en riesgo la seguridad.

Normativas y estándares, las regulaciones y los estándares establecidos por las autoridades aeronáuticas, asegurando que se realizan en un entorno seguro y confiable.

Por tanto, la transferencia anticipada en la gestión del tráfico aéreo no mejora únicamente la seguridad y eficiencia operativa, sino que contribuye a proporcionar una mejor experiencia al consumidor teniendo en cuenta que se reducen los retrasos y se optimiza la gestión del flujo de tráfico.

4.3 Fundamentos y principios básicos

Agregar esta técnica puede producir una serie de conceptos y principios básicos fundamentales para la comprensión y efectividad. A Continuación se trata sobre estos conceptos en la gestión del tráfico aéreo.

4.3.1 Conceptos clave

- Sectorización, el espacio aéreo se encuentra dividido en sectores, que también están gestionados por los controladores aéreos. La técnica de transferencia anticipada evita la sobrecarga en algunos sectores y mejora el flujo de tráfico.
- Capacidad del sector, cada sector cuenta con una capacidad máxima para manejar de manera segura. Si se sobrepasa esta capacidad máxima puede poner en peligro la seguridad operativa. La transferencia anticipada puede evitar la sobrecarga de trabajo en un sector, manteniendo el tráfico en límites seguros y proporcionando una gestión más segura.

- Puntos de transferencia, estos puntos son espacios predefinidos en el espacio aéreo para que las aeronaves sean transferidas de un sector al adyacente. Durante la transferencia, los puntos se pueden ajustar dinámicamente con el objetivo de optimizar la gestión del tráfico y asegurando que las aeronaves puedan circular sin interrupciones.

4.3.2 Principios básicos

- Temporalidad, se debe realizar la transferencia anticipada antes de que la carga de trabajo llegue a niveles críticos en un específico sector. Esta temporalidad previene la acumulación de tareas y mejora la capacidad de respuesta, debido a que permite a los controladores gestionar el tráfico de manera más equilibrada.
- Comunicación clara y coordinación, entre los controladores para realizar efectivamente la técnica. Se requiere una coordinación exacta para asegurar que toda la información en relación a la aeronave sea transferida sin errores. Debe haber comunicación continua para evitar malentendidos y garantizar una transición fluida.
- Flexibilidad y adaptabilidad, son cualidades que se deben encontrar entre las capacidades de los controladores aéreos, ya que deben adaptarse rápidamente a cambios bruscos en el tráfico y diversas condiciones meteorológicas. La flexibilidad que proporciona la implementación de la técnica early handover permite una gestión más eficaz del espacio aéreo. Esta incluye la capacidad de ajustar los puntos de transferencia y los procedimientos en respuesta a cambios en tiempo real.
- Seguridad, es un imprescindible en cualquier situación referente a la gestión del espacio aéreo, en la transferencia anticipada se debe garantizar que las aeronaves realizan operaciones sin correr ningún riesgo para la seguridad. Es por eso que se deben revisar periódicamente los posibles riesgos.

4.4 Proceso de implementación

Método de análisis,

Previamente al desarrollo del proyecto, se ideó realizar un análisis de los resultados obtenidos por la aplicación BlueSky Simulator y hacer una evaluación. Después de realizar diversas pruebas y consideraciones se decidió utilizar diferentes métodos de análisis con Python, exactamente *matplotlib* para visualizar y *defaultdict* y *math* para la detección de conflictos.

- Matplotlib se trata de una biblioteca de python con capacidad de creación de gráficos y visualización de datos.
- Math, consiste en un módulo con formato estándar de python que tiene como función proporcionar funciones con carácter matemático básicas y avanzadas.
- Defaultdict, es una subclase del diccionario 'dict' que consiste en asignar un valor predeterminado a cualquier clave que no exista con anterioridad en el diccionario. Esta técnica evita la aparición del error 'KeyError'.

Ventajas del proceso de implantación:

- Al utilizar 'matplotlib' permite visualizar por pantalla de manera clara y efectiva la evolución de las aeronaves y su distribución en el aire dividiéndose por sectores. Además facilita la creación de interpretaciones visuales como son gráficos de manera rápida sin procedimientos complejos.
- Los datos aportados por 'defaultdict' y los procesos matemáticos de 'math' dan lugar a la detección de conflictos entre vuelos. Permitiendo analizar los conflictos de forma directa por pantalla.
- Python permite analizar de una forma más rápida y eficiente ya que puede implementar programas simples. Deja de lado la necesidad de complicar los procedimientos, enfocándose a observar directamente las decisiones relevantes.
- BlueSky Simulator, pese a ser una herramienta con mucha utilidad presentaba algunas limitaciones a la hora de analizar los resultados además de requerir altas complicaciones para realizar los programas.

4.5 Validación del Sistema

Para validar el sistema de Early Handover, se emplearon los programas desarrollados con Python. A continuación se presentan los resultados y las visualizaciones obtenidas:

Para hacer la validación del sistema de entrega anticipada, primeramente se analiza y divide el espacio aéreo en sectores, también se utilizan diferentes programas el primero cuenta las aeronaves en cada sector, en el segundo nos devuelve una lista con los conflictos entre aeronaves y el tercero procede a determinar si es recomendable realizar la técnica de transferencia temprana al sector adyacente.

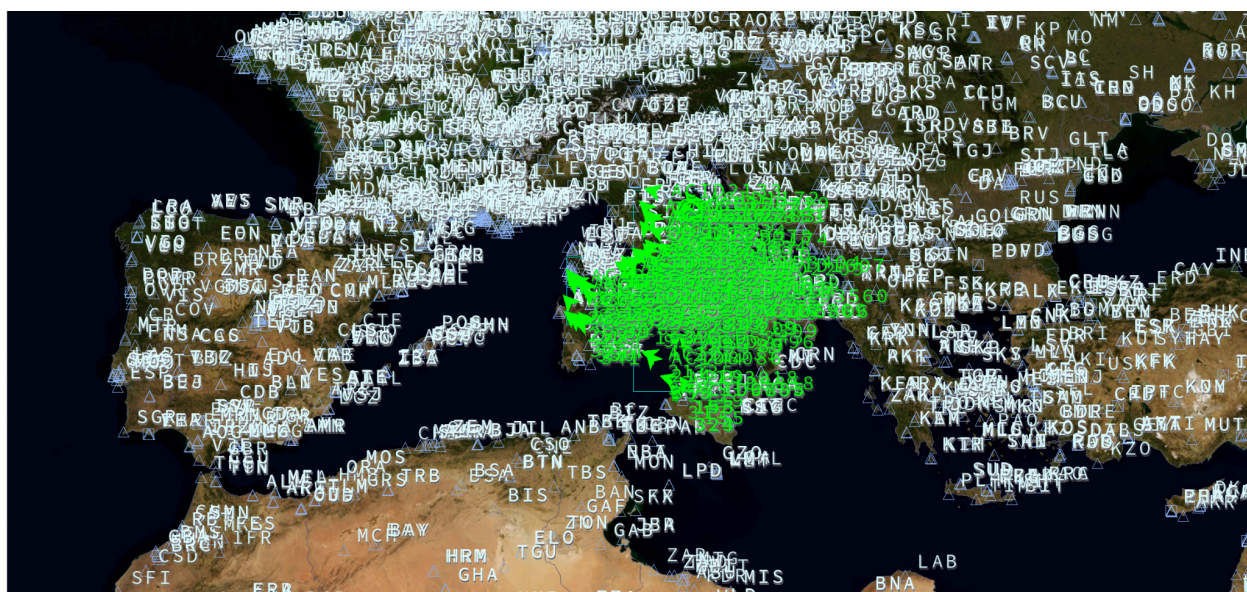


Figura 2. Mapa del tráfico aéreo simulado en Italia

Análisis y División del Espacio por Sector:

El principal objetivo es dividir una zona del espacio aéreo en cinco sectores, un sector principal y sus cuatro adyacentes, de este modo se permite analizar el nivel de ocupación de las aeronaves dentro de los sectores. Para proceder a esta división, se han tenido en cuenta las coordenadas geográficas del área de interés (sector principal), la velocidad promedio de las aeronaves, y la distancia que recorren en un tiempo definido.

Primeramente se definen las dimensiones del área total teniendo en cuenta que el programa se desarrolla en territorio italiano, estas son las coordenadas donde se encuentran los datos y se define el espacio.

- Latitud: Desde aproximadamente 35.50° hasta 47.10° .
- Longitud: Desde aproximadamente 6.60° hasta 18.50°

Para crear los sectores, es necesario que se calcule la distancia promedio que una aeronave recorrería en 30 minutos. Se ha establecido una velocidad promedio de 240 nudos que se convierte a aproximadamente 445 km/h (1 nudo ≈ 1.852 km/h)

$$240 \text{ nudos} \times 1.852 \text{ km/h} = 444.48 \text{ km/h}$$

Cálculo de la distancia recorrida en 30 minutos:

$$\text{Distancia} = \text{Velocidad} \times \text{Tiempo} = 444.48 \text{ km/h} \times 0.5 \text{ horas} \approx 222.24 \text{ km}$$

Esta distancia sirve como base para calcular las dimensiones de cada sector con el objetivo de que una aeronave pase 30 minutos dentro del sector.

Conversión de Distancia a Grados Geográficos:

La distancia recorrida se debe convertir en grados de latitud y longitud para dividir los sectores.

- Latitud: 1 grado de latitud equivale a 111 km, para encontrar la latitud media únicamente se deben sumar las dos latitudes, máxima y mínima, y dividir entre dos. Latitud media = $(35.50 + 47.10) / 2 = 41.30^{\circ}$

Teniendo en cuenta que un avión recorre 222.24 km en 30 minutos, se debe calcular cuánto representan estos km en grados de latitud y longitud.

Si un grado de latitud equivale aproximadamente a 111 km, se debe calcular cuántos grados de latitud corresponden a esta distancia .

$$\text{Grados de latitud} = (222.24 \text{ km/grado}) / (111 \text{ km}/^{\circ}) \approx 2.002^{\circ}$$

Para convertir los km en grados de longitud, primero se debe usar la misma fórmula que para la latitud pero ajustando con el coseno de la latitud media (41.30°).

$$\text{Grados de longitud} = ((222.24 \text{ km}) / (111 \text{ km/grado})) \times (\cos(41.30)) \approx 2.653^\circ$$

División del Espacio Aéreo en Sectores

La latitud en grados es de 2.002° de latitud y 2.653 de longitud en esta área específica. Para ubicar el sector principal en el centro, se debe calcular el centro de latitud y el centro de longitud.

- Centro de latitud: $(35.50^\circ + 47.1^\circ) / 2 = 41.30^\circ$
- Centro de longitud: $(6.60^\circ + 18.50^\circ) / 2 = 12.55^\circ$

A partir de las dimensiones calculadas se pueden definir las coordenadas del sector principal:

- Latitud inferior: $41.30^\circ - 1.001^\circ = 40.299^\circ$
- Latitud superior: $41.30^\circ + 1.001^\circ = 42.301^\circ$
- Longitud inferior: $12.55^\circ - 1.3265^\circ = 11.2235^\circ$
- Longitud superior: $12.55^\circ + 1.3265^\circ = 13.8765^\circ$

Sectores Adyacentes

Los sectores adyacentes son 4 y se encuentran distribuidos alrededor del sector principal, al norte, sur, este y oeste. Para definir sus bordes, únicamente se deben tomar los valores del sector principal y se suman o restan los tamaños calculados antes, 2.002° para latitud y 2.653 para longitud.

Finalmente se utiliza el término 'BOX' para definir cada uno de los sectores en BlueSky Air Traffic Simulator, el formato general de la definición 'BOX' es:

BOX nombre,lat1,lon1,lat2,lon2

Donde lat1, lon1 son las coordenadas de la esquina inferior izquierda y lat2, lon2 son las coordenadas de la esquina superior derecha de la caja.

Para los sectores definidos:

- BOX Principal,40.299,11.2235,42.301,13.8765
- BOX Norte,42.301,11.2235,44.303,13.8765
- BOX Sur,38.297,11.2235,40.299,13.8765
- BOX Este,40.299,13.8765,42.301,16.5295
- BOX Oeste,40.299,8.5705,42.301,11.2235

Filtrado y Selección de Datos para el Análisis

Para poder desarrollar este trabajo, se han utilizado datos reales extraídos de la plataforma OpenSky, esta proporciona información sobre vuelos reales. El objetivo de este filtrado, es concretar la información relevante para el estudio.

En primer lugar se han filtrado directamente del documento obtenido de OpenSky los parámetros relevantes para el análisis como son la latitud, longitud y dirección de los vuelos. El proceso de filtración es realizado utilizando python para eliminar también cualquier registro de aeronaves duplicado y así proporcionar una mayor precisión.

Al realizar esta filtración, se reduce el volumen de datos lo que permite tratar el conjunto con una mayor agilidad y facilitando el procesamiento de datos con BlueSky.

Para finalizar esta optimización de datos, se filtran nuevamente de modo que solo incluya aquellos vuelos que pasan durante su trayectoria por alguno de los cinco sectores seleccionados para el estudio.

Esta filtración mejora la eficiencia del procesamiento, además de asegurar la relevancia de los datos utilizados.

Número de Aeronaves por Sector:

Este código cuenta con la definición de las áreas geográficas sin solapamientos y a su vez contabiliza las aeronaves presentes en cada sector. Para poder contabilizar las aeronaves se utilizan las coordenadas de las aeronaves que constan de la latitud y la longitud. Como resultado proporciona la visualización del tráfico aéreo por sector. El resultado muestra la distribución del número de aeronaves en cada sector. Se observa una mayor concentración de aeronaves en el Sector Principal .

```
import os
import re

# Ruta base de los archivos
base_path = '/Users/laiacorrall/Desktop/blueskymaster/'

# Lista de sufijos de los archivos
sufijos = ['9-10', '10-11', '11-12', '12-13', '13-14', '14-15', '15-16', '16-17']

# Definir los sectores con coordenadas (formatos en latitud y longitud)
sectores = {
    'BOX Principal': (40.299, 11.2235, 42.301, 13.8765),
    'BOX Norte': (42.301, 11.2235, 44.303, 13.8765),
    'BOX Sur': (38.297, 11.2235, 40.299, 13.8765),
    'BOX Este': (40.299, 13.8765, 42.301, 16.5295),
    'BOX Oeste': (40.299, 8.5705, 42.301, 11.2235)
}

# Función para verificar si una coordenada está dentro de un sector
def esta_en_sector(lat, lon, sector):
    lat1, lon1, lat2, lon2 = sectores[sector]
    return lat1 <= lat <= lat2 and lon1 <= lon <= lon2

# Inicializa un diccionario para almacenar los conteos por sector
conteo_aeronaves_total = {sector: 0 for sector in sectores}

# Procesar cada archivo
for sufijo in sufijos:
    archivo = f'sectores-{sufijo}.scn'
    input_file = os.path.join(base_path, archivo)

    if not os.path.exists(input_file):
        print(f'Archivo no encontrado: {input_file}')
        continue

    # Contadores de aeronaves por sector
    conteo_aeronaves = {sector: 0 for sector in sectores}

    # Leer el archivo SCN
    with open(input_file, 'r') as file:
        for line in file:
            if line.startswith('00:00:00.00>CRE'):
                # Extraer datos de la línea
```

```
datos = line.strip().split()
lat = float(datos[3])
lon = float(datos[4])

# Clasificar aeronave en sector
for sector in sectores:
    if esta_en_sector(lat, lon, sector):
        conteo_aeronaves[sector] += 1
        break

# Actualizar el conteo total
for sector in sectores:
    conteo_aeronaves_total[sector] += conteo_aeronaves[sector]

# Mostrar resultados de cada archivo procesado (opcional)
print(f"\nNúmero de aeronaves en cada sector para {archivo}:")
for sector in sectores:
    print(f'{sector}: {conteo_aeronaves[sector]} aeronaves')

# Mostrar los resultados finales
print("\nNúmero de aeronaves en cada sector (ordenado):")
for sector in sorted(sectores.keys()):
    print(f'{sector}: {conteo_aeronaves_total[sector]} aeronaves')

# Mostrar número total de aeronaves
total_aeronaves = sum(conteo_aeronaves_total.values())
print(f"\nNúmero total de aeronaves en todos los sectores: {total_aeronaves}")
```

El código anterior está diseñado para poder analizar la ocupación encontrada en los sectores geográficos utilizando datos de los archivos SCN, extraídos de la web OpenSky y posteriormente filtrados.

El funcionamiento del código se consta de 6 pasos:

1. Preparación de Datos, se encarga en primer lugar de definir dónde buscar entre los archivos que contienen información de las aeronaves, ya que están guardados en una carpeta precisa. Además define una lista de sufijos para nombrar los archivos, que significan el periodo de tiempo que representan.

2. Definición de Sectores, se definen en el mapa, cada sector está delimitado por coordenadas de latitud y longitud formando un rectángulo en el mapa.
3. Supervisión de la posición, en esta función verifica si la aeronave se encuentra en un área específica comparando las coordenadas de la aeronave con las coordenadas del sector.
4. Ocupación de Aeronaves por Archivo, cada archivo abre el código y lee línea por línea, donde cada una contiene los datos sobre la posición de la aeronave que también incluyen dirección, velocidad, latitud y longitud entre otros. Una vez determinados como datos relevantes, se usa la función de verificación para determinar en qué sector se encuentra la aeronave.
5. Actualización Conteos, posteriormente a contar las aeronaves de cada archivo, se actualizan los conteos totales sumando la información del archivo actual añadido a los anteriores.
6. Resultados, impresión del número total de aeronaves en cada sector para los archivos procesados además del número total de todos los sectores juntos.

Esta información es útil para contar las aeronaves existentes en cada sector geográfico definido y actualizar la ocupación al paso de las horas, además de añadir un resumen completo de la ocupación por sector. Por tanto muestra de manera clara y precisa los resultados sobre la ocupación. Por tanto, ayuda a entender la distribución de las aeronaves en las diferentes partes del mapa y en diferentes tiempos.

```
Número de aeronaves en cada sector para sectores-9-10.scn:
BOX Principal: 60 aeronaves
BOX Norte: 24 aeronaves
BOX Sur: 15 aeronaves
BOX Este: 11 aeronaves
BOX Oeste: 14 aeronaves
```

```
Número de aeronaves en cada sector (ordenado):
BOX Este: 84 aeronaves
BOX Norte: 205 aeronaves
BOX Oeste: 112 aeronaves
BOX Principal: 387 aeronaves
BOX Sur: 71 aeronaves
```

```
Número total de aeronaves en todos los sectores: 859
```

En el anterior texto se muestra la forma en que se representa el número de aeronaves en cada sector y además añade la franja horaria en que está ocurriendo, en este caso concreto, entre las 9 y 10 AM junto con el total entre las 9 y las 17.

Este tipo de análisis son eficientes para que los controladores y los planificadores puedan prever congestiones y por lo tanto tomen decisiones previas sobre la redistribución del tráfico.

Análisis de los conflictos entre vuelos:

El programa tiene el objetivo de organizar las aeronaves de forma que se monitorea para prevenir las colisiones.

Para generar este código, se utilizan los datos de las aeronaves con sus correspondientes coordenadas. En función de estas coordenadas, se implementan códigos para establecer alertas que permitan prevenir las colisiones y gestionar el tráfico de una manera más eficaz.

Estos programas son esenciales para analizar y comprender el espacio aéreo, mejorando de este modo su gestión y reduciendo la saturación mediante técnicas que faciliten la toma de decisiones.

```
import math

# Función para calcular la distancia en kilómetros entre dos puntos geográficos
def calculate_distance(lat1, lon1, lat2, lon2):
    # Convertimos grados a radianes
    lat1 = math.radians(lat1)
    lon1 = math.radians(lon1)
    lat2 = math.radians(lat2)
    lon2 = math.radians(lon2)

    # Fórmula de la distancia en grados
    dlon = lon2 - lon1
    dlat = lat2 - lat1
    a = math.sin(dlat/2)**2 + math.cos(lat1) * math.cos(lat2) * math.sin(dlon/2)**2
    c = 2 * math.atan2(math.sqrt(a), math.sqrt(1-a))
    distance = 6371 * c # Radio promedio de la Tierra en kilómetros

    return distance
```

```

# Función para detectar conflictos entre los vuelos
def detect_conflicts(flights):
    conflicts = []

    for i in range(len(flights)):
        for j in range(i + 1, len(flights)):
            flight1 = flights[i]
            flight2 = flights[j]

            # Coordenadas y altitudes de origen y destino de cada vuelo
            lat1, lon1, alt1 = flight1['origin']
            lat2, lon2, alt2 = flight1['destination']
            lat3, lon3, alt3 = flight2['origin']
            lat4, lon4, alt4 = flight2['destination']

            # Calculamos las distancias entre los puntos de origen y destino
            dist1 = calculate_distance(lat1, lon1, lat3, lon3)
            dist2 = calculate_distance(lat1, lon1, lat4, lon4)
            dist3 = calculate_distance(lat2, lon2, lat3, lon3)
            dist4 = calculate_distance(lat2, lon2, lat4, lon4)

            # Verificamos si alguna de las distancias es menor que el umbral crítico
            critical_distance_km = 50 # Umbral crítico en kilómetros
            critical_altitude_m = 300 # Umbral crítico en metros (aproximadamente 1000
pies)

            if (dist1 < critical_distance_km and abs(alt1 - alt3) < critical_altitude_m or
                dist2 < critical_distance_km and abs(alt1 - alt4) < critical_altitude_m or
                dist3 < critical_distance_km and abs(alt2 - alt3) < critical_altitude_m or
                dist4 < critical_distance_km and abs(alt2 - alt4) < critical_altitude_m):
                conflicts.append((flight1['id'], flight2['id']))

    return conflicts

# Función para convertir el formato de cadena en un diccionario de vuelo
def parse_flight_data(flight_data):
    parts = flight_data.split()
    flight_id = parts[1]
    lat = float(parts[3])
    lon = float(parts[4])
    alt = float(parts[5])

    # Asumimos que los vuelos son de ida y vuelta en la misma posición, no tenemos
    destino real aquí
    return {
        "id": flight_id,

```

```

    "origin": [lat, lon, alt],
    "destination": [lat, lon, alt]
  }

# Lista de vuelos en formato de cadena
flight_strings = [
    "00:00:00.00>CRE 3e232e  B738 36.40 -4.23 53.9 FL306 180.0"
    "00:00:00.00>CRE 407ac6  B738 40.87 13.44 117.0 FL319 246.0",
    "00:00:00.00>CRE 4d2213  B738 49.86 7.10 306.8 FL323 115.0",
    ...
    "00:00:00.00>CRE a0fc23  B738 41.57 8.89 318.8 FL317 217.0"
]

# Agrega más registros de vuelos aquí

# Convertir la lista de cadenas a una lista de diccionarios
all_flights = [parse_flight_data(flight_str) for flight_str in flight_strings]

# Detectar conflictos entre los vuelos
flight_conflicts = detect_conflicts(all_flights)

# Mostrar los conflictos detectados
print("Conflictos detectados entre los siguientes vuelos:")
for conflict in flight_conflicts:
    print(conflict)

```

El código anterior está diseñado para detectar posibles conflictos entre vuelos en base a las posiciones y altitudes, se encuentra calculando la distancia entre dos puntos geográficos y analizando una lista con todos los vuelos.

1. Cálculo de la distancia entre puntos geográficos. Se utiliza la fórmula del Haversine, ecuación matemática utilizada para calcular la distancia entre dos puntos en la superficie de una esfera, esta considera la curvatura de la Tierra lo que la hace precisa.
2. Detección de conflictos. El código compara las posiciones y altitudes de una lista de vuelos para detectar posibles conflictos. En este caso, se define el conflicto cuando dos vuelos se encuentran relativamente cerca y sus altitudes a menos de 1000 pies (300 metros). En caso de detectarse un conflicto, se registran un par de identificadores de vuelos.

3. Conversión de datos. Se encuentra una función que permite convertir las cadenas de texto con información de vuelo en un formato estructurado, como un diccionario que incluye un identificador de vuelo y las coordenadas con su altitud correspondiente.
4. Lista de datos de vuelos. El resultado muestra la lista con los conflictos detectados entre varios vuelos, como un par de identificadores

Conflictos detectados entre los siguientes vuelos:

('4d0227', '4aca12')
 ('4d0227', '406e2e')
 ('4d0227', '300624')
 ('4d0227', '300247')
 ('4d0227', '02a1b3')
 ('4d0227', '32003e')
 ('4d0227', '4bccb5')
 ('4d0227', '344692')

.....

La detección de conflictos representa una situación donde dos aeronaves podrían encontrarse en riesgo de colisión o a una proximidad no segura según parámetros predeterminados, es por eso que al revisar estos pares, un operador podría priorizar la intervención de los vuelos que aparecen con mayor frecuencia en la lista.

Técnica Early Handover:

Los dos objetivos principales de este programa que simula la técnica de 'early handover'. El primero es distribuir los vuelos de manera eficiente para así gestionar el tráfico aéreo de una manera más eficiente, el segundo se refiere a la reducción de la carga de tráfico en áreas sobrecargadas con el objetivo de balancear el tráfico utilizando las áreas adyacentes.

Estos objetivos se consiguen mediante un código de programación, donde definen los sectores en diferentes regiones geográficas, y las adyacencias, es decir los sectores que son limítrofes y por tanto se pueden transferir las aeronaves; se proporcionan los vuelos con identificador único, coordenadas que incluyen coordenadas de latitud y longitud; se calculan las cargas o números de vuelos de cada área con el objetivo de identificar las áreas más cargadas y menos.

La función principal del código se encuentra con la determinación de Early Handover, en la que se desarrolla si se puede realizar la transferencia temprana, donde se supervisa si el vuelo está dentro de su área, si el sector principal está sobrecargado y si está libre de conflictos, si estas condiciones se cumplen se procede a sugerir la transferencia temprana del vuelo.

```
import math

aeronaves = [
    ('3e232e', 'B738', 36.40, -4.23, 53.9),
    ('407ac6', 'B738', 40.87, 13.44, 117.0),
    ('4d2213', 'B738', 49.86, 7.10, 306.8),
    .
    .
    .
]

# Lista de aeronaves en conflicto
aeronaves_en_conflicto = {
    '4d0227', '4aca12', '406e2e', '300624', '300247', '02a1b3', '32003e', '4bccb5',
    '344692', '484fde', '3994ef', '345218', '471f53', '407d10', '4076e3', '4b1809',
    '4d2027', 'aa788b', '400db4', '4ca9eb', 'aac6ee'
}

# Sectores y sus coordenadas
coordenadas_sector = {
    'BOX Principal': (40.299, 11.2235, 42.301, 13.8765),
    'BOX Norte': (42.301, 11.2235, 44.303, 13.8765),
    'BOX Sur': (38.297, 11.2235, 40.299, 13.8765),
    'BOX Este': (40.299, 13.8765, 42.301, 16.5295),
    'BOX Oeste': (40.299, 8.5705, 42.301, 11.2235)
}

# Sectores adyacentes
sectores_adyacentes = {
    'BOX Principal': ['BOX Norte', 'BOX Sur', 'BOX Este', 'BOX Oeste'],
    'BOX Norte': ['BOX Principal'],
    'BOX Sur': ['BOX Principal'],
    'BOX Este': ['BOX Principal'],
    'BOX Oeste': ['BOX Principal']
}
```

```

# Determinar el sector de una aeronave
def determinar_sector(lat, lon):
    for sector, coords in coordenadas_sector.items():
        lat1, lon1, lat2, lon2 = coords
        if lat1 <= lat <= lat2 and lon1 <= lon <= lon2:
            return sector
    return None

# Contar aeronaves en cada sector
def contar_aeronaves_por_sector(aeronaves):
    conteo_sectores = {sector: 0 for sector in coordenadas_sector}
    for aeronave in aeronaves:
        _, _, lat, lon, _ = aeronave
        sector = determinar_sector(lat, lon)
        if sector:
            conteo_sectores[sector] += 1
    return conteo_sectores

# Verificar la ocupación del sector principal
def ocupacion_sector_principal(aeronaves):
    return sum(1 for a in aeronaves if determinar_sector(a[2], a[3]) == 'BOX Principal')

# Verificar si una aeronave está en conflicto
def aeronave_en_conflicto(aeronave_id):
    return aeronave_id in aeronaves_en_conflicto

# Realizar la transferencia temprana
def realizar_transferencias(aeronaves, umbral):
    transferencias = []
    contador_transferencias = 0 # Inicializar el contador de transferencias

    while ocupacion_sector_principal(aeronaves) > umbral:
        aeronaves_a_transferir = []

        for aeronave in aeronaves[:]:
            id_aeronave, _, lat, lon, heading = aeronave
            sector_actual = determinar_sector(lat, lon)

            if sector_actual == 'BOX Principal':
                if aeronave_en_conflicto(id_aeronave):
                    continue

            if heading >= 0 and heading < 90:
                sector_destino = 'BOX Norte'
            elif heading >= 90 and heading < 180:

```

```

    sector_destino = 'BOX Este'
elif heading >= 180 and heading < 270:
    sector_destino = 'BOX Sur'
elif heading >= 270 and heading < 360:
    sector_destino = 'BOX Oeste'
else:
    continue

if sector_destino in sectores_adjacentes['BOX Principal']:
    aeronaves_a_transferir.append((aeronave, sector_destino))

# Realizar transferencias
for aeronave, sector_destino in aeronaves_a_transferir:
    if ocupacion_sector_principal(aeronaves) > umbral:
        aeronaves.remove(aeronave)
        transferencias.append((aeronave[0], sector_destino))
        contador_transferencias += 1 # Incrementar el contador de transferencias

# Salir si no hay más aeronaves para transferir
if not aeronaves_a_transferir or ocupacion_sector_principal(aeronaves) <=
umbral:
    break

return transferencias, contador_transferencias

# Imprimir el número de aeronaves en cada sector antes de transferencias
conteo_inicial = contar_aeronaves_por_sector(aeronaves)
print("Número de aeronaves en cada sector al comenzar:")
for sector, conteo in conteo_inicial.items():
    print(f"{sector}: {conteo}")

# Obtener transferencias
umbral = 40
transferencias, total_transferencias = realizar_transferencias(aeronaves, umbral)

# Imprimir el número de aeronaves en cada sector después de transferencias
# Actualizar el conteo con las transferencias
conteo_final = contar_aeronaves_por_sector(aeronaves)
conteo_final['BOX Principal'] += sum(1 for _, sector_destino in transferencias if
sector_destino == 'BOX Principal')
for _, sector_destino in transferencias:
    if sector_destino != 'BOX Principal':
        conteo_final[sector_destino] += 1

print("\nNúmero de aeronaves en cada sector después de transferencias:")
for sector, conteo in conteo_final.items():

```

```
print(f"{sector}: {conteo}")

# Mostrar resultados
print("\nTransferencias tempranas recomendadas:")
for id_aeronave, sector_destino in transferencias:
    print(f"Aeronave {id_aeronave} debería ser transferida a {sector_destino}")

print(f"\nTotal de transferencias realizadas: {total_transferencias}")
```

El anterior código calcula la dirección en la que se encuentra un punto (aeronave) con respecto a otro utilizando sus coordenadas geográficas de latitud y longitud, además se le proporciona una lista de aeronaves con sus identificadores, modelos y ubicaciones geográficas, incluyendo las direcciones de vuelo.

También se definen los datos de las aeronaves creando una lista con información, los ID de las aeronaves en conflicto previamente extraídas, los sectores predeterminados que son Principal, Norte, Sur, Este y Oeste, y los sectores adyacentes entre sí.

La determinación del sector de la aeronave, evalúa la latitud y longitud de las aeronaves para determinar a qué sector del espacio forma parte, compara las coordenadas y devuelve el sector.

El conteo de aeronaves se lleva a cabo mediante la función ‘determinar_sector’ que cuenta las aeronaves presentes en cada sector, con el objetivo de poder evaluar la carga de trabajo.

La verificación de la ocupación en el sector principal, se realiza contando las aeronaves que están en el ‘BOX Principal’, que se trata del sector más crítico de esta simulación. Es una verificación imprescindible para decidir si es necesario transferir aeronaves.

La verificación de conflictos entre aeronaves, consiste en comprobar si el ID de una aeronave se encuentra en una lista previamente determinada con el conjunto de aeronaves en conflicto.

La realización de la transferencia temprana, función más relevante dentro del código, gestiona la transferencia de las aeronaves desde el sector principal ‘BOX Principal’, a los sectores adyacentes con el objetivo de reducir la carga de trabajo en el sector.

Para poder realizar el proceso Early Handover, primeramente evalúa la ocupación de las

aeronaves en el BOX principal, seleccionando las aeronaves que no se encuentran en conflicto, además el rumbo de dichas aeronaves indica que se dirigen a un sector adyacente u otro; se procede a la transferencia de aeronaves en caso de que el BOX Principal supere el umbral predefinido que son 40 aeronaves en este caso, las aeronaves seleccionadas proceden a transferirse a los sectores adyacentes, devolviendo una lista con las transferencia realizadas y la suma de estas.

Es decir, el código finaliza con la impresión de los resultados, mostrando el número de aeronaves en cada sector previamente a la realización de las transferencias y posteriormente, mostrando las transferencias recomendadas, y finalmente el total de transferencias realizadas.

Los resultados obtenidos:

```
Número de aeronaves en cada sector al comenzar:
BOX Principal: 60
BOX Norte: 24
BOX Sur: 15
BOX Este: 11
BOX Oeste: 14

Número de aeronaves en cada sector después de transferencias:
BOX Principal: 40
BOX Norte: 26
BOX Sur: 24
BOX Este: 16
BOX Oeste: 18

Transferencias tempranas recomendadas:
Aeronave 407ac6 debería ser transferida a BOX Este
Aeronave 4d2330 debería ser transferida a BOX Norte
Aeronave 4d2280 debería ser transferida a BOX Oeste
Aeronave 344696 debería ser transferida a BOX Sur
Aeronave a88e71 debería ser transferida a BOX Este
Aeronave 4d2368 debería ser transferida a BOX Oeste
Aeronave 4bb186 debería ser transferida a BOX Sur
Aeronave 4ca758 debería ser transferida a BOX Norte
Aeronave 344693 debería ser transferida a BOX Este
Aeronave 300363 debería ser transferida a BOX Sur
Aeronave 4d21ee debería ser transferida a BOX Oeste
Aeronave 320052 debería ser transferida a BOX Este
Aeronave 4cad47 debería ser transferida a BOX Sur
Aeronave 4caa9b debería ser transferida a BOX Este
Aeronave 3003d0 debería ser transferida a BOX Oeste
Aeronave 4ca800 debería ser transferida a BOX Sur
Aeronave 440202 debería ser transferida a BOX Sur
Aeronave aa37ce debería ser transferida a BOX Sur
Aeronave 46b8a3 debería ser transferida a BOX Sur
Aeronave 346185 debería ser transferida a BOX Sur

Total de transferencias realizadas: 20
```

En los resultados se muestra la distribución inicial de las aeronaves donde se observa que el BOX Principal se encuentra sobrecargado con 60 aeronaves, superando el umbral establecido como máximo seguro de 40 aeronaves, es por eso que se justifica la necesidad de transferir aeronaves para reducir la carga.

Tras la ejecución de las transferencias, la ocupación se consigue reducir a 40 aeronaves con tal de no superar el umbral y por tanto aliviar la congestión y mejora del tráfico, esta distribución consigue equilibrar la carga entre sectores.

El resultado obtenido en la simulación refleja la gestión exitosa del tráfico aéreo, porque las transferencias tempranas surgen como técnica efectiva en el objetivo de alcanzar una distribución final de aeronaves más equilibrada y sin alcanzar niveles críticos. Este proceso da lugar a un flujo de tráfico más seguro y eficiente.

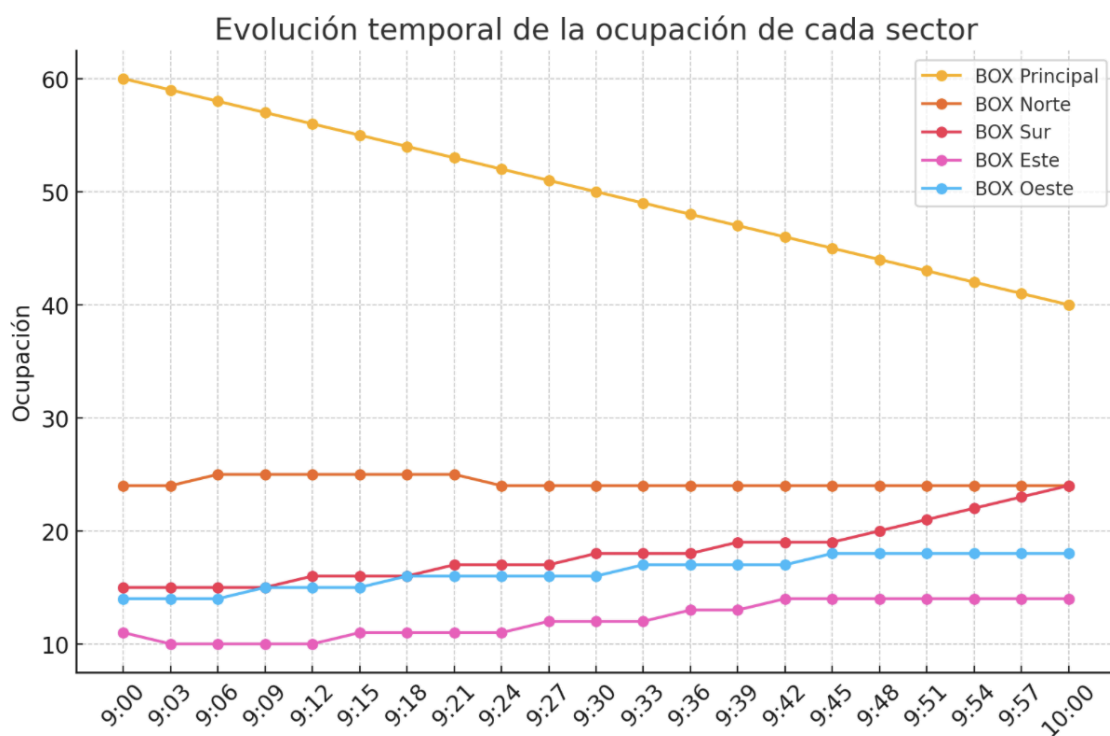


Figura 3. Gráfico de series temporales. Representación del número de aeronaves por sector

En la gráfica anterior se puede ver el resultado en la ocupación de los sectores, en una situación previa a la realización de la técnica Early Handover y su evolución.

Antes de la entrega temprana, se puede observar que el sector 'BOX Principal' tiene una concentración excesiva de aeronaves respecto al resto de sectores. Los demás sectores aunque también tienen una capacidad significativa se encuentran menos ocupados.

Durante la realización del early handover, se observa una redistribución de las aeronaves, se puede observar cómo 'BOX Principal' reduce su carga notablemente, mientras que los sectores 'BOX Norte', 'BOX Sur', 'BOX Este' y 'BOX Oeste' muestran un aumento significativo en la carga, lo que significa una distribución más equilibrada en los momentos posteriores a la transferencia.

Capítulo 5: Conclusiones

Para el desarrollo de este trabajo, se ha realizado una práctica mediante la simulación realista del espacio aéreo detallado, se ha representado la técnica de Early Handover (Entrega temprana) que consiste en anticipar el traslado de aeronaves entre sectores adyacentes con el fin de regular la carga de trabajo entre sectores y mejorar la eficiencia gestionando el espacio aéreo. Para validar estos procedimientos se han utilizado diversas herramientas desarrolladas en *Python* y el simulador *BlueSky Air Traffic*, estos han permitido extraer conclusiones acerca de la viabilidad de la técnica en la gestión del tráfico aéreo.

1. Eficiencia del Sistema de Early Handover

Esta técnica planteada, demuestra ser efectiva para mejorar la carga de trabajo entre sectores y por tanto la fluidez en el tráfico aéreo. Esta entrega anticipada a sectores adyacentes, permite al sector principal disminuir la congestión y en consecuencia reducir el tiempo de espera o retrasos en las transferencias entre sectores.

Los algoritmos aplicados permitieron identificar los momentos críticos, situaciones en las que era pertinente realizar el traspaso, con intención de evitar la saturación en sectores con alta densidad. Esta técnica también contribuye a tener una mayor previsión en la gestión del tráfico aéreo, reduciendo el riesgo de conflicto entre aeronaves y por tanto, mejorando el sistema de seguridad en la gestión del tráfico aéreo.

La implementación de esta práctica, tiene un impacto visible en la calidad del servicio, el análisis demuestra que es posible equilibrar las cargas de trabajo entre los diversos sectores. Además de ayudar a reducir el tiempo de inactividad en las áreas con una actividad menor, también alivia la sobrecarga de trabajo en sectores con alta demanda. Al poder redistribuirse de una manera más productiva, se optimiza el sistema de control del tráfico aéreo.

- Reducción de la sobrecarga en sectores clave, la redistribución de las aeronaves posteriormente al Early Handover permite aliviar las congestiones en sectores críticos, dando lugar a una mejora en la capacidad de respuesta y seguridad.
- Balance operativo mejorado, el sistema da como resultado una distribución más equilibrada de las aeronaves entre los diferentes sectores, generando así un tráfico aéreo más uniforme y fácil de manejar.
- Optimización de recursos, la implementación de esta técnica permite utilizar los recursos tanto técnicos como humanos de una manera más eficiente y minimizando los tiempos de respuesta.

2. Validez de la simulación por sectores y la detección de conflictos

La simulación se encuentra basada en la división del espacio aéreo en 5 sectores, como protagonista se encuentra el sector principal, rodeado de cuatro adyacentes, Norte, Sur, Este y Oeste. Esta división en sectores permite visualizar y obtener una imagen clara del comportamiento de las aeronaves. Los algoritmos desarrollados con Python, pueden contabilizar con precisión y representar mediante gráficos las aeronaves que se encuentran en cada sector en un intervalo de tiempo definido.

A través de algoritmos que estudian la cercanía entre aeronaves en función de coordenadas geográficas (latitud y longitud), es posible detectar los riesgos de colisión y por tanto, permite tomar decisiones para reubicar o ajustar su plan de vuelo. Esta detección de conflictos, da lugar a un avance en la gestión del tráfico aéreo ya que la detección temprana de conflictos evita incidentes y mejora la seguridad del espacio.

Estos algoritmos también permiten prever las zonas donde la densidad de las aeronaves es mayor, además en los códigos utilizados, se recopilan datos necesarios para la realización de análisis posteriores, facilitando así la toma de decisiones con información precisa y actualizada de la ocupación de los sectores.

3. Resultados de la simulación en BlueSky

El uso del simulador BlueSky permite una representación visual al detalle de los escenarios de vuelo, pese a ello cuenta con ciertas limitaciones. A pesar de sus capacidades, BlueSky muestra dificultades a la hora de procesar datos de gran volumen y en la visualización de los datos en tiempo real de las simulaciones, lo que afecta en ciertas ocasiones a la fluidez de los análisis. Sin embargo, las simulaciones representadas proporcionan datos útiles y utilizados para medir el rendimiento de la técnica de entrega temprana.

Las simulaciones permiten visualizar de manera gráfica la posición en que se encuentran las aeronaves, en este caso práctico resulta útil para observar las aeronaves que se acercan al borde de los sectores, en consecuencia se acercan a los sectores adyacentes y por tanto permiten verificar los resultados, contrastando los obtenidos en los códigos de Python y los representados en la simulación.

5.1 Limitaciones del Proyecto

A pesar de los numerosos resultados positivos obtenidos, durante la evolución del proyecto con el objetivo de llegar al modelo generado, se han encontrado numerosas limitaciones a raíz de la parte práctica en la aplicación de BlueSky para simular datos del tráfico, las cuales han limitado la precisión y eficacia en los resultados. Las limitaciones encontradas son las siguientes:

- **Recolección de datos:** durante el proceso se tuvieron en cuenta datos reales de aeronaves obtenidos de *OpenSky*. Aunque la simulación recoge la distribución de aeronaves en los sectores, la herramienta no facilita el análisis de grandes volúmenes de datos o simulaciones densamente pobladas. La simulación de escenarios con gran complejidad y cantidad de datos puede generar problemas de rendimiento en los dispositivos como lentitud o bloqueos del software.

- El modelo de simulación, incluye datos representativos pero no factores críticos como son las condiciones meteorológicas, interferencias humanas o fallos inesperados en aeronaves. Esto hace que las simulaciones no obtengan un realismo completo y distorsionen la toma de decisiones.
- La interfaz del simulador no siempre es intuitiva, esto puede provocar errores en la configuración de escenarios y, por tanto, afectar a los resultados obtenidos. En este sentido, una interfaz mejor representada podría mejorar o ayudar en la eficiencia y creación de simulaciones avanzadas.

5.2 Aplicaciones y beneficios prácticos

Los resultados obtenidos en este trabajo tienen implicaciones prácticas importantes.

Primeramente, la técnica de entrega temprana, Early Handover se presenta como un proceso para mejorar la gestión del espacio aéreo especialmente en situaciones de tráfico complejas y en congestión. La capacidad de gestionar las transferencias de aeronaves de un buen modo, puede significar una reducción notable en los retrasos, y en consecuencia una optimización en el uso del espacio aéreo.

Los estudios sobre la densidad del tráfico en sectores pueden ser útiles para controladores y planificadores del tráfico aéreo para realizar redistribuciones, evitando saturaciones y congestiones. La realización de dichos análisis puede marcar una diferencia notable en la planificación estratégica del tráfico aéreo.

Capítulo 6: Bibliografía

[1] MauroSE, «Avances tecnológicos en la industria aérea actual», *Avionpedia*, 27 de febrero de 2023.

<https://avionpedia.comnectado.com/tecnologia/avances-tecnologicos-en-la-industria-aerea-actual/> (accedido 10 de marzo de 2024).

[2] Atoca. (2023, 30 junio). *¿Es posible lograr la descarbonización del sector de la aviación?* Ideas PwC.

<https://ideas.pwc.es/archivos/20230630/es-posible-lograr-la-descarbonizacion-del-sector-de-la-aviacion/> (accedido 10 de marzo de 2024).

[3] «Air Traffic Management (ATM)».

<https://www.icao.int/safety/airnavigation/Pages/atm.aspx> (accedido 15 de marzo de 2024).

[4] F. M. Morcillo, «Airbus, innovación enfocada a la industria 5.0 y los vuelos sostenibles», 11 de febrero de 2022.

<https://es.linkedin.com/pulse/airbus-innovaci%C3%B3n-enfocada-la-industria-50-y-los-moch%C3%B3n-morcillo> (accedido 28 de marzo de 2024).

[5] «EUROCONTROL Forecast Update 2024-2030», *EUROCONTROL*,

<https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-forecast-2024-2030> (accedido 28 de marzo de 2024).

[6] *La tecnología de Indra que equipará los cazas del futuro* | indra. (s. f.).

<https://www.indracompany.com/es/blogneo/tecnologia-indra-equipara-cazas-futuro> (accedido 5 de mayo de 2024).

[7] *El sector del transporte aéreo de carga registra una subida del 3,8% en octubre.* (s. f.). Iata.

<https://www.iata.org/contentassets/fobf81afe59440069695477f04fcb094/2023-12-05-01-sp.pdf> (accedido 10 de marzo de 2024).

[8] *Daily traffic variation - states*. (s. f.).

<https://www.eurocontrol.int/Economics/DailyTrafficVariation-States.html> (accedido 10 de mayo de 2024).

[9] *Indra firma un acuerdo de colaboración con la startup Outsight para acelerar el uso de visión artificial basada en LiDAR 3D en infraestructuras inteligentes de transporte* | indra. (s. f.).

<https://www.indracompany.com/es/noticia/indra-firma-acuerdo-colaboracion-startup-outsight-acelerar-uso-vision-artificial-basada> (accedido 19 de mayo de 2024).

[10] *Espacio aéreo*. (s. f.). Seguridad Area Gob.

<https://www.seguridadaerea.gob.es/es/espacio-aereo-x> (accedido 25 de mayo de 2024).

[11] TUDelft-Cns-Atm, «GitHub - TUDelft-CNS-ATM/bluesky: The open source air traffic simulator», *GitHub*. <https://github.com/TUDelft-CNS-ATM/bluesky> (accedido 25 de mayo de 2024).

[12] «Bots | Bluesky». <https://docs.bsky.app/docs/starter-templates/bots> (accedido 28 de mayo de 2024).

[13] «BlueSky - Air Traffic Management», *Air Traffic Management*.

<https://cs.lr.tudelft.nl/atm/software/bluesky/> (accedido 28 de mayo de 2024).

[14] «bluesky | The open source air traffic simulator».

<https://kandi.openweaver.com/python/TUDelft-CNS-ATM/bluesky> (accedido 2 de junio de 2024).

[15] Martin, G., Calvet, L., & Piera, M. A. (2023). A STAM Model Based on Spatiotemporal Airspace Sector Interdependencies to Minimize Tactical Flow Management Regulations. *Aerospace*, 10(10), 847.

<https://doi.org/10.3390/aerospace10100847> (accedido 12 de junio de 2024).