

Análisis del riesgo de operación entre RPAS y aeronaves convencionales en un espacio aéreo no segregado

Avances del año 2019





HOJA DEJADA INTENCIONADAMENTE EN BLANCO

Hoja de Identificación del documento

Título:	Análisis del riesgo de operación entre RPAS y aeronaves convencionales en un espacio aéreo no segregado
Código:	
Fecha:	31.03.2020
Fichero:	

Autor:	J.A. Pérez Castán y V.F. Gómez Comendador
Institución:	Universidad Politécnica de Madrid (UPM)
Aprobado:	N.A.

Versiones:			
Numero	Fecha	Autor	Comentarios
1	31.03.2020	J.A. Pérez Castán	



HOJA DEJADA INTENCIONADAMENTE EN BLANCO

Resumen Ejecutivo

Este documento recoge la línea de investigación realizada durante el año 2019 dentro del proyecto de investigación “Análisis del riesgo entre RPAS y aeronaves convencionales en un espacio aéreo no segregado” bajo el OIDATM (Observatorio para el fomento del I+D en ATM) promovido por ISDEFE en colaboración con la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Uno de los mayores cambios que debe abordar la aviación civil en los próximos años es la integración segura de las aeronaves RPAS dentro de un entorno operativo no segregado. La operatividad de los RPAS en algunos aspectos es similar a las aeronaves comerciales actuales pero otros factores como velocidad, peso, autonomía, y estela turbulenta entre otros, difieren claramente de los modelos actuales de aeronaves. Así, el principal objetivo es valorar el riesgo que supone la operación de RPAS junto a aeronaves convencionales con el de determinar un límite operativo de seguridad que cuantifique el número de RPAS que pueden operar en un espacio aéreo y el modo en el que debería realizarse el procesamiento de planes de vuelo teniendo en cuenta la seguridad de las operaciones. Este proyecto continúa una línea de investigación que comenzó en el año 2017 y que finaliza su fase de investigación con este documento en el año 2019.

Durante el año 2019 este proyecto ha alcanzado los siguientes objetivos:

- Revisión bibliográfica de documentación relativa a métricas de riesgo en escenarios de ruta o que involucren la operación de RPAS para su aplicabilidad al sector LECMZGZ.
- Aplicación de la metodología de riesgo para el cálculo de indicadores de seguridad al volumen de espacio aéreo LECMZGZ a través del conjunto de condiciones iniciales, de contorno y variables de control definidas anteriormente.
- Realización de simulaciones de Monte Carlo según distribuciones de tráfico aleatorias y reales de aeronaves convencionales y RPAS con el fin de cuantificar un Nivel de Seguridad Objetivo (TLS) operativo del espacio aéreo en virtud de las simulaciones.
- Cuantificación de los límites operativos en cuanto al número de RPAS y aeronaves convencionales que pueden operar conjuntamente en un volumen del espacio aéreo.
- Definición del proceso de encaminamiento del plan de vuelo actual por parte del *Network Manager* (NM) así como las relaciones funcionales entre el NM y los usuarios del espacio aéreo con el objetivo de integrar operaciones con RPAS.
- Desarrollo de la metodología de riesgo para su aplicación en el proceso de encaminamiento del plan de vuelo a partir de la Herramienta para la Integración de RPAS (RIT). Esta metodología está basada en las tres fases temporales del servicio de Gestión de Afluencia y Capacidad del Tráfico Aéreo (ATFCM): estratégica, pre-táctica y táctica.
- Análisis de la viabilidad de la metodología desarrollada para el proceso de encaminamiento del plan de vuelo para la integración de RPAS mediante la aplicación a casos de estudio en volúmenes de espacio aéreo en los sectores LECMPAU y LECMZGZ.

Los principales resultados de este proyecto durante el año 2019 y en su como culminación del trabajo desde el año 2017 ha tenido dos vertientes: uno, se ha calculado un nivel de riesgo asumible para las operaciones de RPAS junto a aeronaves convencionales lo que ha permitido cuantificar el número de RPAS que pueden operar de manera segura en un determinado volumen del espacio aéreo, y dos, a



partir de la metodología de riesgo se ha podido aplicar al procesamiento de planes de vuelo para la integración de RPAS que permite al operador de RPAS conocer los pasos a realizar. Todo ello responde a los objetivos buscados en la realización del proyecto y permite determinar los primeros pasos para la integración segura de RPAS en un espacio aéreo no segregado.

I. Índice de Contenidos

1	ANTECEDENTES	26
2	INTRODUCCIÓN.....	30
3	OBJETIVOS Y ALCANCE	34
4	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	36
5	METODOLOGÍA SIMULACIONES DE MONTE CARLO	60
5.1	Definición del problema	61
5.1.1	Condiciones iniciales	62
5.1.2	Condiciones de contorno.....	63
5.1.3	VARIABLES DE CONTROL.....	63
5.1.4	Herramienta RIT de MatLab®	64
5.1.5	VARIABLES DE SALIDA	64
5.2	Caracterización del escenario	66
5.2.1	Condiciones iniciales	66
5.2.2	Condiciones de contorno.....	67
5.2.3	VARIABLES DE CONTROL.....	68
5.2.4	Simulaciones de Monte Carlo	69
5.2.5	VARIABLES DE SALIDA	70
5.3	Indicadores de seguridad	71
6	SIMULACIONES DE MONTE CARLO ALEATORIAS.....	72
6.1	Resultados de las simulaciones de Monte Carlo aleatorias	74
6.1.1	Número de conflictos (N_c).....	74
6.1.2	Tiempo de exposición (τ_{exp}).....	86
6.1.3	Tiempo medio de duración de conflictos (τ_{con}).....	89
6.2	Cuantificación del TLS.....	97
6.3	Restricciones al número de RPAS	98
7	SIMULACIONES DE MONTE CARLO REALES	104
7.1	Resultados de las simulaciones de Monte Carlo reales	107
7.1.1	Número de conflictos (N_c).....	108
7.1.2	Tiempo de exposición (τ_{exp}).....	120
7.1.3	Tiempo medio de duración de conflictos (τ_{con}).....	123
7.2	Cuantificación del TLS.....	129
7.3	Restricciones al número de RPAS	130



8	COMPARATIVA ENTRE SIMULACIONES DE MONTE CARLO	136
9	PROCESO DE ENCAMINAMIENTO DEL PLAN DE VUELO PARA RPAS	144
9.1	Descripción de los requisitos previos al Plan de Vuelo	145
9.1.1	Autorización AESA (Agencia Estatal de Seguridad Aérea)	145
9.1.2	Coordinación con terceros	147
9.1.2.1	Estudio aeronáutico de seguridad coordinado con el ATSP	147
9.1.2.2	Autorización del control de tránsito aéreo o comunicación al personal AFIS.....	147
9.1.2.3	Presentación del Plan de Vuelo para los servicios de tránsito aéreo	148
9.2	Documento de disponibilidad de rutas (RAD).....	149
9.2.1	Descripción.....	149
9.2.2	Propuesta de integración de planes de vuelo para RPAS en el RAD.....	150
9.2.2.1	Diseño de aerovías para RPAS	150
9.2.2.2	Publicación de la información para RPAS en el RAD.....	151
9.3	Herramienta para la integración de RPAS (RIT).....	152
9.3.1	Descripción del funcionamiento de la herramienta RIT	153
9.3.1.1	Elección día y hora.....	153
9.3.1.2	Elección aerovías	153
9.4	Presentación del Plan de Vuelo.....	156
9.4.1	Contenido del plan de vuelo.....	156
9.4.2	Tiempo de presentación	157
9.4.3	Dirección de envío del plan de vuelo	158
9.4.4	Redirección.....	159
9.4.5	Información para la herramienta RIT.....	159
9.5	Proceso de validación del Plan de Vuelo	161
9.5.1	Envío del mensaje <i>Flight Plan</i> (FPL).....	162
9.5.2	Respuesta del IFPS al mensaje recibido	162
9.5.3	Mensajes enviados por el operador	166
9.5.3.1	Procedimientos generales para los creadores del mensaje ante la suspensión del vuelo	167
9.5.4	Distribución de mensajes desde el IFPS.....	168
9.6	Procedimientos de corrección manual del plan de vuelo.....	169
9.6.1	Procedimiento de Corrección Estándar 1 (SCP1).....	169
9.6.2	Procedimiento de corrección estándar 2 (SCP2).....	171
9.7	Reprocesamiento del plan de vuelo	173
9.7.1	Desde 12 horas antes del EOBT a 1 hora (incluida) antes del EOBT	173
9.7.2	Desde 1 hora (no incluida) hasta el EOBT	175
9.8	Modificación del FPL a manos del ATC antes de la salida (AMOD).....	177



9.9	Mensajes enviados por la unidad ATS	178
9.9.1	AFP cuando falta un plan de vuelo	178
9.9.2	AFP para cambio de ruta	179
9.9.3	AFP para el cambio del nivel de vuelo solicitado en fase crucero	180
9.9.4	AFP para un cambio de tipo de aeronave	180
9.9.5	AFP para cambio de reglas de vuelo (IFR/VFR)	181
9.9.6	AFP para cambio de tipo de vuelo	181
9.9.7	AFP para un desvío	182
9.9.8	AFP para el cambio de equipamiento de aeronave	182
9.10	Futuros proyectos de aplicación	183
10	VALIDACIÓN DEL PROCESO DE ENCAMINAMIENTO DEL PLAN DE VUELO: CASOS DE ESTUDIO	184
10.1	Vuelo convencional de referencia	184
10.2	Introducción de un RPAS en UM601	188
10.2.1	Fase estratégica	188
10.2.2	Fase pre-táctica	188
10.2.2.1	Primera solución: Elección aerovía alternativa	189
10.2.2.2	Segunda solución: Modificación del nivel de vuelo	190
10.2.2.3	Tercera solución: Modificación horaria	190
10.2.3	Fase táctica	191
10.3	Introducción de dos RPAS por UM601	195
10.3.1	Fase estratégica	195
10.3.2	Fase pre-táctica	195
10.3.2.1	Primera solución: Elección aerovía alternativa	195
10.3.2.2	Segunda solución: Modificación del nivel de vuelo	195
10.3.2.3	Tercera solución: Modificación horaria	195
10.3.3	Fase táctica	196
10.4	Introducción de un RPAS por UM601 y otro por UN869	197
10.4.1	Fase estratégica	198
10.4.2	Fase pre-táctica	198
10.4.2.1	Primera solución: Elección aerovía alternativa	198
10.4.2.2	Segunda solución: Modificación del nivel de vuelo	199
10.4.2.3	Tercera solución: Modificación horaria	199
10.4.3	Fase táctica	199
11	CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS	204
12	PUBLICACIONES	208
13	BIBLIOGRAFÍA	210

ANEXO A. Histogramas de conflictos en las simulaciones de Monte Carlo aleatorias.....	212
ANEXO B. Cálculo de τ_{con} en las simulaciones de Monte Carlo aleatorias.....	218
ANEXO C. Histogramas de conflictos en las simulaciones de Monte Carlo reales	222
ANEXO D. Safe RPAS integration in non-segregated airspace	228
ANEXO E. How many RPAS can be safely integrated in non-segregated airspace.....	229
ANEXO F. RPAS integration in non-segregated airspace: Safety metrics for tactical planning.....	230
ANEXO G. How many RPAS can be safely integrated in non-segregated airspace?	231

II. Índice de Figuras

Ilustración 1. Características del sistema de transporte aéreo para la integración de RPAS en un espacio aéreo no segregado en ruta.	31
Ilustración 2. Sección crítica en el plano horizontal según el marco de referencia de Netjasov.	47
Ilustración 3. Trayectorias más corta y más segura dentro de un entorno operacional modelado según una distribución gaussiana de fortaleza de la señal de comunicación.	51
Ilustración 4. Distribución inicial de UAVs en el modelo de Jenie con rumbos aleatorios.	53
Ilustración 5. Evolución de trayectorias de UAVs para la evasión de conflictos según el VO-method. ..	54
Ilustración 6. Frecuencia de NMAC para UAVs según distintos casos de coordinación ATC.	55
Ilustración 7. FTA para el caso de la colisión en vuelo cuando el principal factor es un fallo del enlace C2.	58
Ilustración 8. Relación entre la probabilidad de conflicto por hora de vuelo y el porcentaje de RPAS. ..	59
Ilustración 9. Diagrama de fases del proceso.	60
Ilustración 10. Diagrama de bloques para la resolución del problema.	62
Ilustración 11. Proceso de cálculo de la Herramienta RIT de MatLab®.	64
Ilustración 12. Proceso iterativo empleado según la metodología.	66
Ilustración 13. Diagrama de fases del proceso y ubicación actual del mismo.	72
Ilustración 14. Evolución en el número de conflictos medio entre aeronaves convencionales y RPAS. 76	
Ilustración 15. Evolución en el número de conflictos medio para un número de aeronaves constante. . 79	
Ilustración 16. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 4 aeronaves convencionales aleatorias con distintos valores de RPAS.	80
Ilustración 17. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 0 aeronaves convencionales aleatorias con distintos valores de RPAS.	81
Ilustración 18. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 1 aeronave convencional aleatoria con distintos valores de RPAS.	82
Ilustración 19. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 2 aeronaves convencionales aleatorias con distintos valores de RPAS.	83
Ilustración 20. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 3 aeronaves convencionales aleatorias con distintos valores de RPAS.	84
Ilustración 21. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 5 aeronaves convencionales aleatorias con distintos valores de RPAS.	85
Ilustración 22. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 4 aeronaves constantes según distribución de tráfico aleatoria.	86
Ilustración 23. Evolución de τ_{exp} para cada configuración de aeronaves convencionales y RPAS. ...	88

Ilustración 24. Evolución de τ_{exp} para un número de aeronaves constante.....	89
Ilustración 25. τ_{con} / τ_{exp} para cada configuración de aeronaves convencionales y RPAS.....	96
Ilustración 26. Diagrama de fases del proceso y ubicación actual del mismo.	104
Ilustración 27. Evolución en el número de conflictos medio entre aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios.....	110
Ilustración 28. Evolución en el número de conflictos medio para un número de aeronaves constante en las simulaciones de Monte Carlo reales.	111
Ilustración 29. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 0 aeronaves convencionales reales con distintos valores de RPAS.	114
Ilustración 30. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 1 aeronave convencional real con distintos valores de RPAS.....	115
Ilustración 31. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 2 aeronaves convencionales reales con distintos valores de RPAS.	116
Ilustración 32. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 3 aeronaves convencionales reales con distintos valores de RPAS.	117
Ilustración 33. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 4 aeronaves convencionales reales con distintos valores de RPAS.	118
Ilustración 34. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 5 aeronaves convencionales reales con distintos valores de RPAS.	119
Ilustración 35. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 4 aeronaves constantes según distribución de tráfico real.	120
Ilustración 36. Evolución de τ_{exp} para cada configuración de aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios.....	122
Ilustración 37. Evolución de τ_{exp} para un número de aeronaves constante.....	123
Ilustración 38. τ_{con} / τ_{exp} para cada configuración de aeronaves convencionales según distribución real de tráfico y RPAS aleatorios.....	128
Ilustración 39. Comparación del indicador Nc entre los dos grupos de simulaciones.	136
Ilustración 40. Comparación de las simulaciones con conflictos para 0 y 1 aeronave convencional....	137
Ilustración 41. Comparación de las simulaciones con conflictos para 2 y 3 aeronaves convencionales.	138
Ilustración 42. Comparación de las simulaciones con conflictos para 4 y 5 aeronaves convencionales.	139
Ilustración 43. Comparación del indicador τ_{exp} entre los dos grupos de simulaciones.	140
Ilustración 44. Comparación del indicador τ_{con} entre los dos grupos de simulaciones.	140
Ilustración 45. Comparación de la relación τ_{con} / τ_{exp} entre los dos grupos de simulaciones.	141

Ilustración 46. Comparación de las restricciones a las configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS introducidas en los dos grupos de simulaciones.....	142
Ilustración 47: Diagrama de pasos a seguir para la aprobación de un plan de vuelo RPAS.	144
Ilustración 48: Diagrama de flujo del proceso de autorización para operaciones especializadas. Fuente: (Ministerio de Fomento, 2018).....	146
Ilustración 49: Información de publicación del documento RAD. Fuente: Eurocontrol.	150
Ilustración 50: Diagrama funcionamiento herramienta RIT.....	153
Ilustración 51: Visualización disponibilidad aerovías en un sector determinado.....	155
Ilustración 52: Formulario en blanco de un plan de vuelo. (ENAIRE, 2019).....	157
Ilustración 53: Diagrama de flujos del procesamiento de planes de vuelo para RPAS.	161
Ilustración 54: Proceso de los mensajes enviados al IFPS desde su envío hasta su aprobación o reprobación (EUROCONTROL, IFPS Users Manual , 2018).....	165
Ilustración 55: Diagrama de flujos del Proceso de Corrección Estándar 1. (EUROCONTROL, IFPS Users Manual , 2018).....	170
Ilustración 56: Diagrama de flujos del Proceso de Corrección Estándar 2. (EUROCONTROL, IFPS Users Manual , 2018).....	172
Ilustración 57: Reprocesamiento tipo Revalidation Suspended. (EUROCONTROL, IFPS Users Manual , 2018)	174
Ilustración 58: Reprocesamiento tipo Revalidation Advisory. (EUROCONTROL, IFPS Users Manual , 2018)	176
Ilustración 59: Vuelo realizado desde LEBB a LEBL pasando por el sector LECMZGZ. Fuente: Nest.	184
Ilustración 60: Vuelo realizado desde LEBB a LEBL pasando por el sector LECMPAU. Fuente: Nest.	185
Ilustración 61: Horas, niveles de vuelo y latitudes de paso por cada punto de notificación y sectores. Fuente: NEST.....	186
Ilustración 62: Perfil vertical del vuelo de la aeronave en función de los puntos de notificación. Fuente: NEST.....	187
Ilustración 63: Diagrama con las posibles soluciones para el plan de vuelo de RPAS.....	189
Ilustración 64: Posible opción de cambio de aerovía para el vuelo en espacio aéreo controlado de RPAS.	190
Ilustración 65: Introducción de RPAS 1 en UM601 y RPAS 2 en UN869	198
Ilustración 66. Histogramas de conflictos para 0 aeronaves convencionales aleatorias.	212
Ilustración 67. Histogramas de conflictos para 1 aeronave convencional aleatoria.....	213
Ilustración 68. Histogramas de conflictos para 2 aeronaves convencionales aleatorias.	214
Ilustración 69. Histogramas de conflictos para 3 aeronaves convencionales aleatorias.	215
Ilustración 70. Histogramas de conflictos para 4 aeronaves convencionales aleatorias.	216

Ilustración 71. Histogramas de conflictos para 5 aeronaves convencionales aleatorias.	217
Ilustración 72. Histogramas de conflictos para 0 aeronaves convencionales reales.	222
Ilustración 73. Histogramas de conflictos para 1 aeronave convencional real.....	223
Ilustración 74. Histogramas de conflictos para 2 aeronaves convencionales reales.	224
Ilustración 75. Histogramas de conflictos para 3 aeronaves convencionales reales.	225
Ilustración 76. Histogramas de conflictos para 4 aeronaves convencionales reales.	226
Ilustración 77. Histogramas de conflictos para 5 aeronaves convencionales reales.	227

III. Índice de Tablas

Tabla 1. Plantilla para la revisión bibliográfica de documentos.	38
Tabla 2. Información del primer documento revisado.	39
Tabla 3. Información del segundo documento revisado.	40
Tabla 4. Información del tercer documento revisado.	41
Tabla 5. Información del cuarto documento revisado.	42
Tabla 6. Información del quinto documento revisado.	43
Tabla 7. Información del sexto documento revisado.	44
Tabla 8. Información del séptimo documento revisado.	45
Tabla 9. Información del octavo documento revisado.	46
Tabla 10. Información del noveno documento revisado.	48
Tabla 11. Información del décimo documento revisado.	49
Tabla 12. Información del undécimo documento revisado.	50
Tabla 13. Información del duodécimo documento revisado.	52
Tabla 14. Información del decimotercer documento revisado.	55
Tabla 15. Información del decimocuarto documento revisado.	57
Tabla 16. Valores de las variables de control en las simulaciones de Monte Carlo aleatorias.	72
Tabla 17. Configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS en las simulaciones realizadas.	73
Tabla 18. Simulaciones en conflicto para la configuración de 2 aeronaves convencionales y 1 RPAS aleatorios.	74
Tabla 19. N_c para cada configuración de aeronaves convencionales y RPAS aleatorios.	75
Tabla 20. Número de simulaciones con los conflictos indicados para cada configuración de aeronaves convencionales y RPAS.	77
Tabla 21. τ_{exp} para cada configuración de aeronaves convencionales y RPAS.	87
Tabla 22. τ_{con} (s) para cada configuración de aeronaves convencionales y RPAS.	90
Tabla 23. Relación entre τ_{con} para el mismo número de aeronaves del mismo tipo.	91
Tabla 24. Relación entre τ_{con} cuando se introduce sucesivamente una aeronave convencional frente a 0 RPAS.	92
Tabla 25. Relación entre τ_{con} cuando se introduce un RPAS en programaciones exclusivamente conformadas por aeronaves convencionales.	93
Tabla 26. Relación entre τ_{con} cuando se introduce una aeronave en programaciones exclusivamente conformadas por dos aeronaves del mismo tipo.	94

Tabla 27. Valor de los indicadores de seguridad para la cuantificación del TLS en las simulaciones de Monte Carlo aleatorias.	97
Tabla 28. Restricciones a la operación de configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS según N_c	99
Tabla 29. Restricciones a la operación de configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS según τ_{exp}	100
Tabla 30. Restricciones a la operación de configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS según τ_{con}	101
Tabla 31. Configuraciones permitidas de aeronaves convencionales y RPAS según los indicadores de seguridad.	102
Tabla 32. Valores de las variables de control en las simulaciones de Monte Carlo reales.	104
Tabla 33. Distribución de tráfico el día 25 de julio de 2016 en el sector LECMZGZ.	106
Tabla 34. Distribución porcentual del tráfico el día 25 de julio de 2016 en el sector LECMZGZ.	107
Tabla 35. Simulaciones en conflicto para la configuración de 2 aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y 1 RPAS aleatorio.	108
Tabla 36. N_c para cada configuración de aeronaves convencionales reales y RPAS aleatorios.	109
Tabla 37. Número de simulaciones con los conflictos indicados para cada configuración de aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios.	111
Tabla 38. τ_{exp} para cada configuración de aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios.	121
Tabla 39. τ_{con} (s) para cada configuración de aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios.	124
Tabla 40. Relación entre τ_{con} cuando se introduce sucesivamente una aeronave convencional según distribución de tráfico real frente a 0 RPAS.	124
Tabla 41. Relación entre τ_{con} cuando se introduce un RPAS en programaciones reales con tráfico exclusivamente conformado por aeronaves convencionales.	125
Tabla 42. Relación entre τ_{con} cuando se introduce una aeronave en programaciones exclusivamente conformadas por dos aeronaves del mismo tipo.	126
Tabla 43. Valor de los indicadores de seguridad para la cuantificación del TLS en las simulaciones de Monte Carlo reales.	129
Tabla 44. Restricciones a la operación de configuraciones de aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios en función del indicador N_c	130
Tabla 45. Restricciones a la operación de configuraciones de aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios en función del indicador τ_{exp}	132
Tabla 46. Restricciones a la operación de configuraciones de aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios en función del indicador τ_{con}	133

Tabla 47. Configuraciones permitidas de aeronaves convencionales según distribución real de tráfico y RPAS aleatorios según los indicadores de seguridad.....	134
Tabla 48: Riesgo de conflicto según el nivel de vuelo y la programación horaria.....	154
Tabla 49: Direcciones AFTN y SITA.....	159
Tabla 50: Tipos de errores en los mensajes Reject.....	164
Tabla 51: Envío de ORM-s a los creadores de mensajes.	166
Tabla 52: Características del vuelo elegido desde LEBB a LEBL.	185
Tabla 53: Valores del indicador de conflicto ζ_{AWYjt} para la fase pretáctica de LECMPAU.	188
Tabla 54: Valores del indicador de conflicto $\zeta(t)$ para la fase pretáctica de LECMZGZ.	191
Tabla 55: Características escenario elegido para el vuelo desde LEBB a LEBL.....	192
Tabla 56: Horas de entrada y salida a los distintos sectores para el Caso 1.....	192
Tabla 57: Características vuelo RPAS desde LEBB hasta LEBL para el Caso 1.....	193
Tabla 58: Horas de entrada y salida a los distintos sectores para la Caso 2.....	193
Tabla 59: Características vuelo RPAS desde LEBB hasta LEBL para el Caso 2.....	194
Tabla 60: Horas de entrada y salida a los distintos sectores para el Caso 1.....	196
Tabla 61: Horas de entrada y salida a los distintos sectores para el Caso 2.....	197
Tabla 62: Horas de entrada y salida a los distintos sectores para el Caso 3.....	197
Tabla 63: Ventanas de bloqueo (seg) para dos RPAS en un mismo nivel de vuelo en el sector LECMZGZ.....	199
Tabla 64: Ventanas de bloqueo para las horas de entrada a LECMZGZ elegidas.....	200
Tabla 65: Horas de entrada de ambos RPAS para posibles planes de vuelo válidos.....	200
Tabla 66: Ventanas de bloqueo (seg) para dos RPAS y una aeronave para el nivel de vuelo 280 en el sector LECMZGZ.....	200
Tabla 67: Ventanas de bloqueo para las horas de entrada a LECMZGZ para ambos RPAS y la aeronave en el Caso 1.....	201
Tabla 68: Horas de entrada de ambos RPAS y aeronave para posibles planes de vuelo válidos de RPAS en el Caso 1.....	201
Tabla 69: Tiempos de bloqueo respecto a las horas de estudio para ambos RPAS y la aeronave en el Caso 2.....	202
Tabla 70: Horas de entrada de ambos RPAS y aeronave para posibles planes de vuelo válidos de RPAS en el Caso 2.....	202
Tabla 71. Relación entre τ_{con} cuando se introduce una aeronave convencional en programaciones exclusivamente conformadas por RPAS.	218
Tabla 72. Relación entre τ_{con} cuando se introduce sucesivamente un RPAS frente a 0 aeronaves	

convencionales.....	219
Tabla 73. Relación entre τ_{con} cuando se introduce sucesivamente una aeronave convencional frente a 1 RPAS.....	220
Tabla 74. Relación entre τ_{con} cuando se introduce sucesivamente una aeronave convencional en las configuraciones de aeronaves descritas.	221
Tabla 75. Relación entre τ_{con} cuando se introduce una aeronave en programaciones exclusivamente conformadas por dos o más aeronaves del mismo tipo.	221

IV. Abreviaturas

ACC	Area Control Center
ACH	ATC Change message
ACK	Acknowledgement message
ADES	Aerodrome of Destination
ADESOLD	Original Aerodrome of Destination
ADEXP	ATS Data Exchange Presentation
AESA	Agencia Estatal de Seguridad Aérea
AIP	Aeronautical Information Publication
AIRAC	Aeronautical Information Regulation and Control
AFIL	Air-Filed Flight Plan
AFIS	Aerodrome Flight Information Service
AFP	ATC Flight Plan Proposal
AFTN	Aeronautical Fixed Telecommunication Network
AOCC	Airline Operations Control Center
APL	ATC Flight Plan
ARO	Air Traffic Services Reporting Office
ARR	Arrival message
ATC	Air Traffic Control
ATCC	Air Traffic Control Center
ATCU	Air Traffic Control Unit
ATFM	Air Traffic Flow Management
ATM	Air Traffic Management

ATS	Air Traffic Service
ATSP	Air Traffic Service Provider
BVLOS	Beyond Visual Line of Sight
CACD	Central Airspace and Capacity Database
CCMS	Central Claim Management System
CDR	Conditional Route
CEAC	Conferencia Europea de Aviación Civil
CDM	Collaboration Decision Making
CEQPT	Radio Communication Equipment
CFMU	Central Flow Management Unit
CHG	Modification message
CHMI	Collaboration Human Machine Interface
CLS	Calculated Level of Safety
CNL	Cancel message
CNS	Communication, Navigation and Surveillance
DEP	Departure message
DLA	Delay message
DOF	Date Of Flight
EASA	European Aviation Safety Agency
ERNIP	European Route Network Improvement Plan
EFMTS	Enhanced Tactical Flow Management System
EOBD	Estimated Off-Block Date
EOBT	Estimated Off-Block Time

ETOPS	Extended Operations
EVLOS	Extended Visual Line of Sight
FAA	Federal Aviation Administration
FIR	Flight Information Region
FIZ	Flight Information Zone
FL	Nivel de Vuelo
FUA	Flexible use of Airspace
FLS	Flight Suspension message
FPL	Flight Plan message
GAT	General Air Traffic
IFP	Instrumental Flight Procedure
IFPS	Integrated Initial Flight Plan Processing
IFPU	IFPS Unit
IFPUV	IFPS test system
IFPZ	IFPS Zone
IFR	Instrumental Flight Rules
MAN	Manual message
MN	Millas Náuticas
MNPS	Minimum Navigation Performance Specifications
MTOW	Maximum Take Off Weight
NEW RTE	New Route
NM	Network Manager
OACI	Organización de Aviación Civil Internacional

OAT	Operational Air Traffic
OPS	Operational Safety
ORGN	Originator
ORM	Operational Reply Message
PBN	Performance Based Navigation
PKT	Pasajeros por Kilómetro Transportado
RAD	Route Availability Document
REJ	Reject message
RIT	RPAS Integration Tool
RMK	Remarks
RPA	Remotely Piloted Aircraft
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
RQP	Request Flight Plan message
RVSM	Reduced Vertical Separation Minimum
SAFA	Safety Assessment of Foreign Aircraft
SCP	Standard Correction Procedure
SITA	Société Internationale de Télécommunications Aéronautiques
TLS	Target Level of Safety
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UCC	Upper Control Center
UHF	Ultra High Frequency
UIR	Upper Information Region
UPM	Universidad Politécnica de Madrid



VFR

Visual Flight Rules



HOJA DEJADA INTENCIONADAMENTE EN BLANCO

V. Glosario

AWY_j	Aerovía j
AWY_j^l	Segmento l de la AWY_j
α_{jk}	Ángulo de cruce de la aerovía j con la k
β_{AWY_j}	Indicador estático de complejidad de la AWY_j
γ_{WP_i}	Indicador de complejidad del WP_i
d_{BA}	Distancia del área de bloqueo
d_{elem}	Longitud crítica elemental
d_{jk}	Longitud de la sección crítica formada en la AWY_j por su cruce con la AWY_k
δ_{AWY_j}	Indicador de ocupación de la AWY_j
ε_{WP_i}	Indicador de ocupación del WP_i
ζ_{AWY_j}	Indicador dinámico de conflicto de la AWY_j
i	Indicador de waypoint
j	Indicador de aerovía
l	Indicador de segmento de aerovía
L_{AWY_j}	Longitud de la aerovía j
η_{AWY_j}	Indicador mixto de riesgo de la AWY_j
η_{WP_i}	Indicador mixto de riesgo del WP_i
S_{min}	Separación mínima entre aeronaves
Q_{AWY_j}	Flujo de la AWY_j
$Q_{AWY_j max}$	Flujo máximo de la AWY_j
\overline{V}_{AWY_j}	Velocidad media de las aeronaves que vuelan por la AWY_j
WP_i	Waypoint i
φ_0	Ángulo inicial de la aerovía
X_0	Coordenada X inicial de la aerovía
X_{WP_i}	Coordenada X del WP_i
Y_0	Coordenada Y inicial de la aerovía
Y_{WP_i}	Coordenada Y del WP_i



HOJA DEJADA INTENCIONADAMENTE EN BLANCO

1 ANTECEDENTES

La cátedra ISDEFE sobre Gestión del Tránsito Aéreo (ATM) se propone como iniciativa de la empresa para el fomento de actividades y proyectos de investigación relacionados con la mejora y optimización de los procesos de prestación de Servicios de Tránsito Aéreo, como una de las áreas estratégicas de ISDEFE. El OIDATM (Observatorio para el fomento de I+D en ATM), promovido por ISDEFE, se plantea como Foro de referencia para fomentar las ideas y proyectos encaminados a la mejora y optimización en el uso y explotación del espacio aéreo aprovechando el desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías. La UPM y en particular el departamento SATAA colabora con el OIDATM con el objetivo de trabajar en proyectos de investigación que pretenden dar respuesta a problemas actuales y futuros sobre la gestión del tráfico y del espacio aéreo.

Dentro de la Red Horizontes, desde hace el año 2017 se está desarrollando la línea de investigación “Integración de RPAS¹ en un espacio aéreo no segregado”.

Desde la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) la línea de investigación se focalizó durante el año 2017 en la “Definición de mínimas de separación de operación de RPAS y aeronaves convencionales”. Este estudio tiene como objetivo primario determinar si las mínimas de separación actuales son válidas para su utilización de RPAS dentro de un espacio aéreo no segregado. El primer paso fue analizar las principales diferencias operativas entre RPAS y aeronaves convencionales. En base a ellas se determinaron las distancias mínimas de separación tras una revisión bibliográfica de la documentación al respecto de introducción de RPAS en espacios aéreos no segregados y la definición de su concepto operacional. Con esta información se desarrollaron algoritmos de resolución de conflictos mediante maniobras verticales con el fin de determinar el último instante en el que el Control del Tráfico Aéreo (ATC) debe actuar para evitar un conflicto entre un RPAS y una aeronave convencional (Pérez-Castán, Gómez Comendador, Rodríguez-Sanz, Arnaldo Valdés, & Torrecilla, 2018).

Una vez determinadas estas distancias en función de la geometría de conflicto, se procedió a analizar el impacto sobre la seguridad y el riesgo de conflicto que supone la integración de RPAS en conjunción con RPAS. Para ello, fueron revisados distintos modelos de riesgo que permitiesen analizar la introducción de RPAS (Pérez-Castán, Gómez Comenador, Rodríguez-Sanz, Armas Cabrera, & Torrecilla, 2019). De este modo, los Entregables presentados durante el año 2017 que abarcan estos contenidos son los siguientes:

- **Entregable 1: Análisis bibliográfico, Concepto Operacional y Modelización de la Trayectoria de Aeronave Convencional.** En este Entregable se sientan las bases de la línea de investigación. Tras la revisión de diferentes bibliografías y escenarios a considerar, se define el concepto a emplear al respecto de distancia mínima de separación. Las capacidades operativas de aeronave y RPAS son modelizadas mediante la base de datos *Base of Aircraft Data* (BADA) de Eurocontrol. En cualquier caso, la operación del RPAS siempre se desarrolla en crucero mientras que la aeronave convencional puede encontrarse también en esta configuración o en operación de ascenso o descenso (realizando cambios de niveles de vuelo, aunque sin incluir virajes).

¹ RPAS: *Remotely Piloted Aircraft System*.

- **Entregable 2: Análisis de factores para el estudio de las Distancias Mínimas de Protección.** En este Entregable se describen los factores que afectan sobre la mínima de separación. Estos hacen referencia a las Capacidades de Navegación e Intervención, así como la Exposición al Riesgo. Dentro de cada uno de ellos existen otros factores que también influyen sobre las mínimas.
- **Entregable 3: Estimación de las Distancias Mínimas de Protección para evitar conflictos entre RPAS y aeronaves convencionales.** En este Entregable se ha modelizado un algoritmo para la resolución de conflictos entre RPAS y aeronaves convencionales. Mediante el análisis de distintas geometrías de conflicto y la sensibilidad de los principales factores que afectan a la operación se ha llegado a la estimación probabilística de la Distancia Mínima de Protección (DMP). Para ello ha sido necesaria la realización de simulaciones de Monte Carlo introduciendo las variables respectivas a navegación, intervención y exposición al riesgo.
- **Entregable 4: Impacto sobre el riesgo de conflicto de la introducción de RPAS en un escenario de ruta.** En este Entregable se desarrolla una metodología de riesgo que permita analizar el impacto que supone la integración de RPAS. Para ello se caracteriza un escenario de ruta en función de las principales variables que van a afectar al riesgo de conflicto. Del análisis se va a permitir analizar el impacto que supone la integración de RPAS tanto en términos de seguridad y como de capacidad.

La implantación del modelo de riesgo proporcionó buenos resultados iniciales, pero también se detectó que su alcance era muy limitado y en algunos aspectos incompatible con el análisis de RPAS. En el año 2018 se realizó el análisis de la integración de RPAS mediante un modelo de riesgo propio que engloba tanto la fase de diseño del espacio aéreo como la fase operativa mediante una programación de aeronaves determinada. El proceso fue similar al realizado en el 2017. Primero se analizaron distintos espacios aéreos para seleccionar uno adecuado para la aplicación de la metodología. En paralelo se desarrolló una Herramienta para la Integración de RPAS (RIT) que permitiese la caracterización del espacio aéreo. La metodología se ha aplicado sobre el sector LECMZGZ, obteniéndose las restricciones o limitaciones operativas para la integración de RPAS en el mismo. De este modo, los Entregables presentados durante el año 2018 que abarcan estos contenidos son los siguientes:

- **Entregable 5: Desarrollo de un marco metodológico de evaluación de riesgo para la integración de RPAS.** Este Entregable identifica los principales parámetros operativos que afectan a la operación de los agentes involucrados (aeronaves convencionales y RPAS) dentro de un escenario (rutas, cruces, densidades de tráfico, etc.). En base a ellos se han definido una serie de indicadores operativos que permitan evaluar el estado del espacio aéreo en dos fases diferenciadas: de diseño y operativa. Estas dos fases constituyen una nueva metodología de riesgo que supone el marco para la introducción de restricciones a la libre operación de RPAS dentro de un espacio aéreo.
- **Entregable 6: Integración de RPAS en Fase de Diseño del espacio aéreo – Desarrollo de una Herramienta para la Integración de RPAS (RIT) en un escenario de ruta.** Este Entregable contempla, en primera instancia, la selección de un escenario de ruta adecuado sobre el cual aplicar la metodología anteriormente desarrollada. El sector escogido, LECMZGZ, se caracteriza en términos físicos y operativos para conocer en detalle desde su configuración de rutas hasta

la distribución de los flujos de aeronaves convencionales. Mediante una herramienta RIT desarrollada en Matlab® se calculan los indicadores operativos de este espacio aéreo en su Fase de Diseño.

- **Entregable 7: Integración de RPAS en Fase Operativa del espacio aéreo – Aplicación de una Herramienta para la Integración de RPAS (RIT) en un escenario de ruta.** Este Entregable supone la aplicación completa de la metodología sobre el sector LECMZGZ puesto que en él se realizan ahora los cálculos de la Fase Operativa. Tras el análisis de una programación real de aeronaves convencionales, se procede a la simulación de RPAS dentro del escenario. Esto va a permitir conocer los lugares e intervalos de tiempo donde llevar a cabo la integración segura de RPAS. Del mismo modo, se establecen las limitaciones o restricciones para la operación conforme a esos datos.
- **Entregable 8: Análisis dinámico de la disponibilidad del espacio aéreo y aplicación de la Fase Táctica en un escenario de ruta.** Este Entregable tiene como objetivo determinar cuáles son los intervalos horarios en los cuales deben operar los RPAS en un espacio aéreo sin que supongan un impacto sobre la seguridad de las operaciones. Para ello es necesario continuar con la aplicación de la metodología planteada en el Entregable 5.

Finalmente, durante el año 2019 se ha concluido el proyecto de investigación para la integración de RPAS en un espacio aéreo de ruta no segregado. A partir de la metodología de riesgo desarrollada en el Entregable 5, se ha cuantificado el número de RPAS y aeronaves que pueden operar conjuntamente en un volumen del espacio aéreo. Además, una vez determinado el número de RPAS que se pueden introducir de manera segura se ha desarrollado el proceso de encaminamiento del plan de vuelo para la integración de RPAS. Sacando ventaja de la herramienta RIT y de la metodología de riesgo, se ha conseguido determinar cuáles son las restricciones geográficas y temporales que aplican a un plan de vuelo de RPAS y como se deben construir las relaciones funcionales entre el *Network Manager* (NM), la documentación disponible para los usuarios del espacio aéreo y los periodos temporales en los que se debe presentar el plan de vuelo del operador RPAS. De este modo, los Entregables presentados durante el año 2019 que abarcan estos contenidos son los siguientes:

- **Entregable 9: Cuantificación del TLS operativo para la integración de RPAS en un espacio aéreo no segregado de ruta.** Este Entregable tiene como objetivo establecer restricciones a la operación de aeronaves convencionales y RPAS en un espacio aéreo para su hora pico de operación. De este modo, puede garantizarse que las operaciones se desarrollan de manera segura conforme al valor de un *Target Level of Safety* (TLS) previamente determinado.
- **Entregable 10: Proceso de encaminamiento del plan de vuelo para RPAS.** Este Entregable tiene como objetivo determinar cuál es el procedimiento que conlleva el encaminamiento de plan de vuelo en Europa dentro del servicio ATFCM² para la posible introducción de RPAS en espacio aéreo superior.
- **Entregable 11: Aplicación de la metodología de riesgo para el encaminamiento del plan de vuelo de RPAS.** Este es el último Entregable que se realiza durante este proyecto puesto que representa la culminación del mismo. Los resultados presentados confirman la viabilidad del uso

² ATFCM: Air Traffic Flow and Capacity Management



de la herramienta RIT y su uso para establecer las relaciones funcionales entre el operador del RPAS y del NM.

Todos estos documentos se encuentran disponibles en la página web de ISDEFE, accediendo con el siguiente url: <http://www.horizontesnavegacionatm.net/>

2 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, uno de los sectores que más está destacando en el ámbito de la aviación es el de los dispositivos pilotados en remoto, coloquialmente conocidos como 'drones'. Sobre este mercado, el cual se encuentra aún en sus primeras fases de desarrollo, están promoviéndose potentes inversiones tanto desde la administración pública como por parte de organismos militares. El enfoque adquirido desde el grupo es mayoritariamente comercial mientras que la aplicación bélica centra los esfuerzos desde años atrás.

Tomando como ejemplo el sistema de transporte aéreo van a sentarse las bases sobre las cuales se justifica el tema escogido para el estudio, así como la motivación del mismo. Se considera al sistema de transporte aéreo como un 'gran sistema' cuyos componentes principales serían un vehículo, su operador, la infraestructura dentro de la cual desarrollan sus actividades aéreas bajo una determinada normativa y legislación. Debido a diferentes consideraciones, los RPAS introducen particularidades a detallar dentro de cada una de las mencionadas categorías. De este modo y, a lo largo del apartado en curso, se pretende argumentar todas ellas con los motivos conducentes al estudio de la integración de RPAS en espacios aéreos no segregados.

Así, uno de los mayores cambios que debe abordar la aviación civil en los próximos años es la integración segura de las aeronaves RPAS dentro de un entorno operativo no segregado. La operatividad de los RPAS en algunos aspectos es similar a las aeronaves convencionales actuales pero otros factores como velocidad, peso, autonomía, o estela turbulenta entre otros, difieren claramente de los modelos actuales de aeronaves. De este modo, el riesgo que supone la operación de un sistema RPAS junto aeronaves convencionales debe ser analizado en profundidad y teniendo en cuenta todas las posibles características técnicas y operativas de los RPAS.

En primer lugar, se propone esgrimir las razones debido a las cuales se han seleccionado los RPAS como el vehículo mediante el cual desarrollar las operaciones aéreas en la investigación. El mercado está propiciando numerosas oportunidades de negocio tanto en entornos urbanos como aplicadas a líneas de desarrollo ya existentes, pero disminuyendo la contribución del factor humano. A este respecto, se comentan por separado relativo al operador ciertas singularidades en la redacción posterior durante la presente introducción. En función del tipo de operación desempeñada por el RPAS, su homologación y características técnicas, éstos presentan notables diferencias dependiendo de su tamaño. Así, pueden destacarse dos grandes grupos en los cuales dividir los RPAS de acuerdo a su tamaño y operatividad:

- RPAS pequeños: accesibles al gran público a precios asequibles, no requiriendo de una habilitación como piloto para su vuelo, son empleados mayoritariamente en actividades de ocio, aunque pueden vulnerar la intimidad de las personas. Su integridad física también resulta comprometida en caso del uso del sistema en entornos urbanos o, como recientemente, cerca de grandes aeropuertos europeos y españoles provocando el cierre temporal de su espacio aéreo. La notoria amenaza que suponen y la incertidumbre general en torno a su operación conducen a descartar esta categoría para el estudio, inclinándose el autor por la siguiente.
- RPAS grandes: específicos y certificados para operaciones aéreas de envergadura, cuyo operador precisa de la pertinente habilitación para el desarrollo de actividades comerciales o especializadas. La dimensión y capacidades de los vehículos incluidos en esta categoría se asemeja más a grandes aeronaves tripuladas que, por ejemplo, al gran espectro de cuadricópteros que conforman el punto previo. Para la modelización del RPA se ha escogido una

aeronave del tipo MALE3 (ver Ilustración 1) la cual pueda desarrollar operaciones aéreas en crucero en el espacio aéreo superior, evitando así los posibles problemas anteriormente deducidos y evaluando su posible integración.

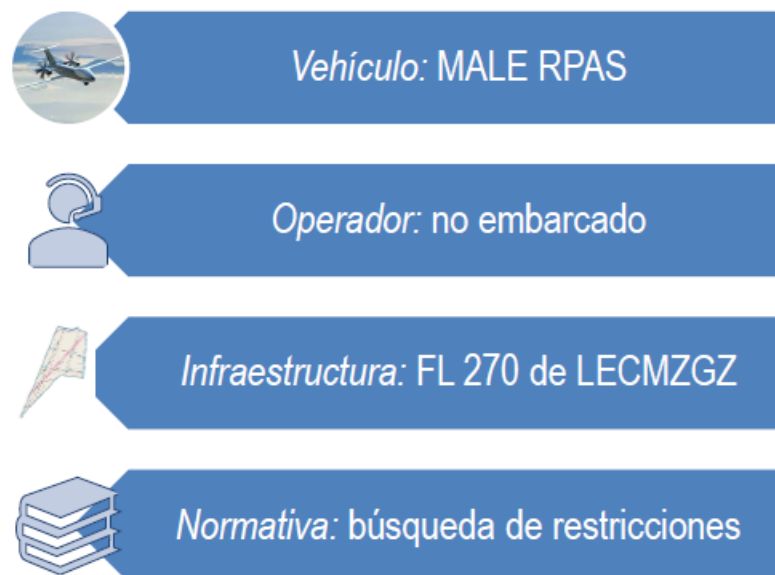


Ilustración 1. Características del sistema de transporte aéreo para la integración de RPAS en un espacio aéreo no segregado en ruta.

A continuación, se complementa la anterior información al respecto del vehículo con el operador que posibilita la operación dentro del sistema de transporte aéreo. A diferencia de las aeronaves convencionales, el piloto del RPAS no se encuentra embarcado en la aeronave, lo cual supone una amenaza sobre, por ejemplo, la aplicación de procedimientos ATC. Conforme a la operación deseada del RPAS MALE (crucero en ruta), conviene apuntar que en su mayoría ésta va a desarrollarse fuera del alcance visual del operador (BVLOS). De esta manera, la intercomunicación entre sistemas terrestres, embarcados y espaciales (todos ellos como parte de la infraestructura) adopta un papel trascendental en la resolución del problema planteado. En último término, se hace preciso remarcar la necesidad de la formación del piloto para la obtención de la homologación pertinente y el correcto desempeño en el entorno operacional.

Ahora, en tercer lugar, se comenta la importancia de la infraestructura en torno al sistema de transporte aéreo en el cual se espera que el RPAS realice sus operaciones. A día de hoy y, pese a los esfuerzos realizados fruto de la colaboración entre socios europeos (como el concepto U-space) para la integración de todo tipo de aeronaves en el heterogéneo espacio aéreo actual, la realidad dista todavía mucho de una posible convivencia segura entre cualquier tipo de tráfico. De aquí surge la motivación del trabajo, con la intención de evaluar la viabilidad en la introducción de RPAS en espacios aéreos no segregados de ruta y, si fuera posible, la determinación de un límite cuantitativo a los mismos en su operación coordinada con las aeronaves convencionales. Al respecto de la infraestructura pueden estudiarse tres subcategorías:

1. Terrestre: la cual incluye componentes tanto aeroportuarios como a nivel de sistemas. Respecto a este punto, los RPAS pueden hacer uso tanto de los aeropuertos existentes como de los

- sistemas de Comunicaciones, Navegación y Vigilancia para el desarrollo de sus operaciones.
2. Espacial: la cual incluye nuevos sistemas de comunicación entre vehículo y operador. Respecto a este punto, se hace trascendental la implementación segura de la mencionada tecnología para la correcta operación BVLOS, como se ha comentado anteriormente.
 3. Aérea: la cual incluye volúmenes de espacio aéreo y rutas a lo largo de los mismos. Respecto a este punto, ya se han establecido antecedentes para fijar el objetivo del estudio lejos de aquellas capas más bajas de la atmósfera las cuales suponen graves amenazas.

En última instancia, se completa la caracterización de este particular sistema de transporte aéreo remitiendo a la normativa y legislación en vigor. Como ya ocurriese en los albores de la aviación, no se está logrando un consenso internacional en materia de RPAS el cual debiera venir abanderado por OACI. No obstante, sí se está llevando a cabo un empeño comunitario desde la Unión Europea por estandarizar la definición y operativa de RPAS en torno a los Reglamentos 2019/945 y 2019/947. A nivel nacional, se está redactando en la actualidad un futuro Real Decreto que sustituya al Real Decreto 1180/2018 y que incluya un apartado sobre zonificación para la operación segregada de RPAS. No es objetivo de este Trabajo Fin de Máster la segregación en la operativa de RPAS sino su integración en espacios aéreos ya existentes, como es el caso de LECMZGZ. Llegado el caso y, una vez analizado el estado de seguridad del sector, puede plantearse la búsqueda de restricciones a la operación de RPAS en el espacio aéreo no segregado de ruta.



HOJA DEJADA INTENCIONADAMENTE EN BLANCO

3 OBJETIVOS Y ALCANCE

La finalidad de este proyecto es evaluar cómo debe realizarse la introducción segura de RPAS en un espacio aéreo no segregado. Para ello es necesario analizar cómo afecta la integración de RPAS sobre la seguridad operacional con el fin de obtener una serie de restricciones a la libre introducción de los mismos.

Los objetivos principales de este proyecto son:

- Emplear modelos de riesgo para analizar el impacto que supone la integración de RPAS en un escenario de ruta.
- Desarrollar una herramienta para la integración de RPAS (RIT) que permita analizar un escenario de ruta con RPAS.
- Desarrollar una metodología para el proceso de encaminamiento del plan de vuelo para los operadores de RPAS dentro del servicio ATFCM de acuerdo con los procedimientos actuales.

Además, los sub-objetivos alcanzados mediante la realización del mismo son los siguientes:

- Realizar una revisión bibliográfica en búsqueda de métricas de riesgo aplicables al espacio aéreo.
- Definir, caracterizar y modelizar los parámetros operativos que afectan y los indicadores operativos que permitan la operación de los RPAS en un escenario de ruta mediante la cuantificación de un TLS.
- Determinar las relaciones funcionales entre el NM y el operador de RPAS para la integración de sus planes de vuelo en los distintos horizontes temporales del servicio ATFCM.
- Analizar la viabilidad de la metodología propuesta junto a la herramienta RIT mediante casos de estudio con RPAS. El resultado será la descripción del proceso temporal de las comunicaciones y la información a presentar por parte del operador RPAS y las restricciones geográficas (aerovías y corredores aéreos) y temporales (programación y horas de despegue) a la introducción de planes de vuelo por parte del NM.

Por último, este documento se divide en las siguientes secciones:

- **Sección 1: Antecedentes.** Esta sección enmarca el trabajo realizado durante el año 2017 y 2018 dentro de las líneas de investigación del OIATM.
- **Sección 2: Introducción.** Esta sección introduce y enmarca el objetivo del proyecto relacionado con la integración de RPAS.
- **Sección 3: Objetivos y alcance.** Esta sección define y caracteriza los principales objetivos del trabajo, así como el alcance del mismo.
- **Sección 4: Revisión Bibliográfica.** Esta sección expone las métricas de riesgo y su aplicabilidad al problema propio obtenidas de la lectura de artículos de investigación y documentos de conferencias.
- **Sección 5: Metodología de simulaciones de Monte Carlo.** Esta sección presenta el modelo de riesgo desarrollado y como se deben desarrollar las simulaciones de Monte Carlo en el trabajo a través de las condiciones y variables que sobre él aplican.

- **Sección 6: Simulaciones de Monte Carlo aleatorias.** Esta sección presenta las variables de control empleadas y los resultados obtenidos de simular aeronaves convencionales y RPAS según distribuciones de tráfico aleatorias.
- **Sección 7: Simulaciones de Monte Carlo reales.** Esta sección presenta las variables de control empleadas y los resultados obtenidos de simular aeronaves convencionales según distribuciones de tráfico reales y RPAS según distribuciones de tráfico aleatorias.
- **Sección 8: Comparativa entre simulaciones de Monte Carlo.** Esta sección contrasta los dos grupos de simulaciones realizadas para determinar un TLS global en el espacio aéreo.
- **Sección 9: Proceso de encaminamiento del plan de vuelo para RPAS.** Esta sección describe el proceso de encaminamiento del plan de vuelo a implementar por un RPAS a partir del proceso actual para aeronaves convencionales.
- **Sección 10: Validación del proceso de encaminamiento del plan de vuelo: casos de estudio.** Esta sección presenta los casos de estudio que se han utilizado para validar como se debería realizar la presentación de planes de vuelo para el operador de RPAS y las comunicaciones con el NM.
- **Sección 13: Conclusiones y Futuros trabajos.** Esta sección resume las principales conclusiones alcanzadas durante este trabajo y sus futuras líneas de investigación.

Los recursos informáticos empleados para la simulación de trayectorias de aeronaves convencionales y RPAS tienen su fundamento en una herramienta MatLab®. Ésta ha sido desarrollada para el cumplimiento de las necesidades del estudio a través del conjunto de variables con las cuales es modelizado el espacio aéreo.

Por último, se han incluido las publicaciones en revistas y conferencias científicas que han dado lugar con la realización de este proyecto durante el año 2019.

4 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Numerosos estudios han versado sobre el riesgo operacional de aeronaves en un determinado espacio aéreo. Los primeros trabajos se desarrollaron en torno al riesgo de colisión y, con el paso de los años, se han considerado otros contenidos como el riesgo de conflicto. De igual manera, muchos años atrás ni siquiera existía la idea de aeronaves pilotadas en remoto, los RPAS. Por tanto, las consideraciones al respecto de sus características operacionales particulares no tenían cabida en las líneas de investigación propuestas. La evolución tecnológica y del espacio aéreo ha dado lugar a un nuevo panorama del tráfico aéreo que resulta de obligado análisis para garantizar la seguridad de todas las aeronaves involucradas en el mismo.

El objetivo de este proyecto es cuantificar el TLS operativo de un espacio aéreo para la integración de RPAS en ruta. Dicha cuantificación espera realizarse respecto a la variable riesgo de conflicto, por lo cual, la selección de los documentos a revisar parte de este supuesto. De igual manera, el escenario de referencia considerado (LECMZGZ) comprende la fase de ruta por lo que van a tratar de incorporarse trabajos que cumpla esta característica. En último término, se busca la integración de RPAS en el mencionado escenario. Para ello, se hace precisa la selección de los documentos más actuales y que incluyan dichos contenidos en los análisis realizados.

A grandes rasgos, los datos más representativos que se analizan durante la revisión bibliográfica son los anteriormente presentados. No obstante, no constituyen la única información que se pretende extraer del análisis. Existe un conjunto de parámetros técnicos con influencia directa sobre la operación de aeronaves y el estado de espacio aéreo que es conveniente analizar. De esta manera, las principales características que se busca conocer de la revisión bibliográfica de las distintas líneas de investigación analizadas son las siguientes:

- **Título del documento:** donde se destaca el nombre completo de la publicación, con su referencia, para un adecuado seguimiento de la misma a través de sus palabras clave.
- **Autor(es):** en paralelo al título del documento se incluye la información de aquellos que han participado en su redacción para una completa referenciación del estudio. En caso de resultar elaborado por una organización internacional véase, OACI, este apartado se deja en blanco.
- **Organización:** es especificada la procedencia o relación de el/los autor/es con el organismo promotor de la investigación, bien se trate de una entidad pública o privada.
- **Objetivo:** se resume brevemente la finalidad de la línea de investigación completa, no exclusivamente del documento analizado durante la revisión bibliográfica.
- **Descripción:** se detalla la información contenida en cada uno de los artículos de investigación consultados. Ello pasa por la extracción de las metodologías empleadas o los parámetros en ellas involucradas. En este punto cabe la inclusión de tablas o figuras explicativas de cada modelo para apoyar la información analizada.
- **Aeronave de estudio:** se especifica si la aeronave de estudio es del tipo convencional, RPAS o una mezcla de ambas. Los datos de este apartado son trascendentales dado que el RPAS de la línea de investigación particular está modelizado para el desarrollo de operaciones en el espacio aéreo superior. Se buscan, pues, referencias apropiadas entre las distintas líneas de investigación. En caso de disponer del modelo de aeronave en concreto o del programa utilizado para su caracterización física y operativa, también es incluida esta información.

- **FL de estudio:** se incluye la información del plano o volumen de espacio aéreo que centra cada investigación en caso de ser conocidas. Esta información es de elevada importancia puesto que el objetivo del proyecto propio es un escenario de ruta sin afección de aeronaves en evolución.
- **Escenario:** en relación a la variable anterior, también se destaca si el espacio aéreo es real o ficticio. El caso particular sobre LECMZGZ es real, por ejemplo, mientras que la generación de trayectorias sobre un paralelepípedo generado aleatoriamente sería un escenario ficticio.
- **Simulaciones realizadas:** como se ha comentado en el apartado anterior, es objetivo de este trabajo la realización de simulaciones de Monte Carlo para la obtención de múltiples casos de estudio. Respecto a la documentación revisada se indica el proceso seguido en la simulación, así como el software informático empleado para las mismas, en caso de conocerse.
- **Errores de vuelo:** se recoge la información referente a si en el proyecto analizado se han introducido errores de posicionamiento, o no, en la caracterización del problema. Esta información es importante para la generación de trayectorias de tráfico y el cálculo de posibles conflictos.
- **Probabilista o determinista:** se especifica si es considerada incertidumbre en las variables que integran la metodología de la documentación estudiada. En principio y, para el caso particular, no es considerado un análisis probabilista sobre LECMZGZ por las dificultades de cálculo que introduce.
- **Métricas de riesgo:** en este apartado se incluyen, de manera diferenciada respecto a la descripción, las métricas que aplican sobre las aeronaves de las simulaciones realizadas. Se busca conocer el TLS considerado según cada estudio y si alguno de ellos resulta de aplicabilidad en el espacio aéreo propio. Fundamentalmente van a encontrarse dos grandes grupos los cuales hacen referencia bien a riesgo de conflicto, bien a riesgo de colisión.
- **Conclusiones:** más allá de la metodología y métricas de riesgo empleadas por los autores en sus investigaciones, se contrastan los resultados obtenidos con los objetivos iniciales. Así, para cada uno de los artículos se acepta o rechaza el modelo para la posible transposición de sus características sobre el escenario particular.

Todas las características anteriormente comentadas se incluyen dentro de una tabla para una mayor facilidad en la comparación entre documentos. De esta manera, se genera una plantilla la cual cumplimentar con la información extraída de cada uno de los artículos. En el caso de no ser especificada, o bien, no corresponderse la documentación con los requisitos pedidos, dicha casilla de datos se mantiene intencionadamente en blanco. Así, un ejemplo de la plantilla utilizada para la revisión bibliográfica de documentos puede verse en la Tabla 1.

Tabla 1. Plantilla para la revisión bibliográfica de documentos.

Título del documento					
Autor(es)					
Organización					
Objetivo	-				
Descripción	-				
Aeronave de estudio	-	FL de estudio	-	Escenario	-
Simulaciones realizadas	-	Errores de vuelo	-	Probabilista/ determinista	-
Métricas de riesgo	-				
Conclusiones	-				

Una vez conocidos los parámetros de interés que se busca localizar en la documentación, así como el marco de referencia donde introducir la información, se procede a la realización de la revisión bibliográfica. En total, 14 documentos entre manuales, libros, tesis, artículos de investigación o textos de conferencias han sido analizados. La información extraída al respecto de los mismos se incluye, según el formato previamente especificado de la Tabla 2 a la 15

Tabla 2. Información del primer documento revisado.

A review of research on risk and safety modelling in civil aviation (2)					
Fedja Netjasov, Milan Janic					
OTB Research Institute, Delft University of Technology					
Objetivo	Repasar los distintos modelos de riesgo aplicados en el ámbito de la aviación civil. Describir conceptos y definiciones básicas al respecto de seguridad, riesgo y su evaluación.				
Descripción	<p>Durante este artículo se revisan distintos riesgos que afectan al campo del transporte aéreo tales como al individuo, estadístico de ocurrencia, riesgo estimado y percibido. A su vez, dichos riesgos se estudian en cuatro categorías distintas, según el modelo desarrollado: causal, de riesgo de colisión, de error del factor humano y de riesgo a terceros. A continuación, se describen los modelos más apropiados en términos de parámetros para el estudio futuro:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modelos causales: FTA, ETA, Bow-Tie, CCA, TOPAZ, BBN. • Modelos de riesgo de colisión: Reich-Marks, Machol-Reich (incluye las métricas de número de accidentes por colisión lateral en torno a 0,1 por 10⁷ horas voladas y de riesgo de colisión entre aeronaves debido a pérdida de separación prevista de 1 accidente cada 10⁷ horas voladas), modelo geométrico y generalizado de Reich (TOPAZ). • Modelos de error humano: HAZOP, HEART, TRACER, HERA (EUROCONTROL) y HFACS. • Modelos de riesgo a terceros: US-NTSB (1,3 x 10⁻⁸ es la probabilidad de deceso por accidente de aviación en las inmediaciones de un aeropuerto, descendiendo conforme la distancia al aeropuerto aumenta), Países Bajos (relaciona el número de víctimas con la frecuencia de su ocurrencia por año, en relación inversa), Reino Unido (riesgo inferior a 10⁻⁴, aceptable). 				
Aeronave de estudio	-	FL de estudio	-	Escenario	-
Simulaciones realizadas	-	Errores de vuelo	-	Probabilista/determinista	-
Métricas de riesgo	Accidentes por hora de vuelo (1 x 10 ⁻⁷).				
Conclusiones	Ofrece una vista general de los posibles modelos a utilizar, describiendo las principales características que definen cada metodología.				

Tabla 3. Información del segundo documento revisado.

Manual on airspace planning methodology for the determination of separation minima (3)					
-					
International Civil Aviation Organization					
Objetivo	Desarrollar de un marco de referencia para la evaluación de las necesidades y condiciones de aplicación de una nueva metodología para la determinación de separaciones mínimas.				
Descripción	<p>Los parámetros que quedan intrínsecamente relacionados a la metodología de estudio del espacio aéreo son: geometría del mismo, flujos de tráfico aéreo, mínimas de separación, actuación de los Servicios de Tránsito Aéreo (ATS) y TLS. En ninguno de los casos la determinación de un TLS es objetivo del estudio, sino que supone un valor conocido dentro de la metodología, lo cual genera un condicionante de cara al desarrollo del modelo propio.</p> <p>El primer paso es definir el sistema actual, con sus sistemas CNS/ATM para, seguidamente, determinar el sistema propuesto. Este sistema debe traer asociado un método de evaluación de su seguridad que lo compare con un sistema de referencia. El proceso de evaluación de seguridad comprende múltiples etapas, entre las cuales se encuentran: establecer el criterio de evaluación, identificar los peligros (en frecuencia y modelarlos), estimar los riesgos y evaluar su posible afección respecto al criterio fijado. En caso de ser superior deben fijarse medidas de reducción del riesgo. En caso de ser inferior el sistema propuesto se implementa y vigila para que los riesgos cumplan el criterio establecido.</p> <p>Durante el primer apéndice al manual se desarrolla un modelo para la evaluación del riesgo de colisión que incluye parámetros tales como errores de navegación o capacidad tanto de los Servicios ATS como de la aviónica embarcada en la aeronave.</p>				
Aeronave de estudio	-	FL de estudio	-	Escenario	-
Simulaciones realizadas	-	Errores de vuelo	-	Probabilista/determinista	-
Métricas de riesgo	Accidentes por hora de vuelo ($2,5 \times 10^{-9}$).				
Conclusiones	Establece el marco normativo y la secuencia de procesos a llevar a cabo para la mejora o el desarrollo de nuevos métodos para la determinación de separaciones mínimas en espacios aéreos controlados.				

Tabla 4. Información del tercer documento revisado.

Three-dimensional conflict count models for unstructured and layered airspace designs (4)					
Emmanuel Sunil, Joost Ellerbroek, Jacco M. Hoekstra, Jerom Maas					
Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology					
Objetivo	Desarrollar modelos analíticos que describan la seguridad de espacios aéreos de ruta no estructurados o estructurados por capas.				
Descripción	<p>Es importante la correcta definición del concepto de espacio aéreo pues el primero de ellos hace referencia a los FRAs (Free Route Airspaces) mientras que el segundo segrega la operación de las aeronaves por niveles en función de su derrota. Igualmente, los conflictos vienen definidos como <i>futuras</i> intrusiones y no como tangencia de volúmenes críticos. La expresión que los relaciona es la siguiente:</p> $\begin{aligned} & \text{Número de conflictos instantáneos} \\ & = \text{Combinaciones de pares de aeronaves} \\ & \times \text{Probabilidad media de conflicto entre ellas} \end{aligned}$ <p>Un entorno segregado por rumbos (L45) resulta más seguro que un FRA, más en tanto el número de capas disponibles para la operación. Los principales beneficios se orientan a las aeronaves en crucero, por lo que su lectura se hace necesaria para la extracción de posibles aplicaciones a una metodología propia.</p> <p>Las métricas utilizadas durante el presente artículo son las siguientes: número total de aeronaves (y sus correspondientes permutaciones para la definición de conflictos “dos a dos”), probabilidad media de conflicto (que viene determinada por las velocidades relativas [las cuales pueden ser similares, seguir una distribución normal o bien distribución uniforme], la geometría de conflicto, el espacio aéreo a estudiar y considerado [posibles diferencias entre zonas de calibración y validación] y porcentaje de aeronaves en crucero). Las simulaciones se realizan según distintos escenarios de demanda mientras que los resultados obtenidos siguen una exponencial creciente.</p>				
Aeronave de estudio	B747-400	FL de estudio	No especificado	Escenario	Ficticio y cilíndrico
Simulaciones realizadas	BlueSky ATM	Errores de vuelo	No	Probabilista/determinista	Probabilista
Métricas de riesgo	Conflictos por número de aeronaves (60 por cada 1000).				

Conclusiones	Los espacios aéreos estructurados por capas son más seguros que aquellos no estructurados, aplicando los mayores beneficios operativos a las aeronaves que se encuentran en situación de crucero. Igualmente, la seguridad es mayor cuanto menor abanico de rumbos se desarrollan en cada capa, dado que las velocidades relativas quedan más uniformizadas.
---------------------	--

Tabla 5. Información del cuarto documento revisado.

Air Traffic Control Separation Minima. Part 1 – The Current Stasis (5)					
Peter Brooker					
Royal Institute of Navigation					
Objetivo	Analizar la concepción actual de seguridad operacional a través de las mínimas de separación definidas y los problemas relativos a la evaluación de riesgos.				
Descripción	Durante este artículo se analiza la transición desde un control radar hacia un control basado en trayectorias. Ello implica el actual reto de la integración de las trayectorias 4D y futuros avances en la determinación de nuevas mínimas de separación. Desde un punto de vista del riesgo se trata de centrarse en prevenir desviaciones no deseadas antes que asegurarse de que los conflictos no se han producido por encontrarse por debajo de una separación inapropiada.				
Aeronave de estudio	-	FL de estudio	-	Escenario	-
Simulaciones realizadas	-	Errores de vuelo	-	Probabilista/determinista	-
Métricas de riesgo	Accidentes por hora de vuelo (1×10^{-8}).				
Conclusiones	Pese a la transición esperada en lo que a gestión de aeronaves por parte del ATC se refiere, la definición de nuevas distancias mínimas de separación se presume como una tarea de muy elevada dificultad.				

Tabla 6. Información del quinto documento revisado.

Air Traffic Control Separation Minima. Part 2 – Transition to a Trajectory-based System (6)					
Peter Brooker					
Royal Institute of Navigation					
Objetivo	Desarrollar las capacidades de equipos para operar en trayectorias 4D u otras con vectorización a aeronaves.				
Descripción	<p>Este artículo aborda de manera teórica los conceptos expuestos en la parte precedente. Así, a través del PBN y las trayectorias 4D, se prevé que dichos conceptos dominen las nuevas tendencias en lo referido al diseño de espacio aéreo. De igual modo, los avances tecnológicos que involucran la tecnología GPS se estima pudiesen ser de utilidad para la detección y resolución de conflictos con sistemas ACAS o STCA mejorados con estas características.</p> <p>Respecto a la velocidad relativa entre aeronaves, obtiene una gráfica que relaciona este parámetro con el tiempo estimado hasta la colisión. La forma que presenta la curva se asemeja a una rama de hipérbola, con límites más definidos cuanto menor es la distancia entre los distintos pares de aeronaves.</p>				
Aeronave de estudio	-	FL de estudio	-	Escenario	-
Simulaciones realizadas	-	Errores de vuelo	-	Probabilista/determinista	-
Métricas de riesgo	-				
Conclusiones	Los nuevos modos de operación van a traer aparejados nuevos riesgos por lo que las mínimas de separación, STCA y ACAS han de mantenerse.				

Tabla 7. Información del sexto documento revisado.

Future Air Traffic Management: Quantitative En Route Safety Assessment. Part 2 – New Approaches (7)					
Peter Brooker					
Civil Aviation Authority’s Safety Regulation Group (SRB)					
Objetivo	Desarrollar un método para la evaluación de la seguridad operacional dentro del concepto a futuro de Gestión del Tráfico Aéreo.				
Descripción	<p>Este trabajo constituye una primera aproximación de los artículos expuestos anteriormente. Un nuevo concepto en lo referente a la gestión del espacio aéreo trae aparejadas diversas consideraciones relacionadas con la correcta determinación de la posición de las aeronaves en tiempo real. Para ello, son introducidas las definiciones de <i>Position Integrity</i> y <i>Reasonable Intent</i>. Dichos conceptos se definen en las Métricas de Riesgo.</p> <p>Puesto que se trata de un trabajo desarrollado en Reino Unido conviene aclarar la nomenclatura empleada cuando se refiere a situaciones de conflicto. El término <i>Airprox</i> surge de la contracción de las palabras <i>Aircraft Proximity</i>. Queda definido como aquella situación en la cual la distancia entre aeronaves, así como sus posiciones relativas y velocidades pudieron ver comprometida la seguridad operacional de la aeronave (OACI, Doc 4444: PANS-ATM). En otras literaturas, fundamentalmente la estadounidense, el término utilizado es <i>NMAC</i> (<i>Near Mid-Air Collision</i>). Esta definición no entra a valorar el riesgo en la operación, por lo cual conviene establecer una diferencia con la definición de <i>Airprox</i>. “Una <i>NMAC</i> es siempre una <i>Airprox</i>, pero una <i>Airprox</i> no es necesariamente una <i>NMAC</i>”.</p> <p>De este modo, la ratio de <i>Airproxes</i> para Reino Unido se sitúa en, aproximadamente, $2,2 \times 10^{-5}$ por cada hora de vuelo. Este valor, como se comenta, queda en relación al tráfico sobre este país. Así, relacionando el número de <i>Airproxes</i> con el de colisiones efectivas, se obtiene que de cada 294 <i>Airproxes</i> una resultará en colisión. Esto lleva a situar el cálculo de colisiones por cada hora en $7,5 \times 10^{-8}$. Introduciendo los parámetros relativos a esta metodología (<i>Position Integrity</i> y <i>Reasonable Intent</i>, que actúan como barreras frente a las amenazas), se estima un valor total del riesgo de colisión por hora de vuelo de aproximadamente $8,5 \times 10^{-9}$.</p>				
Aeronave de estudio	-	FL de estudio	-	Escenario	En ruta y ficticio
Simulaciones realizadas	-	Errores de vuelo	Sí	Probabilista/determinista	Probabilista
Métricas de	<i>Position Integrity</i> : los errores en las medidas del GPS, radar y altimetría se				

riesgo	<p>encuentran por debajo de límites tolerables del riesgo.</p> <p><i>Reasonable Intent</i>: evalúa desde el punto de los factores humanos si la actuación de pilotos o controladores ha sido la correcta.</p> <p><i>Airproxes</i> por hora de vuelo ($2,2 \times 10^{-5}$).</p> <p>Accidentes por hora de vuelo (5×10^{-9}).</p>
Conclusiones	<p>La nueva generación de modelos desarrollados para la evaluación del riesgo de conflicto han de resultar más complejos e incluir la influencia de factores humanos y del uso efectivo de sistemas automáticos de alerta.</p>

Tabla 8. Información del séptimo documento revisado.

Aircraft Collision Models (8)					
Shinsuke Endoh					
Flight Transportation Laboratory, Dept. of Aeronautics & Astronautics, MIT					
Objetivo	Desarrollar modelos probabilísticos teóricos para la evaluación de riesgos de conflicto a partir del Modelo de Gases y del Modelo de Reich.				
Descripción	<p>Este modelo presenta un especial interés puesto que analiza diferentes situaciones que se abordan en el modelo propio. Algunas de ellas son el riesgo de colisión entre dos aerovías que intersecan o el adelantamiento en una misma aerovía. Además, incluye ecuaciones que se han repasado en anteriores artículos, como es la velocidad relativa entre aeronaves.</p> <p>La ratio de colisión entre dos aerovías que se cruzan es la siguiente. Nótese que la geometría de espacio aéreo influye a través del parámetro α, ángulo de cruce entre las dos aerovías:</p> $C = \frac{4gh (V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos(\alpha))^{\frac{1}{2}}}{bB_1B_2 \sin(\alpha)}$ <p>Donde g y h son las dimensiones de la aeronave en longitud y anchura, mientras que b es la altura de la aerovía considerada para el estudio. B_1 y B_2 hacen referencia a las separaciones con otras aeronaves precedentes.</p>				
Aeronave de estudio	-	FL de estudio	-	Escenario	En ruta/TMA ficticio
Simulaciones realizadas	-	Errores de vuelo	Sí	Probabilista/determinista	Probabilista

Métricas de riesgo	Colisiones por hora de vuelo (5×10^{-3}).
Conclusiones	Se generaliza el Modelo de Gases a uno que estima el riesgo de colisión para cualquier distribución probabilística de aeronaves con distintas velocidades y rumbos.

Tabla 9. Información del octavo documento revisado.

Framework for airspace planning and design based on conflict risk assessment. Part 2 – Conflict risk assessment model for airspace tactical planning (9)	
Fedja Netjasov	
Faculty of Transport and Traffic Engineering, University of Belgrade	
Objetivo	Desarrollar un marco de referencia para la evaluación del riesgo de conflicto en espacios aéreos controlados con un horizonte táctico de operación.
Descripción	El marco de F. Netjasov ha constituido una de las literaturas más citadas durante el desarrollo del proyecto propio. A lo largo de las tres primeras partes de este trabajo, realiza una planificación estratégica, táctica y operacional del espacio aéreo con el desarrollo de una metodología y el cálculo de distintos ejemplos numéricos para los casos de estudio. La geometría de conflicto y los parámetros utilizados son los que se acompañan en la siguiente figura (ver Ilustración 2).

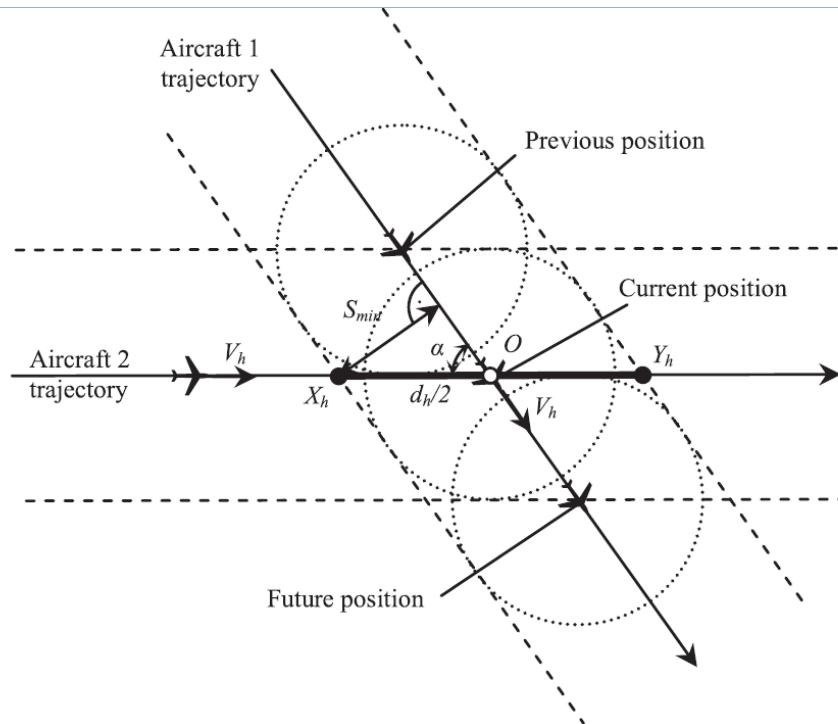


Ilustración 2. Sección crítica en el plano horizontal según el marco de referencia de Netjasov.

Aeronave de estudio	Sólo tráfico convencional	FL de estudio	Sin especificar	Escenario	En ruta y ficticio
Simulaciones realizadas	Indeterminadas	Errores de vuelo	No	Probabilista/determinista	Determinista
Métricas de riesgo	Probabilidad de riesgo de conflicto (4 conflictos para 8 aeronaves con riesgo de ocurrencia 0,2)				
Conclusiones	Se asume el riesgo como una variable aleatoria, permitiendo calcular el número de conflictos, la probabilidad de conflicto y el riesgo de conflicto en un escenario de ruta donde se produce la intersección de dos aerovías.				

Tabla 10. Información del noveno documento revisado.

Unmanned Aircraft Systems (UAS) collision risk assessment – Literature Review (10)					
Bruno Artacho					
University of Sao Paulo					
Objetivo	Repasar los distintos modelos de riesgo aplicados en el ámbito de la aviación civil para UAS con conflictos potenciales de trayectoria.				
Descripción	Del mismo modo que hicieron Netjasov y Janic, este breve paper realiza una revisión de los principales modelos para la detección y resolución de conflictos. La principal diferencia es que se trata de un trabajo más reciente por lo cual los artículos y métodos citados son más novedosos que los de los primeros. Igualmente, el análisis ya está directamente orientado a la evaluación del riesgo de conflicto entre RPAS, en vez de los trabajos precedentes más genéricos.				
Aeronave de estudio	UAV	FL de estudio	-	Escenario	-
Simulaciones realizadas	-	Errores de vuelo	-	Probabilista/determinista	-
Métricas de riesgo	-				
Conclusiones	Considera un nuevo marco de referencia para la integración de estas aeronaves donde, a través de futuras Simulaciones de Monte Carlo, pueda estimarse el riesgo de conflicto.				

Tabla 11. Información del décimo documento revisado.

Decision support for risk assessment of mid-air collisions via population-based measures (11)					
Neale L. Fulton, Mark Westcott, Stephen Emery					
Mathematical and Information Sciences, CSIRO; Univ. of the Witswatersrand, South Africa					
Objetivo	Desarrollar una metodología de apoyo que relacione los enfoques del sistema de transporte con las distintas medidas poblacionales de un territorio, para el caso concreto, Australia.				
Descripción	<p>Durante el presente artículo se realiza un estudio relativo a los diferentes riesgos asociados a la aviación civil y que pueden repercutir, de manera directa o indirecta, sobre la población. La principal limitación encontrada recae sobre el hecho de que los grupos de los cuales se obtienen los datos son muy concretos como el número de habitantes de Australia, el número de licencias al personal en la isla o el número de víctimas consecuencia de accidentes contabilizadas en su <i>Managed Airspace</i> (MAS).</p> <p>Sin embargo, pese a las limitaciones encontradas en el aspecto poblacional, introduce interesantes consideraciones al respecto del TLS. Establece que, mediante el empleo de estos modelos poblacionales puede producirse un aumento en este TLS para aquellas operaciones de las cuales no se tenga un seguimiento continuo. El TLS no recoge la exposición al riesgo de conflicto de la interacción de las trayectorias de vuelo. Así, pese a que dos volúmenes de tráfico aéreo presenten el mismo TLS no puede determinarse que sean igualmente seguros.</p> <p>La evaluación del riesgo se realiza, por tanto, mediante la relación entre los números de víctimas mortales y de supervivientes de accidentes de aviación civil en cada año. Nuevamente, la principal limitación introducida es que estos grupos poblacionales solo hacen referencia al conjunto de la población australiana.</p>				
Aeronave de estudio	Convencional y planeador	FL de estudio	Sin especificar	Escenario	MAS/UMAS Australia
Simulaciones realizadas	Cálculo teórico	Errores de vuelo	-	Probabilista/determinista	Probabilista
Métricas de riesgo	<p>Accidentes por hora de vuelo (1×10^{-8}).</p> <p>Riesgo de accidentes a terceros ($7,8 \times 10^{-8}$).</p>				
Conclusiones	Se ha relacionado el riesgo colectivo y el individual mediante una metodología que analiza los riesgos de conflicto sobre el espacio aéreo australiano.				

Tabla 12. Información del undécimo documento revisado.

Data-driven risk assessment and multicriteria optimization of UAV operations (12)	
Jaime Rubio-Hervás, Abhishek Gupta, Yew-Soon Ong	
The Data Science and Artificial Intelligence Research Centre, Nanyang Technological Univ.	
Objetivo	Introducir métodos para la evaluación del riesgo de conflicto de UAVs en operación sobre entornos mayoritariamente urbanos.
Descripción	<p>En este artículo se han determinado las métricas que rigen la operación de UAVs en espacios aéreos típicamente utilizados para aplicaciones civiles. Para ello se han empleado procesos de naturaleza estocástica para la modelización del espacio aéreo. Como acostumbra en estos análisis, las distribuciones probabilísticas son gaussianas y, en aquellas que se emplea ruido (como para calcular la incertidumbre en la trayectoria), éste es blanco.</p> <p>La principal limitación de este estudio respecto al propio es que la operativa de los UAV queda enmarcada dentro del espacio UTM. Por este motivo, el área de estudio es mucho más reducida (4 km²). Sin embargo, efectúa una interesante comparación entre las trayectorias óptimas en términos de distancia y riesgo.</p> <p>Se realiza un mapeado dentro del área de estudio con la fortaleza de la señal de cobertura modelizada según la distribución gaussiana. Los puntos de inicio y final de la trayectoria son seleccionados de manera aleatoria por los autores. La trayectoria discontinua representa la menor distancia entre los puntos mientras que la trayectoria continua indica la trayectoria que implica el menor riesgo asociado a la operación (ver Ilustración 3).</p>

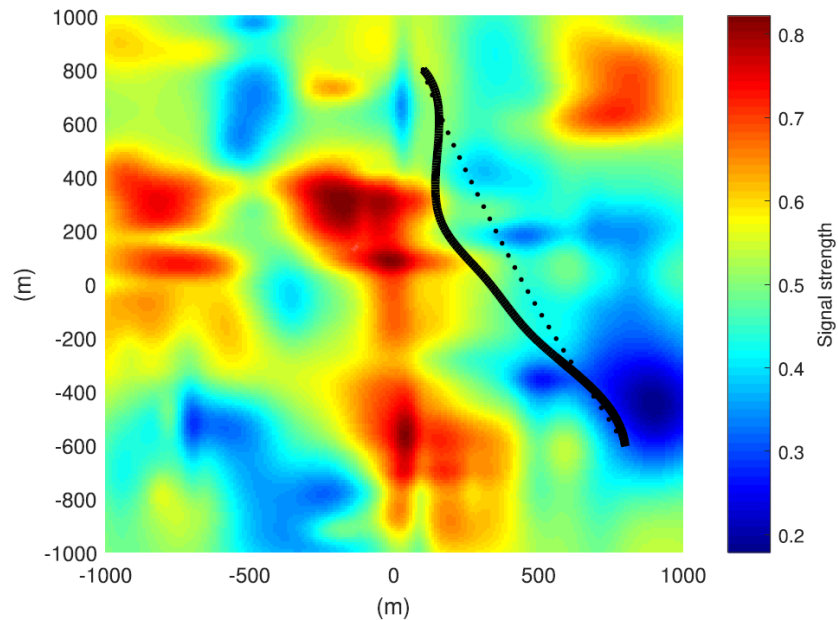


Ilustración 3. Trayectorias más corta y más segura dentro de un entorno operacional modelado según una distribución gaussiana de fortaleza de la señal de comunicación.

De esta manera se llega a una gráfica que relaciona la longitud de la trayectoria con los valores de riesgo asociados a la misma según el Óptimo de Pareto. A su vez, los riesgos habían sido previamente categorizados según la matriz de evaluación de riesgos de OACI. Por ejemplo, una probabilidad del 0,1 de que se produzca un evento inseguro se interpreta como un riesgo “mayor”.

Aeronave de estudio	UAV	FL de estudio	Espacio UTM	Escenario	Entornos urbanos
Simulaciones realizadas	Sin especificar	Errores de vuelo	No	Probabilista/determinista	Probabilista
Métricas de riesgo	Probabilidad de riesgo superior al 0,05.				
Conclusiones	Se han introducido nuevas métricas para la evaluación del riesgo de UAVs a través de una formulación probabilística que incorpora la naturaleza estocástica del medioambiente y la incertidumbre asociada.				

Tabla 13. Información del duodécimo documento revisado.

Safety Assessment of Unmanned Aerial Vehicle Operations in an Integrated Airspace (13)	
Yazdi I. Jenie, Erik-Jan van Kampen, Joost Ellerbroek, Jacco M. Hoekstra	
Control and Simulation Section, Faculty of Aerospace Engineering, TU Delft	
Objetivo	Evaluar la seguridad de UAVs en espacios aéreos no segregados mediante Simulaciones de Monte Carlo para incluir el efecto en la variabilidad de la Detección y Resolución de Conflictos.
Descripción	<p>A simple vista, parece que un análisis de este estilo toca directamente con lo realizado por nosotros para la integración de RPAS en espacios aéreos no segregados. Más aún si se conoce que el estudio en este artículo se ha limitado a un plano (extrapolable al régimen de crucero), desechando aquellas operaciones en ascenso o descenso.</p> <p>La gran novedad que incluye este estudio es que incluye la detección y resolución de conflictos en su literatura y como parámetro a utilizar para calcular el riesgo. Con objeto de evaluar la situación más restrictiva es escogido un escenario 2D frente al 3D. Esto es debido a la mayor disponibilidad espacial en el caso tridimensional para la resolución de conflictos, lo cual implica un mayor riesgo en el plano al resolver situaciones peligrosas.</p> <p>Las distintas distribuciones de tráfico se han estimado según la densidad del espacio aéreo. Tiene en cuenta, por tanto, la separación con otros dispositivos y el tamaño del área de estudio. Un ejemplo de la distribución inicial puede comprobarse en la siguiente ilustración, a partir de la cual los UAVs mantienen trayectorias rectas y de velocidad constante a partir de un rumbo inicial aleatorio.</p>

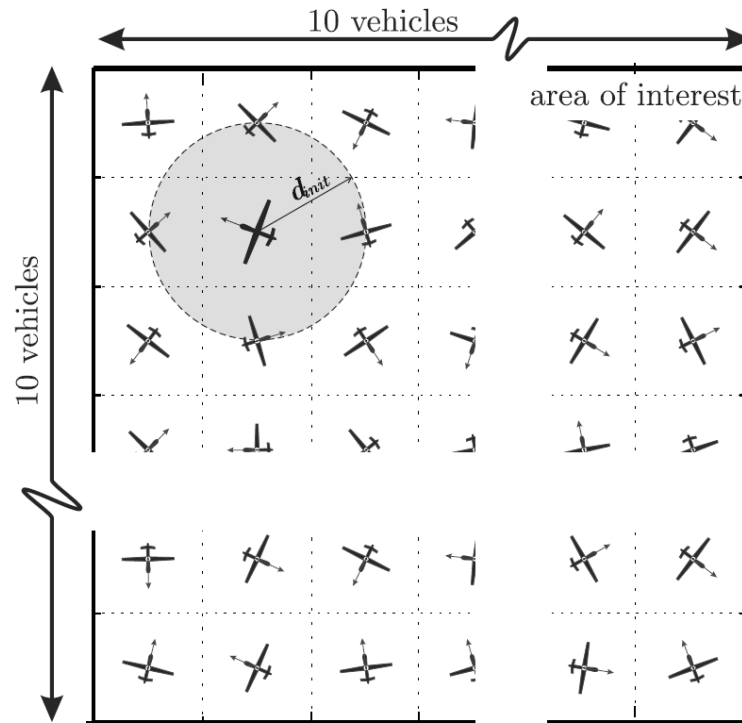


Ilustración 4. Distribución inicial de UAVs en el modelo de Jenie con rumbos aleatorios.

Empleando simulaciones de Monte Carlo sobre los casos considerados, se lleva a cabo el cálculo del tiempo medio hasta la ocurrencia del NMAC. Los UAVs se separan mediante el método *Velocity Obstacle*. Este nuevo método de separación, hasta ahora no explorado, distingue entre tres configuraciones distintas de la aeronave (*mission, avoid* y *maintain*). En un entorno tan ocupado, la ocurrencia de conflictos es casi obligada, por lo que los tiempos medios de ocurrencia son bajos. En la siguiente ilustración se acompaña la evolución de UAVs en un entorno no muy saturado inicialmente y una vez han transcurrido 30 segundos.

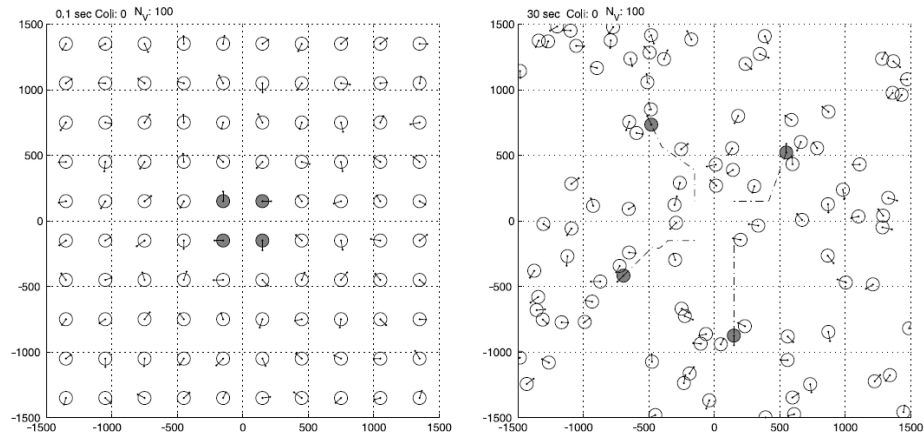
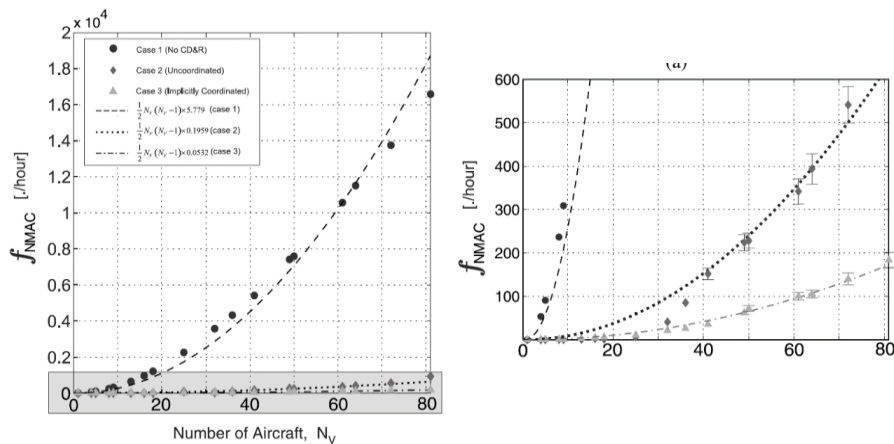


Ilustración 5. Evolución de trayectorias de UAVs para la evasión de conflictos según el VO-method.

Aeronave de estudio	UAV	FL de estudio	-	Escenario	Ficticio
Simulaciones realizadas	Monte Carlo	Errores de vuelo	Sí	Probabilista/ determinista	Probabilista
Métricas de riesgo	Colisión por número de operaciones (1×10^{-9})				
Conclusiones	Se han evaluado los parámetros que evalúan la introducción de UAVs en espacios aéreos no segregados a través del tiempo medio entre conflictos para tres configuraciones distintas de densidad de tráfico.				

Tabla 14. Información del decimotercer documento revisado.

Safety Assessment of a UAV CD&R System in High Density Airspace using Monte Carlo Simulations (14)	
Yazdi I. Jenie, Erik-Jan van Kampen, Joost Ellerbroek, Jacco M. Hoekstra	
Control and Simulation Section, Faculty of Aerospace Engineering, TU Delft	
Objetivo	Añadir dos protocolos a la Detección y Resolución de Conflictos en función de la gestión de separación que presenten los UAV (coordinada o descoordinadamente).
Descripción	<p>En este caso se trata de un análisis más reciente de los autores con la misma base teórica del anterior modelo. Hasta las simulaciones realizadas, la metodología es similar. La importancia de este análisis radica en el modo de extracción de resultados puesto que ahora no hacen referencia al tiempo medio hasta la ocurrencia del conflicto sino a su frecuencia de ocurrencia en el espacio de una hora de simulación.</p> <p>De este modo, puede estimarse un TLS como tal de este estudio, sentando unas bases para la determinación de un límite a la introducción de UAVs en caso de querer limitar el número de conflictos que se producen. Para hasta 80 aeronaves, desde la existencia de un entorno sin detección y resolución de conflictos hasta otro que queda implícitamente coordinado, la frecuencia de <i>NMAC</i> es la siguiente.</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p>Ilustración 6. Frecuencia de NMAC para UAVs según distintos casos de coordinación ATC.</p> <p>Por su parte, relativo al riesgo de conflicto, la FAA establece que la frecuencia de <i>NMAC</i> en el espacio aéreo estadounidense es de $1,3 \times 10^{-2}$ en los últimos años. Así, en el estudio se propone un TLS para <i>NMACs</i> en las operaciones de UAVs de 10^{-2}. A raíz de esta definición, en el artículo se propone cuantificar el número de UAVs sobre los principales entornos urbanos y su riesgo de vuelo.</p>



El área de estudio es variable en función de la zona metropolitana, distinguiendo las de Nueva York, Tokio, Chicago, Yakarta y Ámsterdam. Se calcula el número máximo de UAVs asociando un determinado TLS a la frecuencia de ocurrencia de *NMAC* según la ecuación:

$$\text{Número máximo de UAVs} = \frac{1 + \sqrt{1 + 8 \frac{A_{\text{estudio}} f_{NMAC}}{p_{NMAC}}}}{2}$$

Este valor presenta una relación directa con el área de estudio por lo que en caso de Nueva York se logra integrar hasta más de 50 UAVs respecto a los menos de 10 de Ámsterdam bajo las mismas condiciones de vigilancia y provisión de servicio en el espacio aéreo en un mismo FL.

Aeronave de estudio	UAV	FL de estudio	-	Escenario	Entornos urbanos
Simulaciones realizadas	Monte Carlo	Errores de vuelo	Sí	Probabilista/determinista	Probabilista
Métricas de riesgo	<p>Propone un TLS de 10^{-7} colisiones por hora de vuelo.</p> <p>Estima la integración de 8 UAVs en un área de 200 km².</p>				
Conclusiones	<p>Se realiza una evaluación de la seguridad en la operación de UAV mediante simulaciones de Monte Carlo y resoluciones de conflictos entre ellos bien de manera coordinada, o bien de manera aleatoria. Se determina un número máximo de UAVs operando coordinadamente en el mismo nivel de vuelo sobre un área metropolitana.</p>				

Tabla 15. Información del decimocuarto documento revisado.

A Risk Analysis of Unmanned Aircraft Systems (UAS) integration into non-segregate Airspace (15)	
Renan Buosi Ferreira, Derick M. Baum, Euclides Carlos Pinto Neto, Marcelo R. Martins, Jorge R. Almeida Jr., Paulo S. Cugnasca, Joao B. Camargo Jr.	
University of Sao Paulo	
Objetivo	Realizar un análisis de riesgo respectivo a la operación de RPAS en espacios aéreos no segregados mediante la identificación de riesgos de nuevas amenazas empleando el modelo FTA.
Descripción	<p>Fruto de una conferencia, este artículo desarrolla de manera fundamentalmente cualitativa las amenazas a la integración de RPAS en espacios aéreos controlados. Es uno de los pocos trabajos que, desde el primer momento, centra el análisis directamente en los RPAS y aborda su problemática al respecto del enlace de comunicaciones C2 con su piloto. La pérdida de tales comunicaciones podría traducirse en una catástrofe en caso de ocurrir, afectando a otros usuarios del espacio aéreo o incluso a terceros en tierra.</p> <p>Este trabajo organiza el análisis de riesgo de integración de RPAS en torno a dos categorías: la colisión en el aire y la colisión contra el terreno. Por ello, uno de sus objetivos es el de determinar zonas de exclusión apropiadamente. De igual modo, los autores proponen la presencia de controladores de tráfico aéreo especializados exclusivamente en la gestión de UAVs y RPAS, así como de los conflictos en los cuales puedan verse involucrados.</p> <p>Los métodos utilizados giran en torno a lo propuesto por OACI. En primer lugar, emplea el Fault Tree Analysis (FTA) para dejar constancia de las amenazas y su interrelación. Este árbol se desarrolla tanto para la colisión en vuelo como para la colisión contra el terreno. Un ejemplo de ello es el que se recoge en la Ilustración 7. Por otra parte, marca un TLS de 5×10^{-9} colisiones por hora de vuelo, que es determinado por OACI.</p>

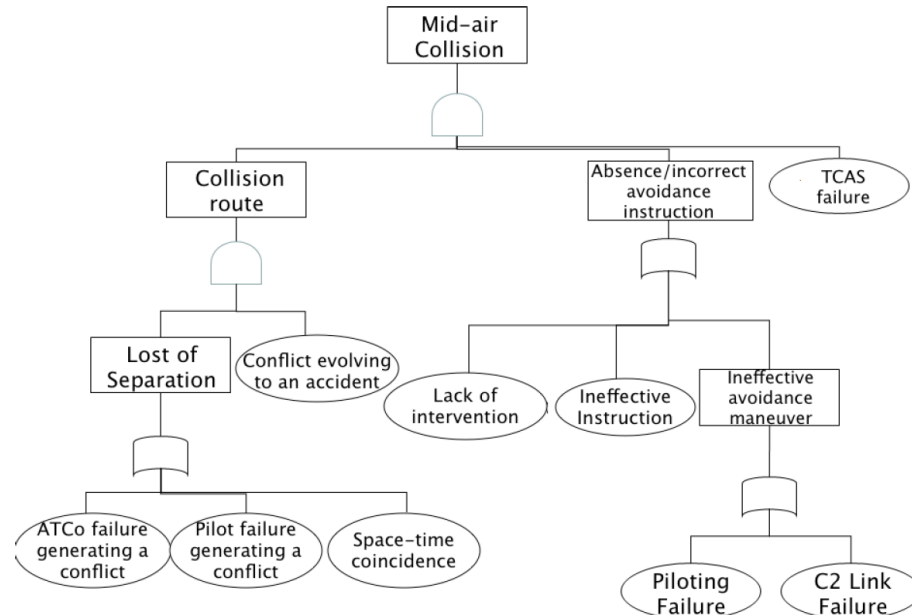


Ilustración 7. FTA para el caso de la colisión en vuelo cuando el principal factor es un fallo del enlace C2.

En relación a la parte cuantitativa, el modelo estocástico de simulaciones empleado presenta las siguientes características. La operación en crucero rectilíneo y uniforme se desarrolla entre los FL270 y FL340, con separaciones de 1000ft entre cada uno de los niveles. Las diferencias aparecen al respecto de la separación horizontal, donde se toma un valor de 10 Millas Náuticas (MN) y la velocidad, que emplea valores medios de 460kts. Se realiza una simulación en un espacio aéreo con cuatro aerovías y de forma cuadrada (40 MN de lado) integrando aeronaves al mismo con un tiempo de entrada inicial aleatorio. La evolución entre conflictos que involucran un RPAS y el porcentaje de RPAS en el espacio aéreo es creciente linealmente. En cambio, la probabilidad de conflicto en conflictos que involucren un RPAS respecto al porcentaje de RPAS presenta una tendencia cuadrática (ver Ilustración 8).



	<p style="text-align: center;">Conflicts involving one RPA.</p> <p style="text-align: center;">Ilustración 8. Relación entre la probabilidad de conflicto por hora de vuelo y el porcentaje de RPAS.</p>				
<p>Aeronave de estudio</p>	<p>Convencional y RPAS</p>	<p>FL de estudio</p>	<p>Entre FL 270 y 340</p>	<p>Escenario</p>	<p>Ficticio</p>
<p>Simulaciones realizadas</p>	<p>Monte Carlo</p>	<p>Errores de vuelo</p>	<p>Sí</p>	<p>Probabilista/determinista</p>	<p>Probabilista</p>
<p>Métricas de riesgo</p>	<p>Colisiones por hora de vuelo (5×10^{-9}).</p> <p>Probabilidad de conflicto con 20% de RPAS en el espacio aéreo (2×10^{-5}).</p>				
<p>Conclusiones</p>	<p>Para lograr la integración de RPAS es preciso detectar y mitigar posibles amenazas potenciales que pudieran conducir a situaciones de conflicto. Para ello, se realiza un análisis cuantitativo y cualitativo del espacio aéreo con intención de detectar fallos de seguridad.</p>				

5 METODOLOGÍA SIMULACIONES DE MONTE CARLO

En este apartado se detalla la metodología de riesgo empleada durante el estudio para la obtención de resultados que permitan cuantificar el TLS operativo a partir de las simulaciones de Monte Carlo. El objetivo es desarrollar una metodología que permite cuantificar el TLS a partir del tráfico aéreo convencional actual en un espacio aéreo y compararlo con el mismo escenario en el que se han introducido RPAS. De esta forma, se puede comparar el CLS con el TLS y cuantificar el número de RPAS que pueden operar de manera segura junto a aeronaves convencionales. Las simulaciones de Monte Carlo han sido seleccionadas como herramienta matemática porque permiten analizar cómo afecta la incertidumbre asociada a unas variables operativas sobre el sistema, es decir, introduciendo incertidumbre a las variables de entrada del modelo (en este caso el espacio aéreo con aeronaves convencionales y RPAS) se puede analizar el impacto que tendrían estas incertidumbres sobre los indicadores de riesgo.

Mediante la revisión bibliográfica se esperaba detectar un modelo de riesgo para la aplicación de las simulaciones de Monte Carlo. No obstante, este análisis no ha facilitado un marco metodológico acorde aplicable al estudio particular. Esto es debido, fundamentalmente, a las dos características siguientes las cuales presentan una afección directa sobre el objeto de la investigación:

- **Integración de RPAS.** En primer lugar, en los trabajos hasta ahora desarrollados la introducción de aeronaves pilotadas en remoto se realiza mediante aeronaves de pequeño tamaño como, por ejemplo, cuadricópteros. Esto se aleja del objetivo del trabajo donde se pretende que tanto el tamaño como las prestaciones operacionales de la aeronave le permitan el desarrollo de la fase de ruta en espacios aéreos no segregados.
- **Escenario de ruta.** Directamente en relación a lo expuesto con anterioridad, el análisis de las líneas de investigación realizado tampoco ofrece la posibilidad de integrar RPAS en fase de ruta. Tanto por características operativas de los RPAS como por centrar sus estudios sobre entornos urbanos, no ha sido posible encontrar métricas de aplicabilidad en este aspecto para el trabajo.

Consecuencia de estas dos características, se precisa el desarrollo de una metodología de riesgo válida. Para ello, hay que dividir el proceso en fases claramente diferenciadas con intención de obtener los resultados que permitan cuantificar el TLS en el escenario. De esta manera, se plantean los siguientes hitos en la investigación según la Ilustración 9.

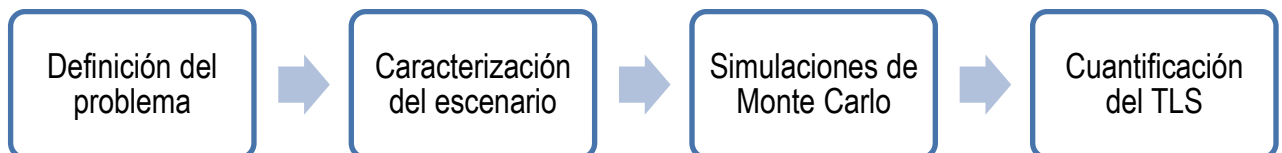


Ilustración 9. Diagrama de fases del proceso.

Una breve definición con los objetivos de cada una de las fases, las cuales se desarrollan a lo largo de los siguientes apartados, es la siguiente:

- **Definición del problema.** Son expuestas las características comunes de cualquier espacio aéreo y su tráfico necesarias para el análisis a través de condiciones iniciales, de contorno y de control.

- **Caracterización del escenario.** El sector LECMZGZ, objeto del estudio, es analizado a través de sus características particulares. Éstas pueden ser tanto físicas como operativas.
- **Simulaciones de Monte Carlo.** Son realizadas múltiples simulaciones de tráfico por las aerovías del sector con intención de obtener una serie de indicadores de seguridad del espacio aéreo.
- **Cuantificación del TLS.** Conocidos los resultados de las simulaciones de Monte Carlo, éstos se emplean para determinar un valor referencia de seguridad en el escenario de ruta.

5.1 Definición del problema

Durante este apartado se expone la organización realizada para abordar el problema y cómo se interrelacionan para la obtención de resultados. En primer lugar y, aprovechando el desarrollo de una metodología propia, se ha decidido dotar a cada grupo de características de un nombre específico en función de sus parámetros definitorios:

- **Condiciones iniciales.** En este conjunto de variables se hace referencia a las características operativas del tráfico aéreo por el espacio aéreo del problema.
- **Condiciones de contorno.** Este conjunto de variables hace referencia a las características físicas y geométricas propias del espacio aéreo estudiado.
- **Variables de control.** Este conjunto de variables es el utilizado durante la resolución del problema para la generación de múltiples casos de estudio de entre todos los posibles en el espacio aéreo.
- **Herramienta RIT de MatLab®.** El conjunto de módulos de programación empleado para la obtención de variables de salida adopta esta nomenclatura. Esta herramienta informática supone el nexo de unión de todas las características que definen al espacio aéreo del problema.
- **Variables de salida.** El conjunto de indicadores obtenido de las condiciones iniciales, de contorno y variables de control en la herramienta MatLab®. Estos indicadores, una vez analizados, son los que permiten cuantificar el TLS del espacio aéreo y establecer restricciones a la operación de configuraciones de aeronaves en el mismo.

Pueden relacionarse las características anteriormente expuestas mediante un diagrama de bloques. De este modo y, previo a una explicación pormenorizada de cada una de las variables que componen los anteriores grupos, se incluye en la Ilustración 10 la relación entre las características para la resolución del problema.

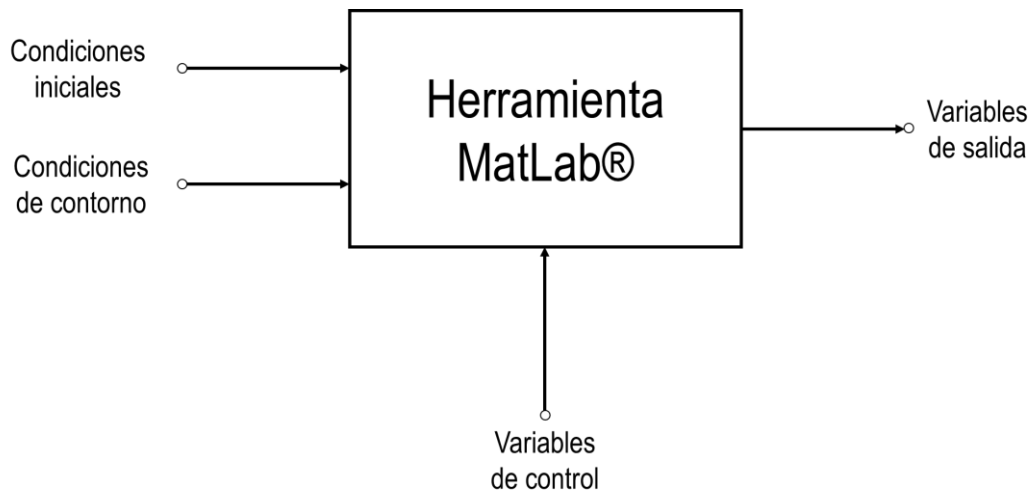


Ilustración 10. Diagrama de bloques para la resolución del problema.

5.1.1 Condiciones iniciales

Existen determinadas variables inherentes al estudio de cualquier espacio aéreo. Estas variables definen las condiciones de entrada y varían para cada simulación. Fundamentalmente hacen referencia al tráfico aéreo, por tanto, a la parte operativa del espacio aéreo. Así, quedan definidas las siguientes condiciones iniciales:

- **Programación de aeronaves:** indica el total de aeronaves involucradas en una simulación. Puede hacer referencia a aeronaves convencionales, RPAS o una mezcla de ambos. La herramienta MatLab® los distribuye según distribuciones de tráfico aéreo (bien aleatorias o reales) por las aerovías del sector.
- **Aerovía:** indica la trayectoria a seguir por cada aeronave en el volumen de espacio aéreo. En aquellos casos donde una de las aerovías no presenta continuidad y se incorpora a otra, el indicativo de aerovía es el de la aerovía de entrada al sector de la aeronave.
- **FL:** indica el nivel de referencia de vuelo para cada aeronave en tránsito por el sector. No se contemplan cambios de nivel de vuelo una vez la aeronave se ha incorporado al espacio aéreo.
- **Velocidad:** indica el régimen de avance de cada aeronave por una aerovía del sector. En ninguna de las situaciones se contempla un cambio de velocidad respecto a la velocidad de entrada. No obstante, en caso de realizar un estudio probabilista, puede considerarse la modelización según una distribución normal del parámetro 'velocidad' para incluir una cierta incertidumbre en la operación.
- **Tiempo de entrada:** indica el instante en el cual una aeronave se incorpora al sector. A partir de él, en función de la aerovía, la velocidad y el FL, se calcula la trayectoria de la aeronave por el espacio aéreo. Al igual que con la velocidad, en caso de realizar un estudio probabilista puede modelizarse el tiempo de entrada según una distribución normal.

5.1.2 Condiciones de contorno

En función del espacio aéreo de estudio, existen condiciones particulares para cada sector. Puesto que anteriormente se ha hecho referencia a las características operativas del tráfico, ahora se realiza la caracterización física del escenario. Este análisis requiere de varios módulos particulares en la herramienta RIT de MatLab® que almacenen las singularidades del sector a estudiar. De este modo, quedan definidas las siguientes condiciones de contorno:

- **Geometría del sector:** el análisis va a acotarse a un determinado sector del espacio aéreo. Sobre él, se van a identificar sus límites tanto laterales como verticales. Esto permite establecer el espacio aéreo total de estudio del cual se dispone.
- **Aerovías del sector:** quedan determinadas por el ángulo de entrada respecto a la geometría del sector. En caso de presentar giros, esto ha de ser tenido en cuenta para la correcta programación del código MatLab®. Pese a que una aerovía pueda ser compartida por varios sectores del espacio aéreo, en cada uno de ellos sus características pueden presentar ciertas particularidades.
- **Puntos de cruce:** son aquellos puntos donde intersecan dos o más aerovías. Pueden localizarse en los límites del sector o en su interior.
- **Segmentos de aerovías:** son las distancias entre cada uno de los puntos de cruce del sector anteriormente señalados.
- **Ángulos de cruce:** quedan determinados por la intersección entre dos segmentos de aerovías en un punto. La obtención de estos valores es trascendental para el cálculo tanto de secciones críticas como de áreas de bloqueo. Pese a que más de dos aerovías confluyan en el mismo punto, el análisis siempre se realiza por pares de aerovías. Igualmente, si alguna de las aerovías no presenta continuidad en el punto de cruce, esto ha de ser considerado en la modelización de las condiciones de contorno.

5.1.3 Variables de control

Sobre el sector considerado, del cual ya se ha realizado una caracterización física, va a introducirse una determinada programación de aeronaves. Esto permite realizar simulaciones en el espacio aéreo para distintos casos de operación. Aquello que va a definir las variables de control son, principalmente, las condiciones iniciales. Estas condiciones iniciales se modifican en función del caso de estudio dando lugar a las siguientes variables de control:

- **Número de aeronaves convencionales:** representa el total de estos vehículos que integran la programación de aeronaves.
- **Número de RPAS:** representa el total de estos vehículos que integran la programación de aeronaves.
- **Aerovía:** representa la ruta a seguir por cada aeronave en el interior del sector. El caso de estudio implica simular un mismo tráfico por cada una de las aerovías. Así, van a completarse todas las combinaciones posibles de una aeronave por cada aerovía del sector. La herramienta

RIT en MatLab® cuenta con un secuenciador que genera cada uno de los casos de estudio de manera automática.

- **FL:** dependiendo de los límites verticales del sector y el caso que se proponga estudiar, pueden seleccionarse unos FL u otros que determinen el volumen de espacio aéreo. Esta selección ha de tener en consideración el objetivo del problema. Si lo que se busca es la integración de RPAS, hay que escoger dos niveles de vuelo adecuados dentro de los cuales pueda desarrollar con normalidad sus operaciones. De esta manera, es de elevada importancia conocer las capacidades operativas del RPAS a estudiar.
- **Velocidad:** dependiendo de si la aeronave simulada se trata de una aeronave convencional o un RPAS, sus capacidades operativas son distintas. Este punto está directamente relacionado con la condición anterior dado que depende de las capacidades operativas del dispositivo. En caso de simular una aeronave convencional, la velocidad media se sitúa en torno a los 440 kts. Para el RPAS, sin embargo, se establece una velocidad límite operacional de 250 kts.
- **Tiempo de entrada:** para evaluar la seguridad operacional en el espacio aéreo, se fija un tiempo de estudio de una hora de entrada. En un determinado instante se incorpora al sector una aeronave y, a partir de ahí, desarrolla su trayectoria por el mismo. El propósito del análisis es la simulación de esa trayectoria por el sector para cada instante de tiempo si se modifica el tiempo de entrada. De este modo, es necesario considerar las 3600 posibilidades (periodo de una hora) para la misma operación de una aeronave, por una aerovía, en un determinado FL y a una velocidad constante.

5.1.4 Herramienta RIT de MatLab®

El desarrollo matemático de las ecuaciones que evalúan la situación operacional de un sector se ha plasmado en una herramienta informática. Esta herramienta, programado en MatLab®, permite el análisis de cualquier espacio aéreo una vez se hayan determinado sus condiciones de contorno. Por tanto, viene a suponer un marco genérico para la evaluación del riesgo en la integración de RPAS. El proceso que sigue esta herramienta es el esquematizado según la Ilustración 11.

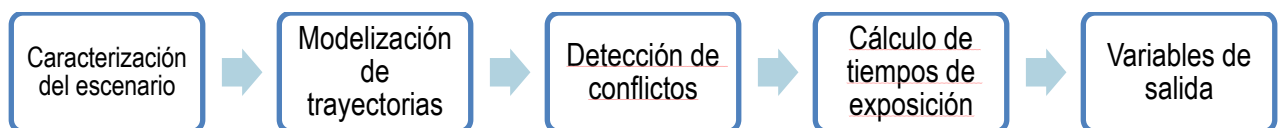


Ilustración 11. Proceso de cálculo de la Herramienta RIT de MatLab®.

5.1.5 Variables de salida

Una vez desarrollado todo el aparato matemático y definidas las condiciones o variables de las cuales se precisa para la realización de simulaciones, se llevan a cabo éstas. Como ya se ha comentado, el objetivo es obtener las trayectorias por todas las aerovías en todos los instantes mediante simulaciones de Monte Carlo. El análisis de los resultados obtenidos va a permitir determinar unos indicadores de seguridad para cada configuración de aeronaves en un espacio aéreo en particular.

En trabajos anteriores se determinaron indicadores de riesgo que evaluaran la seguridad operacional del espacio aéreo cuando se introducen RPAS. Algunos de ellos, como el de disponibilidad de aerovías o severidad de conflictos no van a aportar nueva información conforme se realicen numerosas simulaciones. Los motivos por los que se ha decidido descartar estos indicadores para la determinación de las métricas de riesgo son los siguientes:

- **Disponibilidad de aerovías:** este indicador es consecuencia directa de la aplicación del concepto 'ventanas de bloqueo'. Si un RPAS opera por una aerovía, en todas las simulaciones respecto a la misma programación de aeronaves, el tiempo total de bloqueo calculado respecto a otras aerovías no va a presentar variaciones. De esta manera, pese a realizar el cálculo en todos los instantes de tiempo, este indicador va a permanecer invariable para cada simulación.
- **Severidad de conflicto:** los valores de este indicador son consecuencia directa de la geometría de espacio aéreo y del tiempo de entrada de la aeronave. La alteración de este último parámetro no repercute de manera excesiva en los valores del indicador de severidad de conflicto. Es por ello que este indicador no va a resultar de utilidad para la definición de las métricas de riesgo.

Se ha optado por el uso de nuevos indicadores de seguridad distintos a los previamente expuestos. Es por ello que, más adelante, se dedica un apartado exclusivo a su definición y parámetros de tráfico involucrados en cada uno de ellos (ver apartado 5.3). De este modo, el problema general al respecto de la integración de RPAS en un espacio aéreo no segregado de ruta cualquiera queda planteado. Es objeto del siguiente punto del estudio la caracterización del sector que centra el análisis, para el caso, LECMZGZ.

5.2 Caracterización del escenario

Los parámetros necesarios para la caracterización de cualquier espacio aéreo han sido definidos en el apartado anterior quedando agrupados según sus particularidades operativas o físicas. De manera general, el primero de los bloques anteriores era conocido como condiciones iniciales y, el segundo, como condiciones de contorno. La segunda de las fases que integra la metodología tiene como objetivo la introducción en la herramienta MatLab® de las características de tráfico aéreo y geométricas del sector LECMZGZ. Con ellas se hace posible la realización de simulaciones de Monte Carlo mediante la generación de diversos casos de estudio a través de la modificación de determinadas variables de control. Así, se obtiene un abanico de casos suficiente con los cuales identificar los indicadores de seguridad. De este modo, el proceso iterativo seguido por la metodología para la obtención del conjunto de indicadores es el mostrado según la Ilustración 12.

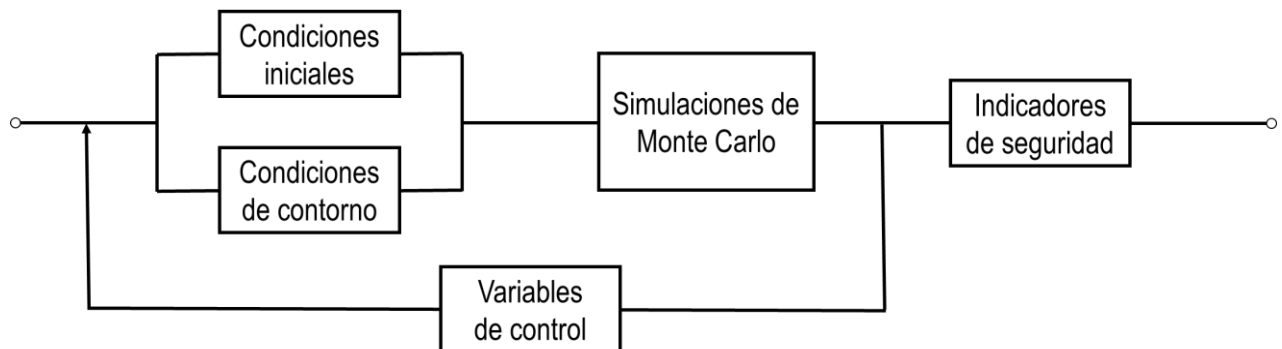


Ilustración 12. Proceso iterativo empleado según la metodología.

Cada uno de los grupos de condiciones o las variables de control vienen determinados por una serie de parámetros operacionales que influyen directamente sobre la trayectoria de las aeronaves. Estos o se mantienen fijos durante la totalidad de las simulaciones o bien son modificados por las variables de control para la generación de diferentes casos de estudio. Las condiciones y magnitudes consideradas en cada uno de estos grupos se detallan en los siguientes apartados.

5.2.1 Condiciones iniciales

En primer lugar, el software informático precisa de la información referente al tráfico aéreo considerado. De este modo, las características operativas que aplican sobre el sector LECMZGZ son los primeros datos proporcionados a la herramienta de cálculo. Es importante destacar que estas condiciones iniciales se mantienen fijas e independientes para cada iteración. Una vez finalizada ésta y extraída la información necesaria al respecto de los conflictos u otras variables de salida, las condiciones iniciales son modificadas por las variables de control. Así, es generado un nuevo escenario el cual proporciona nueva información relativa a los indicadores de seguridad. Las condiciones iniciales vienen definidas por:

- **Programación de aeronaves:** el número mínimo considerado de aeronaves operando simultáneamente en LECMZGZ es de 2. Esta elección es trivial puesto que una aeronave en solitario en el espacio aéreo no genera conflictos ni proporciona valores al respecto de los

indicadores de seguridad. Menos aún, en consecuencia, el caso de ninguna aeronave. El número máximo considerado de aeronaves es de 10, quedando repartidas entre mitad aeronaves convencionales y mitad RPAS en caso de la simulación de dicho escenario.

- **Aerovía:** el sector cuenta con 14 de ellas en total. La herramienta MatLab® dispone de un secuenciador que asigna a cada aeronave una aerovía del espacio aéreo para el desarrollo de su operación. No se contempla, de este modo, el empleo de otra aerovía distinta a la asignada inicialmente para una aeronave antes de su abandono del sector. El movimiento es rectilíneo salvo que la aerovía presente giros en determinados puntos de cruce.
- **FL:** resultado de las características operativas del RPAS, se plantea un volumen de referencia del espacio aéreo entre FL 250 y FL 300. En la actualidad, el proyecto no contempla las operaciones de ascenso y descenso por lo que va a mantenerse fijo uno de los niveles de vuelo de entre los seis posibles. En dicho plano es donde las aeronaves desarrollan sus operaciones. De esta manera, queda seleccionado como nivel de referencia para la realización de simulaciones el FL 270.
- **Velocidad:** con intención de añadir incertidumbre al estudio, se ha decidido modelizar este parámetro según distribuciones normales diferenciadas para aeronaves convencionales y RPAS. De esta manera se consigue, mediante las simulaciones de Monte Carlo, la generación de un amplio número de casos de estudio. Estos proporcionan, individualmente, valores diferenciados al respecto de los indicadores de seguridad.
- **Tiempo de entrada:** se considera un intervalo de operación de una hora dentro del sector LECMZGZ. El secuenciador de la herramienta ya ha asignado previamente una aerovía y su correspondiente FL, así como la velocidad asociada, a una aeronave. De este modo, se precisa todavía fijar un instante inicial en el cual se incorpore al espacio aéreo. Este es determinado entre los valores de 1 y 3600 segundos, que conforman todos los posibles casos dentro de la hora de operación. A partir de este tiempo de entrada se genera la trayectoria de la aeronave por el sector LECMZGZ.

5.2.2 Condiciones de contorno

Acto seguido, es introducida en la herramienta MatLab® la información relativa a las características físicas del sector LECMZGZ. Respecto a estas condiciones es importante destacar que en ningún momento se van a modificar ni por las variables de control ni durante el desarrollo de las simulaciones de Monte Carlo. Esto es debido a que estos datos son aquellos que conforman el marco de referencia dentro del cual cualquier aeronave de la programación lleva a cabo sus trayectorias. De esta manera, el escenario operativo varía a cada iteración del código mientras que el escenario físico se mantiene inalterable durante las mismas. Las condiciones de contorno vienen definidas por los siguientes parámetros:

- **Geometría del sector:** el objetivo del trabajo se centra en el volumen de espacio aéreo LECMZGZ situado sobre territorio español. Hasta el momento, la información recogida en las condiciones iniciales podía considerarse como genérica para cualquier escenario de tráfico. Sin embargo, la herramienta informática precisa ahora de datos específicos sobre el escenario de referencia. Cada volumen de espacio aéreo presenta una serie de características particulares

por lo que es muy importante un detallado análisis en este punto del estudio. Por ejemplo, en LECMZGZ los límites verticales inferiores no resultan homogéneos sobre un FL concreto, sino que ciertas áreas se distribuyen bien sobre el terreno o bien sobre otros espacios aéreos inferiores.

- **Aerovías del sector:** una vez conocido que el sector cuenta con 14 aerovías, es importante saber la direccionalidad de las mismas para el desarrollo de las operaciones de aeronaves. Según las distribuciones de tráfico empleadas se emplean mayoritariamente unas u otras aerovías en caso de ser las distribuciones reales o, por otra parte, cualquiera de ellas si la distribución es aleatoria.
- **Puntos de cruce:** el sector LECMZGZ cuenta con 30 de ellos, también denominados WP_i . Se generan por la intersección de dos o más aerovías y son trascendentales puesto que en ellos se produce el cruce entre aeronaves en su fase de ruta. Por lo general no resultan de una criticidad elevada dado que, en la mayoría (en torno a un 75%), únicamente convergen dos aerovías.
- **Segmentos de aerovías:** el sector LECMZGZ cuenta con 72 de ellos, obtenidos de la caracterización física. Son trascendentales para la determinación de las longitudes de sección crítica entre cada par de ellos. Aunque en un punto de cruce converjan más de dos aerovías, el análisis se realiza siempre dos a dos.
- **Ángulos de cruce:** en la mayoría de los mismos en el sector LECMZGZ, éstos se sitúan en el entorno del ángulo recto. Esto es consecuencia, fundamentalmente, de la marcada direccionalidad del espacio aéreo con flujos Sur-Norte provenientes del Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas y Oeste-Este, en este caso en dirección al Aeropuerto Josep Tarradellas Barcelona-El Prat.

5.2.3 Variables de control

Se dispone del marco de referencia para la realización de simulaciones de tráfico aéreo con las condiciones iniciales y de contorno introducidas en la herramienta informática. El siguiente paso pasa por la modificación de determinados parámetros para la generación de múltiples simulaciones de tráfico aéreo sobre el escenario LECMZGZ. Las magnitudes afectadas son aquellas condiciones iniciales que permiten la introducción de incertidumbre en su asignación por parte del secuenciador de tráfico. Como se ha comentado, las condiciones de contorno se mantienen invariables durante las simulaciones puesto que son las encargadas de determinar el marco de referencia sobre el cual se realizan éstas. De este modo, las variables de control sobre las cuales se actúa en la resolución del problema son las siguientes:

- **Número de aeronaves convencionales:** determinado entre 0 y 5, pudiendo compartir el espacio aéreo LECMZGZ con RPAS dentro de la programación de aeronaves.
- **Número de RPAS:** determinado entre 0 y 5, pudiendo compartir el espacio aéreo LECMZGZ con aeronaves convencionales dentro de la programación de aeronaves.
- **Aerovía:** se asigna una de ellas de entre las 14 posibles a cada aeronave convencional o RPAS. A este respecto existe una dependencia inequívoca de la distribución de tráfico seguida por las distintas aeronaves que conforman la programación. De este modo, en función de la distribución

de tráfico empleada en las simulaciones de Monte Carlo, la aerovía asignada para la operación puede ser:

- **Aleatoria:** siendo escogido su valor de entre los posibles de una distribución uniforme entre 1 y 14, para cada una de las aeronaves.
- **Real:** siendo atribuido su valor de acuerdo a distribuciones reales de tráfico conforme a la información analizada de un histórico (Ciclo AIRAC 1608) para las aeronaves convencionales. En el caso de los RPAS, su aerovía utilizada se obtiene de la distribución uniforme entre 1 y 14 empleada en el caso anterior.
- **FL:** quedando como fijo el nivel de vuelo 270 para la totalidad de las simulaciones. Este valor permanece constante para cualquier aerovía y aeronave del sector LECMZGZ.
- **Velocidad:** el secuenciador de tráfico asigna una determinada magnitud de inicio a cada aeronave una vez se produce su entrada al sector. Esta velocidad se mantiene constante en lo que se prolonga la simulación y hasta el abandono del sector. En este aspecto existe una marcada dependencia en función de las características operacionales de la aeronave. Las velocidades asignadas de manera aleatoria a cada vehículo son, respectivamente:
 - **Aeronaves convencionales:** la velocidad para cada aeronave convencional de cada simulación sigue una distribución normal de media 450 kts y desviación típica 20 kts.
 - **RPAS:** la velocidad para cada RPAS de cada simulación sigue una distribución normal de media 250 kts y desviación típica 5 kts.
- **Tiempo de entrada:** la última de las variables de control que introducen incertidumbre a las simulaciones hace referencia a la incorporación al sector dentro de la hora de estudio considerada. Es asignado un tiempo de entrada aleatorio a cada una de las aeronaves según una distribución uniforme entre 1 y 3600 segundos. Ello permite que cada dispositivo se introduzca en LECMZGZ en un instante aleatorio y, a partir de ahí, desarrolle su operación por su aerovía y con la velocidad asignadas aleatoriamente ambas previamente.

5.2.4 Simulaciones de Monte Carlo

La introducción de las variables de control permite la realización de simulaciones de Monte Carlo. Para cada programación de aeronaves convencionales y RPAS se modifican en 10.000 simulaciones dichas variables de control, generando tales casos de estudio en el espacio aéreo LECMZGZ. Ello posibilita la obtención de los indicadores de seguridad con los cuales evaluar el riesgo operativo del sector. Han sido considerados dos grandes grupos de simulaciones en función de la distribución de tráfico seguida por las aeronaves convencionales. Así, cada uno de los grupos de simulaciones de Monte Carlo se caracteriza por:

- **Aleatorias:** toda aeronave de la programación desarrolla sus operaciones según distribuciones de tráfico aleatorias. Esto supone la asignación por parte del secuenciador de cualquier aerovía de manera aleatoria para su uso para aeronaves convencionales y RPAS. Dicha aleatoriedad se une a la introducida por los parámetros velocidad y tiempo de entrada. De este modo, la única variable constante es el FL que se mantiene en 270 para todas las configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS en todas las simulaciones realizadas.

- **Reales:** dependiendo de las características operacionales del espacio aéreo, las aeronaves convencionales siguen una distribución de tráfico tipo. En el caso de las aeronaves convencionales las aerovías utilizadas se ajustan a las empleadas por los tráficos reales del sector LECMZGZ. Los RPAS, por su parte, mantienen el empleo de aerovías aleatorias ya que el objetivo es la evaluación del riesgo de su introducción en el espacio aéreo. Las simulaciones continúan manteniendo incertidumbres como son la incorporación al sector en un tiempo de entrada aleatorio por el FL 270 y con velocidades de acuerdo a las distribuciones anteriormente explicadas.

5.2.5 Variables de salida

La correcta programación en la herramienta RIT de MatLab® de todos los bloques detallados durante el presente apartado permite la obtención de los indicadores de riesgo. Con ellos puede evaluarse el riesgo operacional del sector una vez han sido integrados los RPAS en LECMZGZ y, a partir de ahí, determinar un TLS operativo. La finalidad en este aspecto es el establecimiento de restricciones a la operación de determinadas configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS en el espacio aéreo.

Puesto que los nuevos indicadores de seguridad han quedado definidos, son expuestos los parámetros a obtener en el siguiente apartado de manera diferenciada. Tres nuevos indicadores referidos a conflictos y tiempos críticos han sido planteados para evaluar el estado operacional del sector. Éstos son calculados con independencia del tipo de aeronave (convencional o RPAS) en todas y cada una de las simulaciones realizadas para cada configuración de las mismas por el sector LECMZGZ.

5.3 Indicadores de seguridad

Las simulaciones de Monte Carlo realizadas ofrecen una visión del estado del espacio aéreo a través de los indicadores de riesgo calculados para cada configuración de aeronaves convencionales y RPAS. De este modo, en cada una de ellas se han obtenido un conjunto de indicadores de seguridad con los cuales evaluar la viabilidad en las operaciones por el sector LECMZGZ. Anteriormente se ha hecho referencia (ver sección 5.1.5) a determinadas variables de salida descartadas para el estudio, con sus motivos. En el presente apartado se procede a la exposición de los indicadores seleccionados que intervienen como métricas de riesgo del espacio aéreo:

- **Indicador de número de conflictos (N_c):** hace referencia al total de situaciones de conflicto que se producen entre aeronaves durante las simulaciones. Este indicador ha sido empleado en trabajos previos e identifica si se produce una vulneración en las mínimas de separación entre cada par de aeronaves. Su importancia radica en que es fundamental para la posible determinación de un TLS al relacionar el número de conflictos existente en el sector.
- **Indicador de tiempo de exposición (τ_{exp}):** esta variable de salida se caracteriza por relacionar, adimensionalmente, el tiempo de exposición a un conflicto de una aeronave en la longitud de sección crítica alrededor de un punto de cruce con el tiempo de estudio de las simulaciones. Esta relación se individualiza para cada aeronave y simulación, completando la expresión dividiendo entre el número total de aeronaves de la programación y las simulaciones realizadas según la Ecuación 1.

Ecuación 1. Tiempo de exposición (τ_{exp}).

$$\tau_{exp} = \frac{1}{N^{\circ} \text{ de simulaciones} * \text{Tiempo de estudio}} \sum_{i=1}^{N^{\circ} \text{ de simulaciones}} t_{exp_i}$$

- **Indicador de tiempo medio de duración de conflictos ($\overline{\tau_{con}}$):** la última de las variables extraídas fruto de la realización de las simulaciones contabiliza el tiempo medio en segundos que se prolonga un conflicto entre un par de aeronaves. Este indicador de seguridad está intrínsecamente relacionado con el primero de los definidos puesto que siempre que $N_c > 0$, entonces $\overline{\tau_{con}} > 0$ s. Se realiza, pues, la media en segundos de la duración de los conflictos por simulación para todas las configuraciones de aeronaves.

Finalmente, puede indicarse la relación entre los últimos indicadores referidos a tiempos. Para ello es preciso el empleo de las unidades correctas, no expresando como adimensional el indicador τ_{exp} . De esta manera, la relación τ_{con} / τ_{exp} (ver Ecuación 2) expresa la fracción de tiempo que una aeronave se encuentra sufriendo un conflicto sobre el tiempo total que queda expuesta al mismo.

Ecuación 2. Relación entre el tiempo medio de duración de conflictos y tiempo de exposición.

$$\frac{\tau_{con}}{\tau_{exp}} = \frac{\sum_{i=1}^{N^{\circ} \text{ de simulaciones}} t_{con_i}}{\sum_{i=1}^{N^{\circ} \text{ de simulaciones}} t_{exp_i}}$$

6 SIMULACIONES DE MONTE CARLO ALEATORIAS

El objetivo en este apartado es evaluar las métricas de riesgo definidas anteriormente entre aeronaves en el sector LECMZGZ. Esto supone el paso previo a la determinación de un TLS operativo en el espacio aéreo considerado. Hasta llegar a este punto se ha precisado definir el problema de estudio y caracterizar el escenario. Una vez realizado este proceso, en apartados anteriores, se propone la realización de Simulaciones de Monte Carlo para conocer el estado operativo del volumen a analizar. De esta manera, el avance en la investigación se muestra en la Ilustración 13.

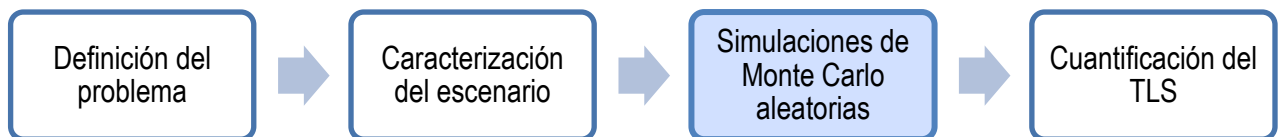


Ilustración 13. Diagrama de fases del proceso y ubicación actual del mismo.

Este experimento se ha denominado Simulaciones de Monte Carlo aleatorias porque no se tienen en cuenta los flujos de tráfico aéreos actuales en el sector LECMZGZ. Cada grupo de simulaciones comprende la generación de 10.000 trayectorias para las aeronaves involucradas en las mismas. El tiempo de entrada al sector, la aerovía y velocidad a la cual lo hacen siguen distintas distribuciones probabilísticas. Así, el rango de valores de cada variable de control en el espacio aéreo se resume en la Tabla 16.

Tabla 16. Valores de las variables de control en las simulaciones de Monte Carlo aleatorias.

Variables de control	Rango posible de valores	Aleatoriedad
Número total de aeronaves	2 a 10	No
Aerovía	1 a 14 (LECMZGZ)	Sí
Tiempo de entrada	U (1,3600) segundos	Sí
Velocidad	N_{conv} (450,20); N_{RPAS} (250,5) knots	Sí
FL	270	No

Las principales características de las simulaciones de Monte Carlo aleatorias son:

- Las simulaciones evalúan todos los casos posibles entre las configuraciones de hasta cinco aeronaves convencionales y cinco RPAS, siendo dos el número mínimo de aeronaves a simular. Esto es debido a que una aeronave en solitario por el sector no origina conflictos con ninguna otra de la programación. El máximo número de aeronaves se fija en diez aeronaves (incluyendo la mitad de cada tipo). Con intención de resumir los 33 casos de simulaciones planteadas, se incluye la Tabla 17.

Tabla 17. Configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS en las simulaciones realizadas.

Aeronaves convencionales	RPAS					
	0	1	2	3	4	5
0	-	-	Sí	Sí	Sí	Sí
1	-	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
2	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
3	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
4	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
5	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

- Para cada una de las 33 configuraciones entre aeronaves convencionales y RPAS, se generan 10.000 simulaciones distintas de sus trayectorias.
- Cada trayectoria de aeronave sigue de manera aleatoria una aerovía de las 14 posibles.
- Igualmente, el tiempo de entrada empleado por la aeronave es también aleatorio. A tal efecto, se le asigna un instante dentro del periodo de estudio comprendido. Este periodo es de una hora, por lo cual el tiempo de entrada toma valores entre 0 y 3600. Aunque el periodo de estudio sea de una hora, esto no quiere decir que una vez alcanzado el instante 3600 se finalice la simulación, si no que las simulaciones finalizan cuando la última aeronave ha abandonado el sector.
- La velocidad también sigue una distribución probabilística. En función de la aeronave en cuestión, han sido definidas dos distribuciones normales para la velocidad en caso de tratarse bien de una aeronave convencional, bien de un RPAS. En el primer caso, la velocidad media es de 450 kts mientras que su desviación típica es de 20 kts. En el caso del RPAS, la distribución normal se ha adaptado a sus capacidades operativas. Así, su velocidad media es de 250 kts y su desviación típica, 5 kts. Estos valores han sido obtenidos de un estudio estadístico previo para las aeronaves convencionales y para los RPAS se ha considerado conveniente de acuerdo a las características operativas proporcionadas por BADA (16). De este modo, cada aeronave en cada simulación adquiere un valor aleatorio de su velocidad conforme a las distribuciones estadísticas.
- Finalmente, las simulaciones se han realizado para un único nivel de vuelo (FL). En futuros trabajos se espera llevar a cabo la ampliación a diferentes FLs.

Estas simulaciones han sido realizadas en el software MatLab® R2018b.

6.1 Resultados de las simulaciones de Monte Carlo aleatorias

El objetivo de la realización de las simulaciones es caracterizar un conjunto de indicadores de seguridad que permitan determinar relaciones entre la seguridad operacional y el número de RPAS que operan en un espacio aéreo no segregado. Los indicadores de seguridad considerados han sido los siguientes:

- Número de conflictos (N_c)
- Tiempo de exposición (τ_{exp})
- Tiempo medio de duración de conflictos ($\overline{\tau_{con}}$)

6.1.1 Número de conflictos (N_c)

El primer indicador considerado es el número de conflictos o el número de veces que las mínimas de separación se infringen entre un par de aeronaves. El número de conflictos detectado se puede mostrar de distintas maneras en función de las características e implicaciones que tiene sobre el estudio. Se han calculado el número de simulaciones que proporcionan un número determinado de conflictos, se han obtenido el número total de conflictos y se ha analizado la evolución de los mismos en función de las distintas configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS.

A modo de ejemplo de las simulaciones realizadas, la Tabla 18 muestra el número de simulaciones en las que se ha detectado uno, dos, tres o ningún conflicto para la configuración de dos aeronaves convencionales y un RPAS.

Tabla 18. Simulaciones en conflicto para la configuración de 2 aeronaves convencionales y 1 RPAS aleatorios.

Número de simulaciones con conflictos					
Nº Conv.	Nº RPAS	Sin conflicto	1 conflicto	2 conflictos	3 conflictos
2	1	8957	1004	33	6

El número total de conflictos para esta configuración de aeronaves es de 1088 conflictos en las 10.000 simulaciones realizadas ($N_c = 1004 * 1 + 33 * 2 + 6 * 3$). Es importante observar que el número de simulaciones con conflictos no se corresponde con el número total de conflictos detectados para este grupo de simulaciones. Así, para esta combinación de aeronaves convencionales y RPAS se obtienen 1043 simulaciones con al menos un conflicto. En cambio, el número total de conflictos es algo superior, situándose en 1088. Esta variación es debida a que en algunas de las simulaciones se produce más de un conflicto.

El parámetro que permite determinar un TLS en el espacio aéreo es el número total de conflictos por cada configuración. Para cada una de las 33 configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS se han realizado simulaciones de Monte Carlo con valores aleatorios de aerovías, velocidades y tiempos de entrada para cada uno de los dispositivos. De este modo, el número de conflictos medio detectados por simulación ($\overline{N_c} = N_c / 10000$) durante cada una de las configuraciones se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19. \overline{N}_c para cada configuración de aeronaves convencionales y RPAS aleatorios.

Aeronaves convencionales	RPAS					
	0	1	2	3	4	5
0	0	0	0,0291	0,0898	0,1827	0,3011
1	0	0,0458	0,1164	0,2284	0,3512	0,5291
2	0,0183	0,1088	0,2281	0,3786	0,5476	0,7480
3	0,0544	0,1849	0,3514	0,5545	0,7701	1,0243
4	0,1149	0,2925	0,4903	0,7166	1,0014	1,2917
5	0,1774	0,4062	0,6595	0,9381	1,2475	1,5982

Las principales conclusiones que se pueden obtener son:

- Conforme aumenta el número de aeronaves en el sector, bien convencionales o RPAS, lo hace el número de conflictos medio.
- La comparación entre un mismo número de aeronaves convencionales y de RPAS es mayor para el caso de RPAS. Por ejemplo 3 aeronaves convencionales proporcionan 0,0544 conflictos por simulación frente a los 0,0898 que aparecen con RPAS. No obstante, la ratio permanece constante en un valor cercano a un incremento del 60%.
- Del mismo modo, para un mismo número total de aeronaves (combinaciones de RPAS y aeronaves convencionales), se producen más conflictos en aquellas configuraciones en las cuales predomina el número de RPAS frente al número de aeronaves convencionales.
- Además, debe analizarse la Tabla 19 siguiendo sus diagonales de izquierda a derecha (aumenta el número de RPAS manteniendo el número de convencionales) y de abajo a arriba (aumenta el número de convencionales manteniendo el número de RPAS). El número de aeronaves involucradas durante toda la diagonal se mantiene constante pese a que las configuraciones entre aeronaves convencionales y RPAS varían. Pero el número de conflictos evoluciona de forma parabólica de manera que obtiene sus valores máximos cuando los valores entre número de aeronaves convencionales y número de RPAS es similar.

Para las distintas aeronaves convencionales involucradas en una programación con RPAS, puede evaluarse la tendencia esperada de conflictos en el sector. La Ilustración 14 relaciona los valores obtenidos según la Tabla 19 en función del número de aeronaves convencionales (denominado “n_ave”) y el de RPAS. Así, se expresa el \overline{N}_c detectados para cada una de las configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS consideradas.

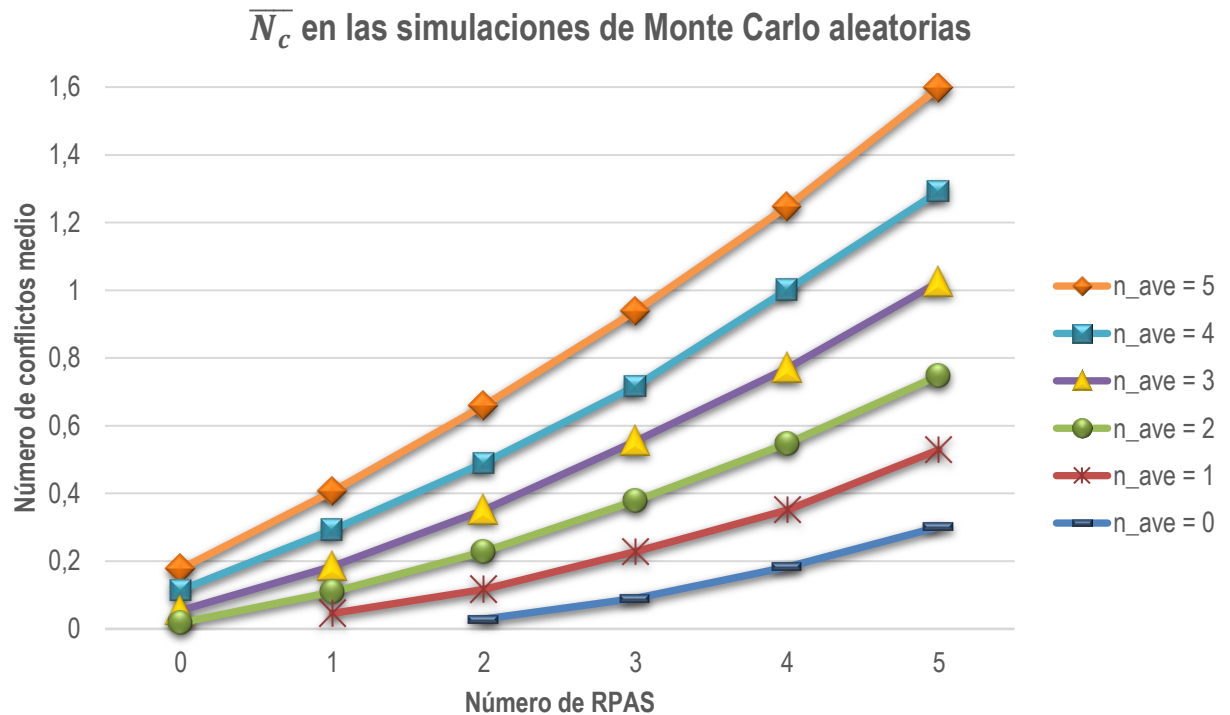


Ilustración 14. Evolución en el número de conflictos medio entre aeronaves convencionales y RPAS.

Se observa cómo la evolución para todas las series de datos es parabólica. Partiendo desde un \overline{N}_c inferior a 0,2 por simulación todas ellas divergen entre sí hacia valores más elevados. Cuanto mayor es el número de aeronaves iniciales que integran una programación, mayor resulta la divergencia de la serie.

La información de las series de datos relativas al número de conflictos por cada configuración de aeronaves convencionales y RPAS se adjunta a continuación en la Tabla 20. La representación gráfica para cada una de ellas mediante histogramas se incluye en el Anexo A. Se acompaña pues, a continuación, una tabla resumen del número de simulaciones con los conflictos detectados para cada configuración de aeronaves convencionales y RPAS simulados en el espacio aéreo LECMZGZ.

Tabla 20. Número de simulaciones con los conflictos indicados para cada configuración de aeronaves convencionales y RPAS.

Nº Conv.	Nº RPAS	Número de simulaciones con los conflictos indicados											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	1	9542	458	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0	9817	183	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	0	9465	528	5	2	-	-	-	-	-	-	-	-
4	0	8917	1029	42	12	-	-	-	-	-	-	-	-
5	0	8356	1531	96	17	-	-	-	-	-	-	-	-
2	1	8957	1004	33	6	-	-	-	-	-	-	-	-
3	1	8290	1583	115	12	-	-	-	-	-	-	-	-
4	1	7457	2235	248	52	5	1	1	1	-	-	-	-
5	1	6626	2809	464	85	12	2	2	-	-	-	-	-
2	2	7936	1879	155	28	2	-	-	-	-	-	-	-
3	2	7004	2570	346	70	8	2	-	-	-	-	-	-
4	2	6096	3096	653	129	19	4	3	-	-	-	-	-
5	2	5188	3453	1020	274	50	12	1	2	-	-	-	-
0	2	9709	291	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0	3	9117	870	11	2	-	-	-	-	-	-	-	-
0	4	8318	1562	96	23	1	-	-	-	-	-	-	-
0	5	7362	2326	257	49	6	-	-	-	-	-	-	-
1	2	8875	1087	37	1	-	-	-	-	-	-	-	-
1	3	7911	1920	144	24	1	-	-	-	-	-	-	-
1	4	7001	2580	340	69	8	1	0	0	1	-	-	-



1	5	5853	3258	687	161	31	8	2	-	-	-	-
2	3	6837	2650	418	82	11	2	-	-	-	-	-
2	4	5754	3281	755	168	32	7	3	-	-	-	-
2	5	4763	3608	1163	354	84	21	6	1	-	-	-
3	3	5752	3247	757	200	37	6	1	-	-	-	-
4	4	3686	3795	1702	555	185	60	12	2	3	-	-
4	3	4841	3655	1115	302	68	12	6	1	-	-	-
3	4	4584	3694	1288	330	84	15	5	-	-	-	-
5	3	3959	3763	1529	521	165	43	18	2	-	-	-
3	5	3628	3765	1717	640	173	47	22	4	1	1	-
5	4	2888	3712	2068	894	302	94	31	8	2	1	-
4	5	2885	3461	2234	923	343	105	34	7	6	1	-
5	5	2100	3332	2410	1288	552	205	78	21	8	6	2

Esta tabla constituye una versión desarrollada de la expuesta en la Tabla 19. Aquí se especifican todas las simulaciones con el número de conflictos indicados detectadas. En el caso de la configuración de cinco aeronaves convencionales y cinco RPAS, se presenta un máximo de 10 conflictos en la simulación para una de sus programaciones en concreto. Puede parecer un valor elevado, pero bien es cierto que tal configuración de aeronaves podría desarrollar hasta 45 posibles conflictos entre las diez aeronaves de su programación. En cambio, las configuraciones que integran únicamente dos dispositivos, pueden generar un conflicto por simulación a lo sumo. Es el caso de dos aeronaves convencionales o RPAS, por separado, o una aeronave convencional y un RPAS operando conjuntamente en el espacio aéreo LECMZGZ.

Aquellos casos en los cuales el número de aeronaves de una programación se mantiene constante pueden aportar información de interés al respecto de la evolución del número de conflictos medio. De este modo puede conocerse la tendencia al aumentar el número bien de aeronaves convencionales, bien de RPAS, pero siempre manteniendo un valor constante para el número de aeronaves totales. Para ello ha sido necesaria la generación de una ilustración tridimensional donde los ejes del plano horizontal corresponden al número de aeronaves convencionales y al número de RPAS, respectivamente. Sobre él se superponen los valores, en vertical, del $\overline{N_c}$ para cada configuración de aeronaves. Las simulaciones en las cuales el número de aeronaves es el mismo (son representados desde 2 a 5 aeronaves, según su correspondiente leyenda) son relacionadas mediante líneas rectas. Así, se obtiene la Ilustración 15 donde

se representa la evolución en el número de conflictos medio para un número de aeronaves aleatorias constantes en el sector LECMZGZ.

Número de conflictos medio por número constante de aeronaves

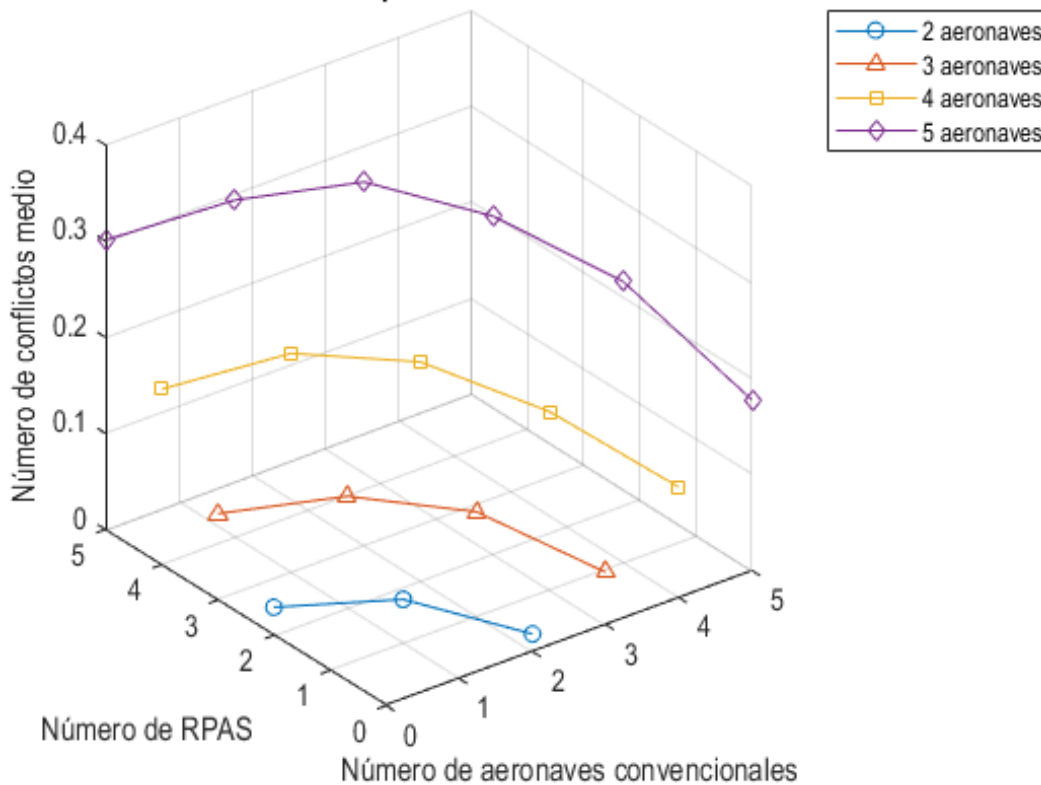


Ilustración 15. Evolución en el número de conflictos medio para un número de aeronaves constante.

Puede observarse una tendencia de parábola invertida en lo que a evolución en el número de conflictos medio se refiere. Dicha característica ya fue advertida anteriormente cuando se realizó el análisis de los resultados de la Tabla 19. A lo largo de los ejes del plano horizontal, el \bar{N}_c aumenta de forma exponencial aunque de manera más marcada para el caso de los RPAS. Entre estos valores, se unen mediante rectas el conjunto de datos intermedios, alcanzando sus puntos más altos en la parte central de las mismas. Estas configuraciones se corresponden a una mayor mezcla entre aeronaves convencionales y RPAS en las programaciones.

A continuación se incluye, en la Ilustración 16, la relación entre el número de simulaciones con conflictos para un valor constante de 4 aeronaves convencionales y un número cambiante de RPAS en el sector LECMZGZ. Cada serie de valores de conflictos para un número fijo de RPAS se ha representado con un tipo de línea diferente, tal como expresa la leyenda en la gráfica.

Número de simulaciones con los conflictos indicados para 4 aeronaves convencionales según distribución aleatoria de tráfico

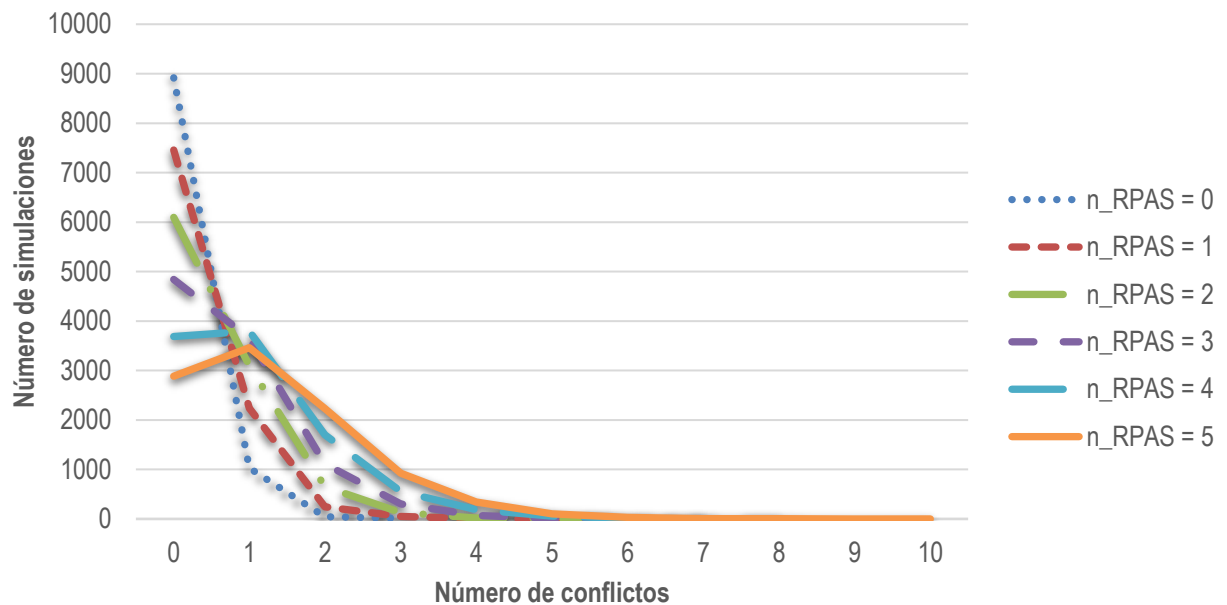


Ilustración 16. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 4 aeronaves convencionales aleatorias con distintos valores de RPAS.

Puede notificarse una tendencia clara en la evolución de las distintas series. A partir de un número elevado de conflictos, véase cinco, el número de simulaciones con conflictos es prácticamente cero. Sin embargo, cuando el número de conflictos por simulación es inferior a cinco, las series evolucionan sin una tendencia única. Para un número bajo de RPAS, hasta tres, el número de simulaciones con conflictos se reduce exponencialmente hasta llegar de manera rápida a la asíntota nula. En cambio, para un número elevado de RPAS (4 o 5), el número de simulaciones con conflictos aumenta entre los estados de cero conflictos y un conflicto. En cualquier caso, puede determinarse que, en la mayoría de series para un valor constante de 4 aeronaves convencionales, el número total de simulaciones con un conflicto se sitúa en torno a las 3500.

Se ha comenzado con el ejemplo de cuatro aeronaves convencionales constantes en el espacio aéreo por varios motivos. El primero de ellos es la heterogeneidad entre las distintas series que representan los distintos valores de RPAS. Así, puede verse cómo desde la evolución prácticamente lineal de aquellos casos con número bajo de RPAS se evoluciona hasta otros con una tendencia más suave o incluso creciente en sus inicios. Otro de los motivos es la presencia de cuatro aeronaves convencionales en la hora pico del sector en una operativa bajo parámetros reales de tráfico. Este análisis, mucho más en detalle, se realiza en el apartado siguiente (ver sección 7).

Utilizando las series de datos del número de conflictos correspondientes a un número de aeronaves convencionales constante, es posible obtener las mismas representaciones gráficas para todas las configuraciones. De este modo, las siguientes ilustraciones relacionan el número de simulaciones con

los conflictos indicados para un número fijo de aeronaves convencionales y distintos valores de RPAS. En la Ilustración 17 se muestra la evolución obtenida para 0 aeronaves convencionales y distintos RPAS aleatorios operando en el espacio aéreo LECMZGZ.

Número de simulaciones con los conflictos indicados para 0 aeronaves convencionales según distribución aleatoria de tráfico

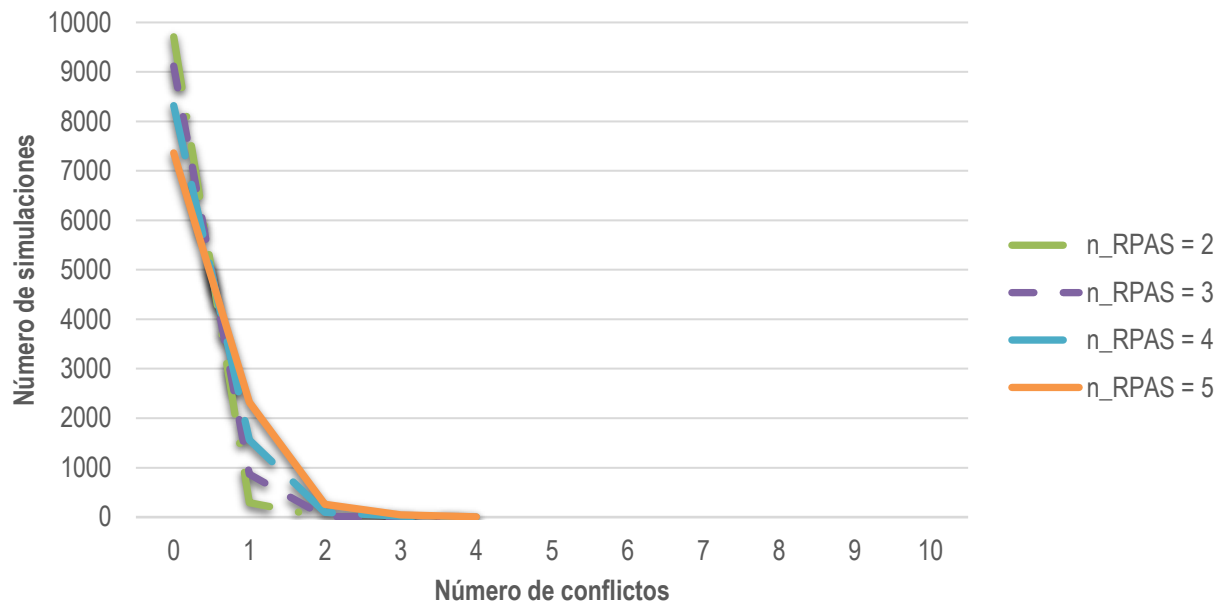


Ilustración 17. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 0 aeronaves convencionales aleatorias con distintos valores de RPAS.

El descenso entre número de conflictos 0 y 1 para todas ellas es linealmente descendente. A partir de ahí se produce una convergencia hacia la asíntota nula más o menos suave. En cualquier caso, con las cuatro configuraciones presentadas, el máximo número de conflictos en una simulación son cuatro (siendo posible contrastar con los valores de la Tabla 19). En el caso de que existiese una aeronave convencional en el espacio aéreo operando por una aerovía aleatoria, se genera una nueva representación. Ella viene mostrada según la Ilustración 18 donde se aprecia el número de simulaciones con los conflictos indicados para configuraciones de una aeronave convencional y distintos valores de RPAS.

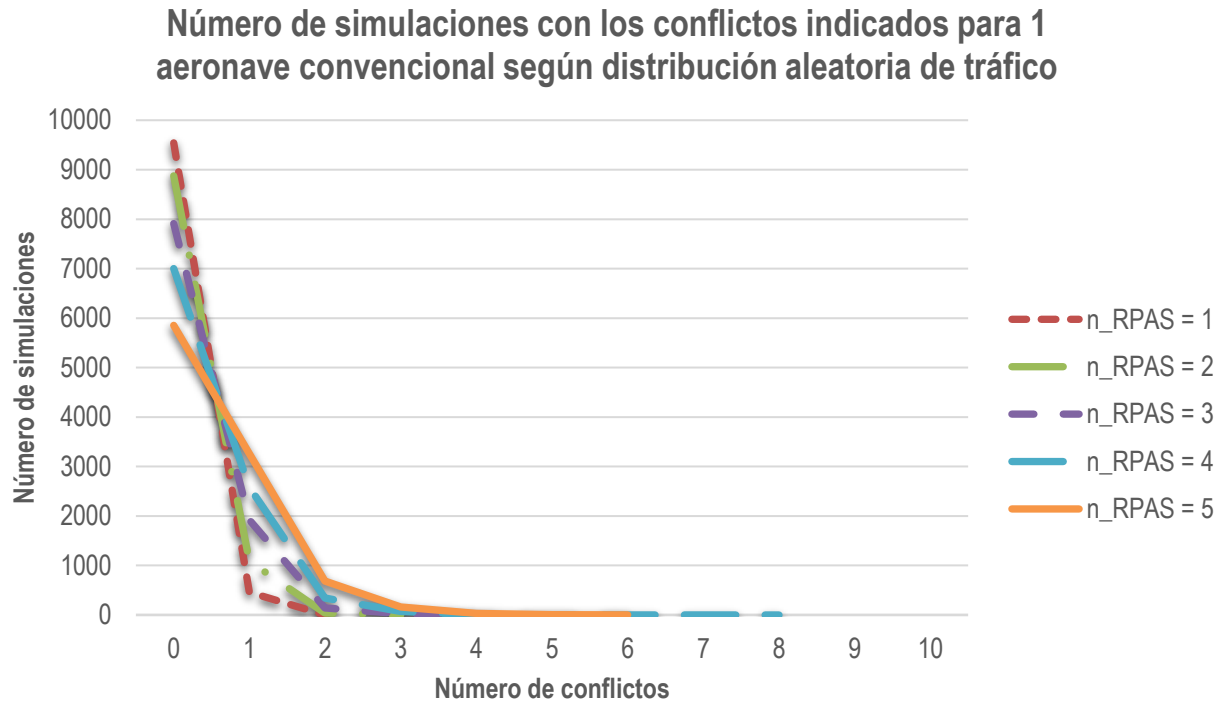


Ilustración 18. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 1 aeronave convencional aleatoria con distintos valores de RPAS.

La tendencia mayoritaria de las series continúa siendo descendente lineal. Sin embargo, la transición hacia la asíntota nula del N_c resulta menos abrupta para aquellos casos en los cuales un mayor número de RPAS integra la programación. Continuando con los casos de estudio, se plantea la posibilidad de que dos aeronaves convencionales operasen en el espacio aéreo. Esta representación de la evolución de las distintas series se acompaña en la Ilustración 19. En ella se muestra la evolución en el número de simulaciones con los conflictos indicados para dos aeronaves convencionales y distintos valores de RPAS.

Número de simulaciones con los conflictos indicados para 2 aeronaves convencionales según distribución aleatoria de tráfico

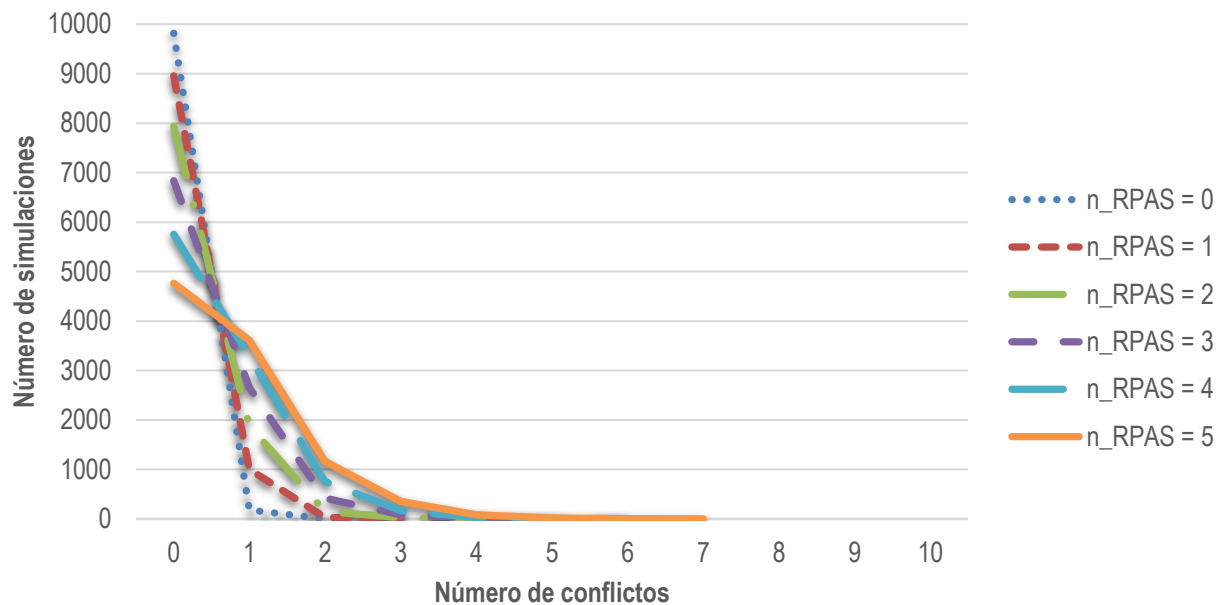


Ilustración 19. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 2 aeronaves convencionales aleatorias con distintos valores de RPAS.

Puede apreciarse cómo la serie lisa de color naranja se diferencia del resto. En ella, la tendencia presenta tres tramos hasta su convergencia a cero. En los tramos extremos el descenso no es muy pronunciado mientras que entre 1 y 2 conflictos la caída es más abrupta. El resto de series presenta la evolución hasta ahora predicha por lo que puede deducirse que la operación con un número elevado de RPAS ocasiona más simulaciones con número de conflictos cada vez más alto. El escenario inicial se modifica para la siguiente representación en caso de transitar por LECMZGZ tres aeronaves convencionales según distribución de tráfico aleatoria. Los resultados para estos conjuntos de datos, con distintos valores de RPAS, se recogen a continuación en la Ilustración 20.

Número de simulaciones con los conflictos indicados para 3 aeronaves convencionales según distribución aleatoria de tráfico

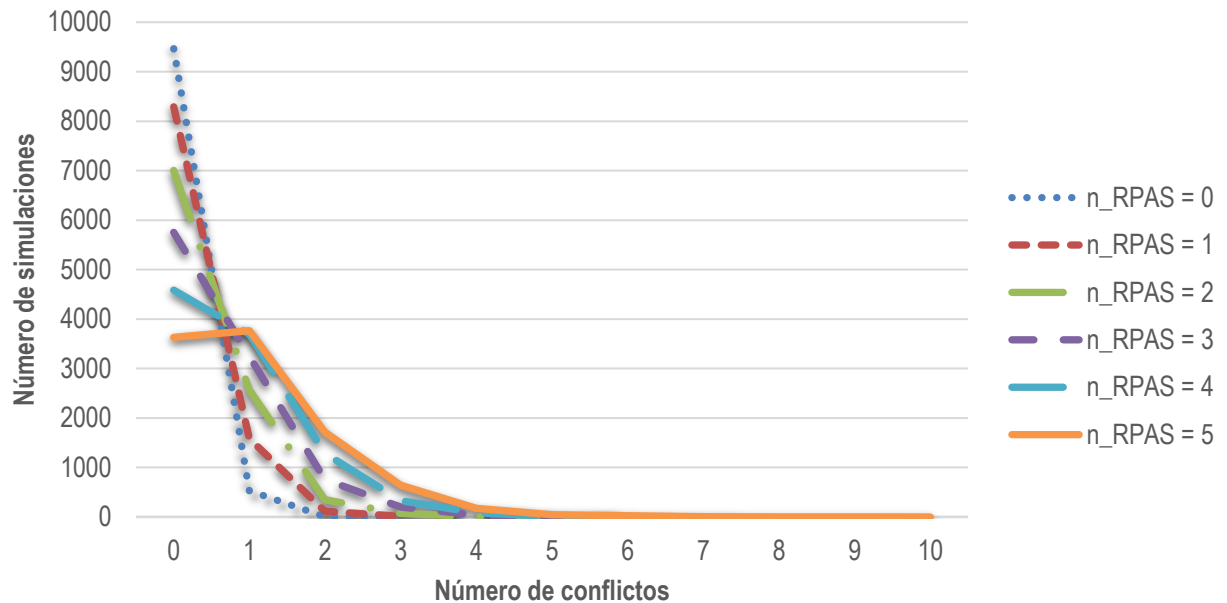


Ilustración 20. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 3 aeronaves convencionales aleatorias con distintos valores de RPAS.

La configuración de 3 aeronaves convencionales y 5 RPAS acaba por distinguirse del resto en esta representación. Su tendencia inicial al respecto del N_c no es descendente sino que se mantiene y llega incluso a crecer. De esta manera, existe una mayor probabilidad de sufrir un conflicto según esta distribución de aeronaves que de no sufrirlo. Acto seguido, los valores de conflicto sí retornan a cero de una manera suave, pero es necesario destacar esta característica particular inicial. El resto de series continúa presentando un número de conflictos nulo cada vez más bajo, siendo sus descensos menos pronunciados. El caso de cuatro aeronaves convencionales ya había sido expuesto anteriormente, por lo cual se avanza a las últimas configuraciones consideradas. Ellas pasan por la introducción de distintos valores de RPAS sobre programaciones aleatorias de cinco aeronaves convencionales según se muestra en la Ilustración 21.

Número de simulaciones con los conflictos indicados para 5 aeronaves convencionales según distribución aleatoria de tráfico

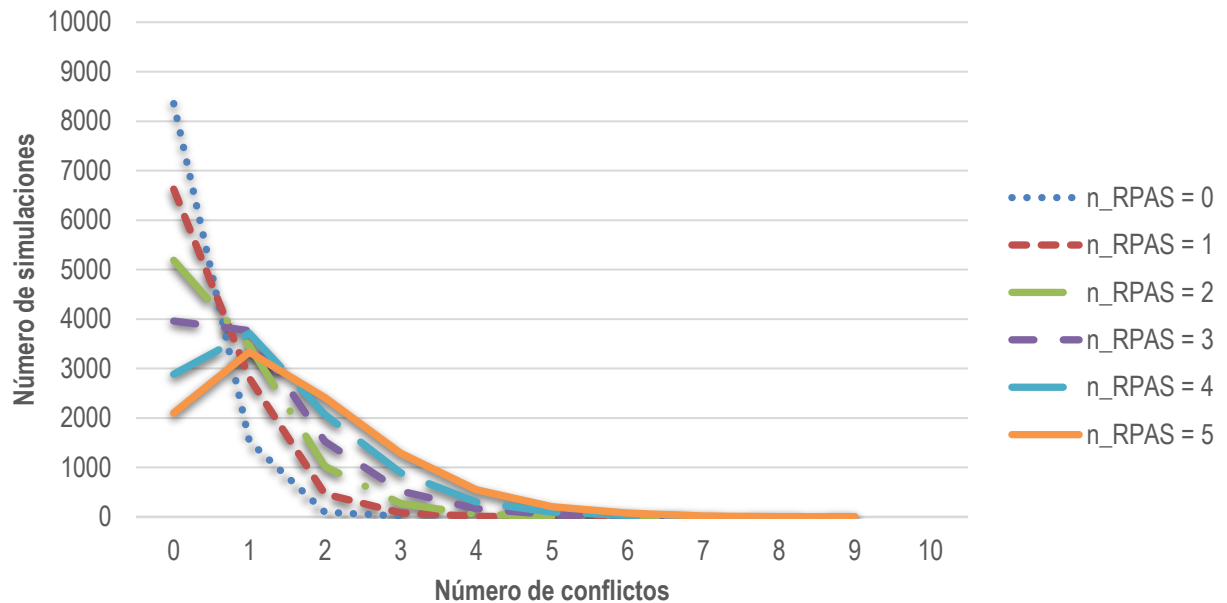


Ilustración 21. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 5 aeronaves convencionales aleatorias con distintos valores de RPAS.

Es posible identificar dos tendencias diferenciadas entre las series de datos. Para un número bajo de RPAS, hasta tres, la evolución en el número de conflictos es descendente de manera lineal cuando el número de conflictos es bajo. Sin embargo, a partir de tres RPAS y hasta cinco, la complejidad del espacio aéreo se vuelve superior pudiendo encontrarse más simulaciones con conflictos que sin ellos. La evolución en el número de conflictos es inicialmente creciente o mantenida para, después, descender hacia valores nulos como el conjunto de todas ellas. Nuevamente y, como ocurriese con el ejemplo de 4 aeronaves convencionales y distintos valores de RPAS, existe un punto crítico en torno a 3.500 simulaciones con un conflicto

El estudio para el primer indicador, relativo al número de conflictos, puede finalizarse con la representación de los conflictos detectados para un número de aeronaves constante. De este modo, se genera una figura cuyos ejes son similares a los anteriores pero la información consignada corresponde a configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS. El número de simulaciones con los conflictos indicados es expresado, para programaciones de aeronaves cuyo número total es 4 según distribución de tráfico aleatoria en la Ilustración 22.

Número de simulaciones con los conflictos indicados para un total de 4 aeronaves constantes según distribución de tráfico aleatoria

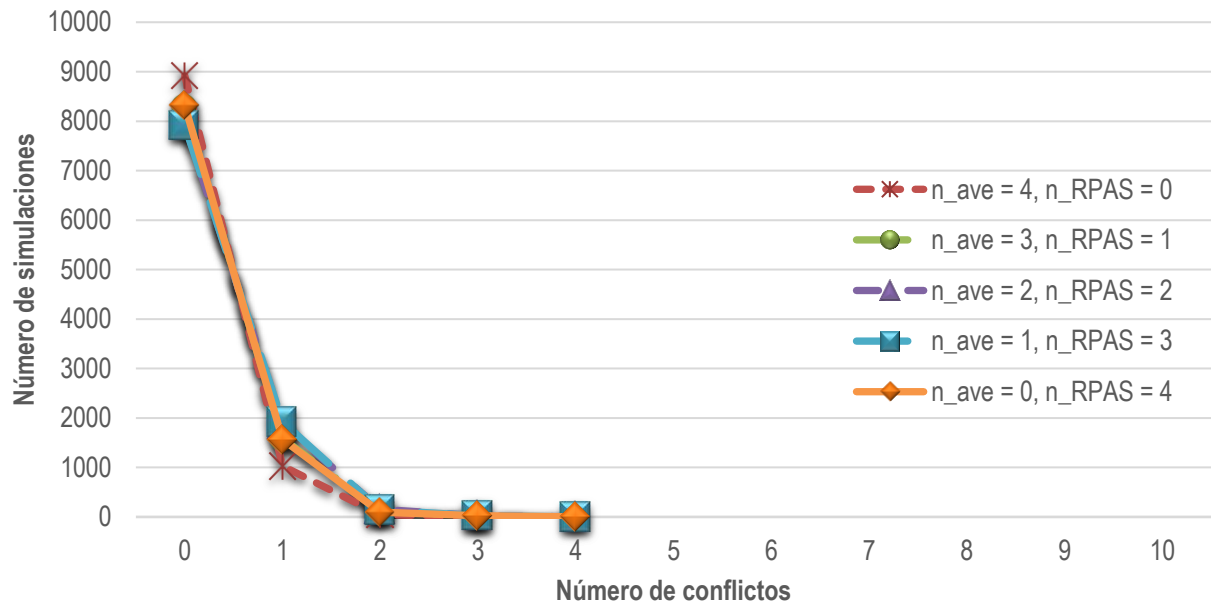


Ilustración 22. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 4 aeronaves constantes según distribución de tráfico aleatoria.

A simple vista, el número de simulaciones con los conflictos indicados para cada configuración de aeronaves convencionales y RPAS parece relativamente semejante entre todas las series de datos. Ello indica que, independientemente del tipo de aeronave que integre la programación, se obtienen valores parecidos al respecto del indicador N_c . No obstante, y puesto que el eje vertical queda subdividido cada 1.000 simulaciones, sí se aprecian diferencias para valores nulos o unidad de conflictos detectados. Así, entre la serie de datos inferior y superior para simulaciones con 0 conflictos existe un espacio de aproximadamente 1.000 conflictos, lo cual constituiría una posibilidad de un 10% superior de sufrir un conflicto en función de la configuración de aeronaves convencionales y RPAS seguida.

6.1.2 Tiempo de exposición (τ_{exp})

El segundo indicador obtenido es el referido al tiempo de exposición a un conflicto por parte de una aeronave en tránsito por el sector LECMZGZ. Con él se busca relacionar el tiempo en el cual una aeronave se encuentra expuesta a un conflicto respecto a la hora de estudio considerada. La definición del indicador y su correspondiente ecuación se realizó en el apartado 5.3.

Para este indicador se ha obtenido la siguiente tabla de resultados. En ella y, para cada configuración de aeronaves convencionales y RPAS volando por aerovías aleatorias del espacio aéreo LECMZGZ, se han calculado los valores del indicador de tiempo de exposición a los conflictos. Los resultados obtenidos para cada una de las 33 simulaciones realizadas son los que se detallan en la Tabla 21.

Tabla 21. τ_{exp} para cada configuración de aeronaves convencionales y RPAS.

Aeronaves convencionales	RPAS					
	0	1	2	3	4	5
0	0	0	0,0914	0,2655	0,5048	0,8080
1	0	0,0712	0,2226	0,4540	0,7345	1,0896
2	0,0508	0,1839	0,3976	0,6685	0,9984	1,3860
3	0,1470	0,3372	0,5965	0,9114	1,2929	1,6936
4	0,2808	0,5280	0,8244	1,1949	1,5856	2,0304
5	0,4475	0,7362	1,0843	1,4720	1,8945	2,3730

Las principales conclusiones que se pueden obtener son:

- Conforme aumenta el número de aeronaves en el sector, bien convencionales o RPAS, lo hace el indicador de tiempo de exposición a los conflictos. Este comportamiento es el mismo que el presentado por el indicador \bar{N}_c en la tabla anterior. Sin embargo, la evolución a lo largo de las diagonales es lineal y no parabólica, lo cual implica una importante diferencia respecto a los dos conjuntos de resultados.
- La comparación entre un mismo número de aeronaves convencionales y de RPAS es superior para el primero de los casos. Aun así, no presenta diferencias tan evidentes como ocurriese con el caso del indicador de número de conflictos. En este caso, la relación entre configuraciones del mismo número de RPAS frente al mismo número de aeronaves convencionales supone un aumento en torno al 80%. Resulta, pues, un aumento superior en relación al número de conflictos (60%).

Para las distintas aeronaves convencionales involucradas en una programación con RPAS, puede evaluarse la tendencia esperada del tiempo de exposición unitaria a los conflictos. La Ilustración 23 relaciona los valores obtenidos según la Tabla 21 en función del número de aeronaves convencionales (denominado "n_ave") y el de RPAS. Así, se representa gráficamente la evolución del segundo indicador para las distintas series de datos simuladas.

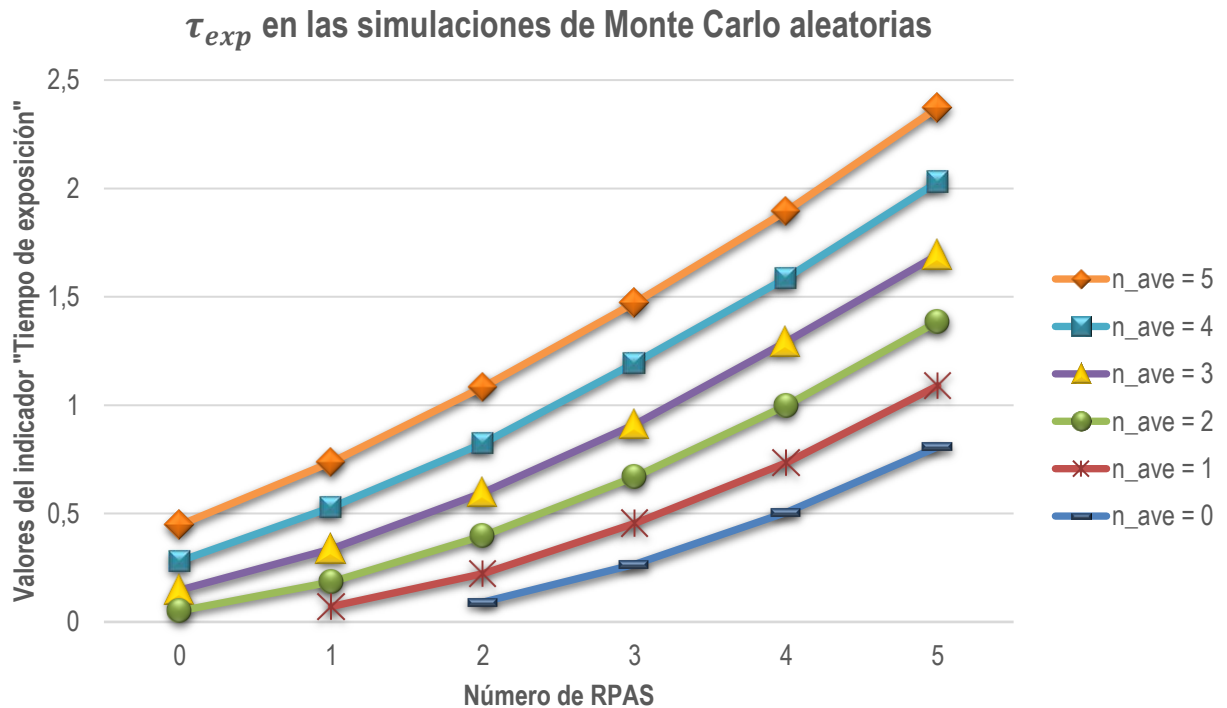


Ilustración 23. Evolución de τ_{exp} para cada configuración de aeronaves convencionales y RPAS.

Las líneas de tendencia presentan una evolución exponencial. Este hecho repite la tendencia en la evolución en el número de conflictos (ver Ilustración 14) donde las series de datos divergían desde su estado inicial. En este caso los valores obtenidos presentan un avance más rectilíneo y uniforme. Las series de datos correspondientes a ninguna o una aeronave convencional se encuentran incompletas para los valores de cero o un RPAS al no integrar las programaciones aeronaves suficientes como para la generación de conflictos.

Resulta posible realizar una traslación de estos resultados desde el plano a un espacio tridimensional. El objetivo no es representar series de datos para aeronaves convencionales constantes sino para el número de aeronaves de una programación constante. Ello involucra tanto a RPAS como a aeronaves convencionales. Este proceso fue desarrollado previamente al final del apartado 6.1.1 para el indicador \bar{N}_c y ahora es repetido para τ_{exp} . Se genera un espacio ortogonal cuyos ejes horizontales corresponden al número de aeronaves convencionales y número de RPAS de una configuración, respectivamente. Sobre este plano se distribuyen los valores del indicador τ_{exp} de modo que quedan unidos mediante rectas aquellos puntos en el espacio en los cuales el número total de aeronaves es el mismo. La representación se ha realizado para un número fijo de aeronaves entre 2 y 5, quedando mostrados los resultados para la evolución del τ_{exp} por número constante de aeronaves en la Ilustración 24.

Tiempo de exposición por número constante de aeronaves

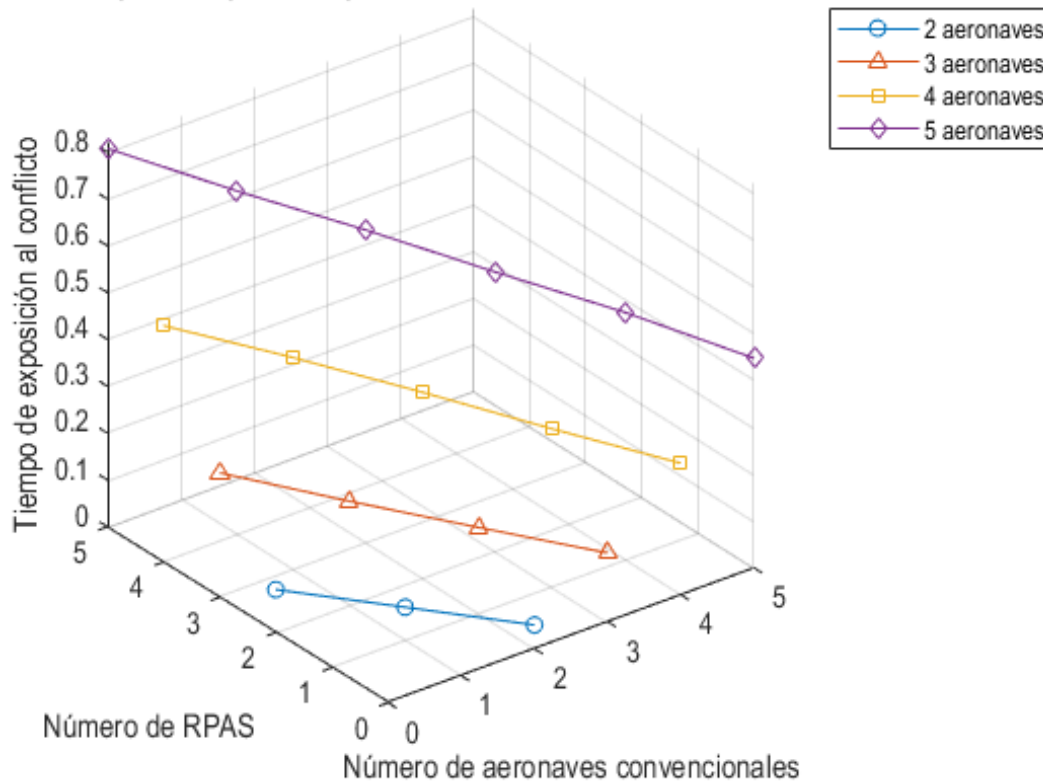


Ilustración 24. Evolución de τ_{exp} para un número de aeronaves constante.

El tiempo de exposición al conflicto expresado de manera adimensional evoluciona según series de datos linealmente descendentes para un número de aeronaves constante desde las configuraciones que exclusivamente integran RPAS. Por tanto, se considera que dichas programaciones suponen las que mayor riesgo operativo implican sobre el sector LECMZGZ. Por el contrario, las configuraciones de sólo aeronaves convencionales son aquellas que menores tiempos de exposición al conflicto presentan, para un número constante de aeronaves. El conjunto de datos intermedios sigue una tendencia lineal, disminuyendo el tiempo de exposición conforme más aeronaves convencionales definen una programación. En un nivel comparativo, se produce una diferencia evidente respecto a la figura tridimensional similar obtenida para el indicador $\overline{N_c}$ (ver Ilustración 15). En ella, la evolución desde aquellos valores correspondientes a únicamente RPAS era primero ascendente para después descender según una parábola. En el caso de τ_{exp} se obtiene el mencionado descenso lineal, de manera más homogénea, para las series de datos donde se mantiene constante el número de aeronaves.

6.1.3 Tiempo medio de duración de conflictos ($\overline{\tau_{con}}$)

De manera adicional al cálculo de conflictos en cada una de las iteraciones de las diez mil simulaciones por cada configuración, también se ha extraído de las simulaciones el tiempo medio de duración de los conflictos. De esta manera, se contabilizan los segundos totales en los cuales y para cada pareja de

aeronaves se está produciendo una vulneración en las mínimas de separación y se promedia por cada una de las 10.000 simulaciones realizadas. Para el espacio aéreo LECMZGZ esto significa la media en segundos en los que la distancia mínima entre cada par de aeronaves es inferior a la S_{min} de 5 MN. Los valores medios obtenidos del tiempo en segundos en el cual las aeronaves se encuentran en conflicto, para cada configuración de aeronaves convencionales y RPAS, se incluyen en la Tabla 22.

Tabla 22. $\overline{\tau_{con}}$ (s) para cada configuración de aeronaves convencionales y RPAS.

Aeronaves convencionales	RPAS					
	0	1	2	3	4	5
0	0	0	7,6599	25,7778	51,5670	84,7879
1	0	4,7779	17,4002	41,9930	69,5251	106,7457
2	2,3684	12,5124	30,1370	57,5381	88,6979	133,4598
3	8,2294	21,5077	44,0986	76,4192	113,9855	162,8739
4	17,2571	35,6487	60,8313	95,7930	141,8414	193,0940
5	27,0617	51,3651	84,2357	121,6305	167,6686	226,8594

Las principales conclusiones que se obtienen son similares a las obtenidas para los indicadores anteriores:

- El tiempo medio de duración de conflictos en aquellas configuraciones que únicamente integran RPAS es superior al tiempo de duración de conflictos de aquellas configuraciones que únicamente integran aeronaves convencionales. Véase que, por ejemplo, para un número de 2 RPAS la media de duración de sus conflictos es 300% superior a si se tratase de 2 aeronaves convencionales.
- En cambio, para el mismo número de 2 aeronaves, en caso de tratarse de 1 convencional y 1 RPAS, el tiempo medio de los conflictos supone el 200% frente a una configuración de 2 aeronaves convencionales. Con objeto de comparar la relación entre los tiempos medios de conflicto de aeronaves convencionales exclusivamente y RPAS exclusivamente, se acompaña la Tabla 23.

Tabla 23. Relación entre $\overline{\tau_{con}}$ para el mismo número de aeronaves del mismo tipo.

Nº Conv.	Nº RPAS	$\overline{\tau_{con}}$ (s)	Relación entre tiempos de duración
2	0	2,3684	3,234
0	2	7,6599	
3	0	8,2294	3,132
0	3	25,7778	
4	0	17,2571	2,988
0	4	51,5670	
5	0	27,0617	3,133
0	5	84,7879	

En esta tabla puede observarse cómo, para cada par de filas que cuentan con el mismo número de aeronaves en su configuración, el tiempo medio de duración de los conflictos para únicamente RPAS es siempre superior a su homólogo de aeronaves convencionales. Estableciendo una relación directa entre los valores de tiempo para el mismo número de dispositivos, se obtiene la magnitud adimensional recogida en la última columna. Ésta se sitúa en torno a una duración media del conflicto tres veces superior si se produce en una programación integrada exclusivamente por RPAS frente a si se produjese entre aeronaves convencionales.

Partiendo del escenario base actual en el cual el tráfico por el sector LECMZGZ está constituido exclusivamente por aeronaves convencionales, va a evaluarse cuál es el perjuicio en la introducción de una nueva aeronave para cada caso. En primer lugar, se evalúa la afección de añadir aeronaves convencionales sobre otras aeronaves convencionales. Para cada par de filas se expresa una magnitud adimensional que relaciona los tiempos medios de conflicto con la aeronave ya añadida frente al total de tiempo previo, sin ella. Estos resultados, fruto de añadir sucesivamente una aeronave convencional en una programación con sólo aeronaves convencionales, se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24. Relación entre $\overline{\tau}_{con}$ cuando se introduce sucesivamente una aeronave convencional frente a 0 RPAS.

Nº Conv.	Nº RPAS	$\overline{\tau}_{con}$ (s)	Relación entre tiempos de duración
2	0	2,3684	3,475
3	0	8,2294	
3	0	8,2294	2,097
4	0	17,2571	
4	0	17,2571	1,568
5	0	27,0617	

Se aprecia que, a cada nueva aeronave convencional incluida, la relación entre tiempos medios de duración de los conflictos es menor. Pasar de dos a tres aeronaves convencionales en el espacio aéreo supone triplicar los tiempos de duración. Para el caso, incluir una nueva aeronave convencional (de dos a tres) es tanto o más perjudicial que sustituir el número de aeronaves convencionales por RPAS, si se compara con los resultados de la Tabla 23. No obstante, cuantas más aeronaves convencionales se introducen, menor acaba siendo la relación entre tiempos de conflicto, reduciéndose hasta sólo el aumento de un 50% en tiempo al pasar de cuatro a cinco.

Una ligera variación en el caso de estudio frente al escenario base donde la programación se conforma exclusivamente por aeronaves convencionales sería la introducción de RPAS en dicha programación. De este modo, para un número predeterminado de aeronaves convencionales, se evalúa la relación entre la duración de los tiempos de conflicto al incluir un RPAS. El conjunto de estos resultados se expresa en la Tabla 25, añadiendo 1 RPAS sobre programaciones constituidas únicamente por aeronaves convencionales desde un número de dos hasta cinco.

Tabla 25. Relación entre $\overline{\tau}_{con}$ cuando se introduce un RPAS en programaciones exclusivamente conformadas por aeronaves convencionales.

Nº Conv.	Nº RPAS	$\overline{\tau}_{con}$ (s)	Relación entre tiempos de duración
2	0	2,3684	5,283
2	1	12,5124	
3	0	8,2294	2,613
3	1	21,5077	
4	0	17,2571	2,066
4	1	35,6487	
5	0	27,0617	1,898
5	1	51,3561	

Los resultados de integrar RPAS en programaciones de aeronaves convencionales del espacio aéreo LECMZGZ ofrecen las siguientes conclusiones:

- Se determina que resulta menos ventajoso introducir un RPAS que una aeronave convencional, en contraste entre los datos de la Tabla 24 y la Tabla 25. Así, pasar de dos a tres aeronaves convencionales suponía triplicar los tiempos medios de duración de conflicto. En cambio, pasar de dos aeronaves convencionales a dos aeronaves convencionales y un RPAS supone quintuplicar la relación entre tiempos medios de duración del conflicto.
- El resultado anterior también viene influido por otra característica anteriormente comentada como es la similitud entre el número de aeronaves convencionales y RPAS. Para estos casos, como el que ahora ocupa el estudio (dos aeronaves y un RPAS), los conflictos detectados y su duración media son más significativos que cuando su número es menos parejo.
- Consecuentemente, las relaciones entre tiempos de duración se alejan conforme más aeronaves convencionales transitan por el sector si se añade un RPAS sobre ellas. Se alcanza un valor de aproximadamente el doble de duración en los tiempos al añadir un RPAS. En contraste entre las dos tablas anteriores pasar de cuatro a cinco aeronaves convencionales suponía aumentar un 50% el tiempo medio de conflictos. En este caso de estudio, introducir un RPAS sobre esas cuatro aeronaves convencionales supone aumentar un 100% los tiempos de conflicto totales en el sector.

Puede adjuntarse una tabla resumen donde se evalúe la afcción sobre el estado del espacio aéreo al introducir un tipo determinado de aeronave. Los resultados de integrar RPAS en programaciones de aeronaves convencionales se desarrollan de manera separada en el 0. De este modo, para cada caso,

se tiene una programación conformada exclusivamente por un tipo de aeronave. Sobre ella se añade una nueva aeronave y se contrasta la nueva relación entre los tiempos medios de duración de los conflictos. Así, los resultados de integrar una nueva aeronave más, bien sobre dos aeronaves convencionales, o bien sobre dos RPAS, son los recogidos en la Tabla 26.

Tabla 26. Relación entre $\overline{\tau}_{con}$ cuando se introduce una aeronave en programaciones exclusivamente conformadas por dos aeronaves del mismo tipo.

N° Conv.	N° RPAS	Configuración original	Relación entre tiempos de duración
		Configuración nueva	
2	0	Convencionales	3,475
3	0	Convencionales + 1 Convencional	
2	0	Convencionales	5,283
2	1	Convencionales + 1 RPAS	
0	2	RPAS	2,272
1	2	1 Convencional + RPAS	
0	2	RPAS	3,365
0	3	RPAS + 1 RPAS	

Pueden confirmarse las conclusiones anteriormente obtenidas. La situación más perjudicial en términos de tiempo de conflicto es la integración de un RPAS en una programación de aeronaves convencionales. Con ello la relación entre la duración de los tiempos medios de conflicto aumenta en un factor cinco. Por otra parte, resulta casi indiferente atendiendo a los datos, añadir aeronaves del mismo tipo a programaciones de aeronaves de ese mismo tipo. Ampliando una programación de aeronaves convencionales con más aeronaves convencionales incrementa en un factor superior a tres la relación entre tiempos de duración de conflicto. Igualmente ocurre si se amplía una programación de únicamente RPAS con más RPAS. Por último, introducir una aeronave convencional sobre una programación de dos RPAS supone el caso que menor afección en la duración de los conflictos introduce de todos aquellos presentados.

Las principales conclusiones obtenidas del análisis del indicador $\overline{\tau}_{con}$ son las siguientes:

- El tiempo medio de duración de conflictos en aquellas configuraciones que únicamente integran RPAS es superior al tiempo medio de duración de conflictos de aquellas configuraciones que únicamente integran aeronaves convencionales.
- Para configuraciones con igual número de aeronaves, el tiempo de duración de conflictos es tanto mayor cuanto más RPAS integren la programación de aeronaves. Principalmente esto es

consecuencia de la velocidad asociada al RPAS, que por sus características operativas difiere de la velocidad propia de las aeronaves convencionales.

- Los tiempos de duración del conflicto son tres veces superiores si se produce en una programación conformada exclusivamente por RPAS frente a si se produjese entre aeronaves convencionales.
- Conforme se añaden más aeronaves a una programación, independientemente de su configuración, la relación entre los tiempos de conflicto disminuye hasta acercarse a un factor unidad. Este valor supone el límite puesto que infringirlo supondría una reducción en la duración media de los tiempos de conflicto pese a la introducción de más aeronaves en el espacio aéreo.
- Pasar de dos a tres aeronaves convencionales implica un aumento en la duración de los tiempos de conflicto totales de un 250%. En cambio, pasar de cuatro a cinco aeronaves convencionales supone aumentar la duración de los tiempos de conflicto en un 50%.
- Introducir un RPAS en una programación de dos aeronaves convencionales implica un aumento en la duración de los tiempos de conflicto totales de más de un 400%. Introducir un RPAS en una programación de cinco aeronaves convencionales supone un aumento en la duración de tiempos de conflicto inferior al 90%.
- En términos generales, la introducción de RPAS sobre programaciones ya establecidas de aeronaves convencionales supone la configuración que peores ratios de tiempo genera. Esto constituye un claro perjuicio puesto que el objetivo del estudio es la integración de RPAS en espacios aéreos donde ya existen aeronaves convencionales.
- La configuración que genera valores más reducidos para las relaciones entre tiempos de conflicto es aquella en la que se introducen aeronaves convencionales sobre una programación ya definida de RPAS. En el último de los casos simulados, añadir una aeronave convencional a una programación de cinco RPAS aumentaba la duración media de tiempos de conflicto en sólo un 25%.
- Cuanta más diversidad de aeronaves presenta el espacio aéreo, mejores relaciones entre tiempos de duración de conflictos se obtienen al añadir una aeronave más.

Antes de finalizar el apartado de resultados de las simulaciones de Monte Carlo aleatorias pueden relacionarse los valores de los dos últimos indicadores de seguridad, referidos a tiempos. De esta manera, expresando el tiempo de exposición total en segundos para todas las aeronaves, se procede a la comparación con el indicador $\overline{\tau}_{con}$. Fruto de su división se obtiene un nuevo indicador adimensional que expresa el tiempo en que una aeronave puede encontrarse en conflicto respecto de su tiempo de exposición al mismo. La representación gráfica, para cada configuración de aeronaves, se muestra en la Ilustración 25.

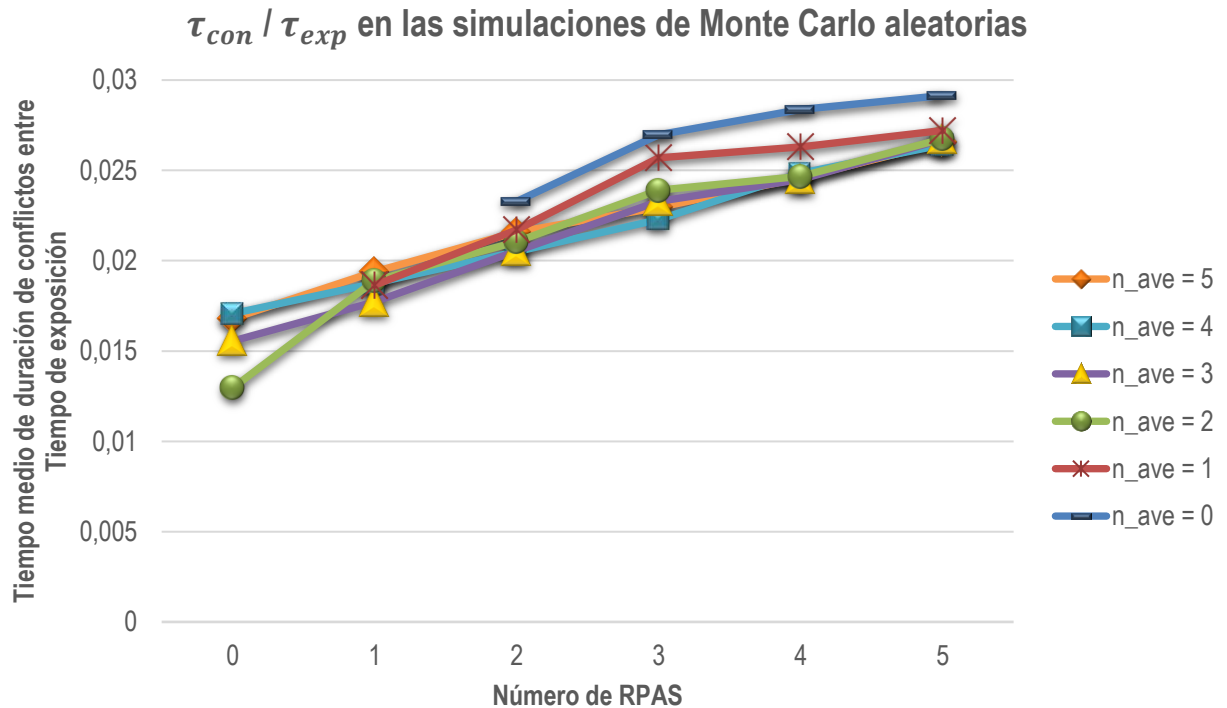


Ilustración 25. τ_{con} / τ_{exp} para cada configuración de aeronaves convencionales y RPAS.

Se aprecia cómo las series de datos convergen hacia un valor entre 0,025 y 0,03. Esto viene a significar que, del tiempo total en el cual una aeronave pueda verse expuesta a un conflicto, sólo en un 3% del mismo podría encontrarse en situación de conflicto. Por tanto, puede determinarse que en más del 97% de las ocasiones cada par de aeronaves se encuentra por encima de las mínimas de separación en el sector LECMZGZ. La tendencia es linealmente ascendente para todas las series, encontrándose las configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS más expuestas a un conflicto cuantos más aeronaves integren la programación.

6.2 Cuantificación del TLS

A la hora de evaluar el estado operativo del sector es preferible relacionar el número de RPAS frente al número de aeronaves convencionales. Este estudio permite contrastar la viabilidad de las operaciones de RPAS en un espacio aéreo no segregado mediante los indicadores de seguridad calculados. En este caso van a expresarse el número de conflictos para un determinado número de aeronaves convencionales en la operación conjunta con distintos valores de RPAS. En estudios anteriores quedó determinado que el flujo máximo de aeronaves convencionales en hora punta por el sector LECMZGZ era de cuatro vehículos. Esta va a suponer la referencia inicial para la integración de RPAS.

El TLS puede ser cuantificado de acuerdo a los indicadores de seguridad anteriormente expuestos. Para cada uno de ellos y en las simulaciones realizadas se han obtenido sus valores particulares. El objetivo en este apartado es determinar aquellos límites, en concreto, que van a restringir la introducción de RPAS en el espacio aéreo LECMZGZ. Para ello y, como ha sido introducido al comienzo de este apartado, se conoce que el flujo máximo de aeronaves en el volumen considerado y en su hora pico es de cuatro aeronaves convencionales. Por tanto, los valores de los indicadores de seguridad correspondientes a la configuración de cuatro aeronaves convencionales y ningún RPAS son los mostrados según la Tabla 27.

Tabla 27. Valor de los indicadores de seguridad para la cuantificación del TLS en las simulaciones de Monte Carlo aleatorias.

Indicadores de seguridad para la cuantificación del TLS				
Nº Conv.	Nº RPAS	$\overline{N_c}$	τ_{exp}	$\overline{\tau_{con}}$
4	0	0,1149	0,2808	17,2571

En el siguiente apartado se acompaña el análisis realizado sobre estos valores de TLS. Para cada uno de ellos va a realizarse un estudio individualizado con intención de conocer el comportamiento del indicador en las simulaciones realizadas. Ello va a permitir conocer cuáles son las configuraciones que menor riesgo de conflicto presentan y las más adecuadas en términos de riesgo para la introducción de RPAS en el espacio aéreo LECMZGZ.

6.3 Restricciones al número de RPAS

Los resultados globales obtenidos van a ser comparados con los distintos valores de TLS determinados anteriormente. El objetivo es establecer restricciones a la introducción de RPAS en el espacio aéreo LECMZGZ. Para ello se representa sobre las tablas de los tres indicadores de seguridad un código de colores que evalúa la viabilidad de los indicadores según se permita o no operar a los RPAS. El significado de cada uno de los colores en las tablas es el que sigue:

- **Blanco:** indica el valor del TLS. Supone la referencia respecto a la cual son evaluados el resto de resultados obtenidos. Constituye, a su vez, el factor limitante para la operación de distintas configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS.
- **Verde:** indica las configuraciones, con su valor respecto al TLS, que pueden operar en el espacio aéreo LECMZGZ. Dicha operación queda condicionada a realizarse bajo unos márgenes de seguridad que son fijados por el TLS.
- **Rojo:** indica las configuraciones de aeronaves y su valor obtenido que no permiten la operación segura en el interior del sector. Estas casillas sobrepasan el límite marcado por el TLS, por lo cual su operación no resultaría segura.
- **Amarillo:** indica las configuraciones de aeronaves que, pese a sobrepasar el TLS, no lo hacen de manera grave, sino que se sitúan en su propio orden de magnitud. Sobre estas casillas habría de realizar un análisis particular para evaluar si la operación podría realizarse pese a infringir de manera leve el TLS.

El número de conflictos medio va a compararse con su propio TLS determinado anteriormente. Ha sido cuantificado un valor límite de $\overline{N}_c = 0,1149$ en la hora de operación evaluada por cada simulación de Monte Carlo (representado, como se ha comentado, en la celda de fondo blanco). De esta manera, si una configuración de aeronaves convencionales y RPAS excede este valor, no es posible garantizar la seguridad de las operaciones en el sector LECMZGZ (representado en celdas con fondo rojo). Por el contrario, si el valor del número de conflictos obtenido es inferior a ese límite, se permite la integración de RPAS según la configuración correspondiente (señalado en las celdas con fondo verde). Las configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS restringidas y permitidas en función del indicador de seguridad \overline{N}_c se muestran en la Tabla 28.

Tabla 28. Restricciones a la operación de configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS según \overline{N}_c .

Aeronaves convencionales	RPAS				
	0	1	2	3	4
0	0	0	0,0291	0,0898	0,1827
1	0	0,0458	0,1164	0,2284	
2	0,0183	0,1088	0,2281		
3	0,0544	0,1849			
4	0,1149	0,2925			
5	0,1774				

Existen seis configuraciones con más de una aeronave entre aeronaves convencionales y RPAS que permiten la integración de los segundos en el espacio aéreo LECMZGZ conforme al indicador \overline{N}_c . Todas ellas involucran tres aeronaves, o menos, en el número total de su programación. Ello es debido a que la configuración exclusivamente formada por cuatro aeronaves convencionales es la que menor valor del indicador número de conflictos presenta para un número de aeronaves totales igual a cuatro. Las principales conclusiones del análisis de estos resultados son las siguientes:

- Dos de las configuraciones permitidas están íntegramente conformadas por aeronaves convencionales. Ellas corresponden a dos o tres aeronaves desarrollando su operación en el sector. Esta solución es trivial ya que el TLS venía determinado por la configuración de cuatro aeronaves convencionales, por lo que se entiende que un número inferior de las mismas supone un riesgo inferior en LECMZGZ.
- Dos de las configuraciones permitidas están íntegramente conformadas por RPAS. Presentan una coincidencia en número de aeronaves con las dos configuraciones anteriormente expuestas. Pese a que el número de conflictos sea más elevado que sus configuraciones homólogas de aeronaves convencionales, no alcanzan el valor del TLS. De esta manera, también es permitida la operación bien de dos RPAS en solitario o bien de tres RPAS en el sector LECMZGZ.
- Las dos configuraciones restantes permitidas integran la operación conjunta de RPAS y aeronaves convencionales. Ellas son las correspondientes a una aeronave convencional y un RPAS o, por otra parte, dos aeronaves convencionales y un RPAS. Se garantiza la seguridad de sus tránsitos en el espacio aéreo LECMZGZ al no alcanzarse el valor del TLS.
- Una configuración adicional, con una aeronave convencional y dos RPAS, excede por únicamente 15 conflictos el valor del TLS. Respecto del valor de referencia, ello supone un incremento de poco más del 1%. En el ámbito de estudio con 10.000 simulaciones realizadas

este resultado no parece sobredimensionado, por lo que se evalúa respecto a otros TLS esta configuración en particular.

Continuando con el segundo indicador de seguridad definido, τ_{exp} , se obtiene la siguiente tabla de resultados. Ésta presenta un formato similar al utilizado en la anterior, distinguiendo en casillas de diferente color aquellas configuraciones de aeronaves que pueden operar en el sector y aquellas que no. El valor del TLS definido en este análisis es de $\tau_{exp} = 0,2808$, representando en la Tabla 29 las configuraciones de aeronaves restringidas para la operación.

Tabla 29. Restricciones a la operación de configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS según τ_{exp} .

Aeronaves convencionales	RPAS				
	0	1	2	3	4
0	0	0	0,0914	0,2655	0,5048
1	0	0,0712	0,2226	0,4540	
2	0,0508	0,1839	0,3976		
3	0,1470	0,3372			
4	0,2808	0,5280			
5	0,4475				

Existen siete configuraciones con más de una aeronave entre aeronaves convencionales y RPAS que permiten la operación no segregada en el espacio aéreo LECMZGZ conforme al indicador τ_{exp} . Esto supone un aumento de los casos posibles respecto al análisis anterior añadiendo una de las configuraciones. Las características que presentan los flujos seguros identificados en este análisis son las siguientes:

- Es confirmada la configuración de una aeronave convencional y dos RPAS. Según este indicador, el tiempo de exposición resultaría inferior al del TLS determinado por las cuatro aeronaves convencionales pese a que el número de conflictos aumenta según \overline{N}_c .
- El resto de configuraciones permitidas se mantienen, para todos los casos. Con ello, para este indicador y el anterior, puede observarse la tendencia en las simulaciones que pueden permitir la introducción de RPAS en el espacio aéreo LECMZGZ.

Finalmente se realiza el análisis para el indicador $\overline{\tau}_{con}$, obteniéndose la siguiente tabla. En ella se relacionan los valores del tiempo medio de duración de los conflictos con el TLS determinado por la configuración de cuatro aeronaves convencionales y ningún RPAS. Su valor es de $\overline{\tau}_{con} = 17,2571$. Las configuraciones permitidas, que no exceden dicho límite operativo, se representan en las casillas

con fondo verde de la Tabla 30.

Tabla 30. Restricciones a la operación de configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS según $\overline{\tau_{con}}$.

Aeronaves convencionales	RPAS			
	0	1	2	3
0	0	0	7,6599	25,7778
1	0	4,7779	17,4002	41,9930
2	2,3684	12,5124	30,1370	
3	8,2294	21,5077		
4	17,2571	35,6487		
5	27,0617			

Existen cinco configuraciones entre aeronaves convencionales y RPAS que permiten una operación segura respecto al TLS del $\overline{\tau_{con}}$. Ello supone una reducción de casos respecto al indicador anteriormente analizado. Las conclusiones del análisis de esta tabla son las que ahora se desarrollan:

- Sólo una de las configuraciones está integrada exclusivamente por RPAS, siendo su número total igual a dos. Esto es debido a la influencia que presenta la velocidad de estas aeronaves en el cálculo del indicador. Por sus características operativas, los RPAS son más lentos que las aeronaves convencionales, lo cual provoca que su exposición y tiempo de conflicto sean mayores.
- Dos de las configuraciones son las correspondientes a un número inferior de aeronaves convencionales, sin integración de RPAS, respecto a la programación de aeronaves original que determinó el TLS. Para todos los indicadores, y en una operativa real, es posible la operación en el espacio aéreo LECMZGZ de dos o tres aeronaves convencionales en solitario.
- Dos de las configuraciones integran conjuntamente aeronaves convencionales y RPAS. Ellas son las correspondientes a una aeronave convencional y un RPAS, así como la de dos aeronaves convencionales y un RPAS. Igualmente, a los casos anteriores, estas dos configuraciones se mantienen durante los tres indicadores analizados. Esta situación da cuenta de la posibilidad de operación en este espacio aéreo de manera no segregada entre aeronaves convencionales y RPAS.

En conclusión, se han contrastado los resultados obtenidos para los tres indicadores de seguridad. Cinco de las configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS cumplen los valores de TLS definidos por la programación de referencia mientras que otra de ellas genera dudas por su cercanía al valor del TLS. A modo de resumen, se incluyen en la Tabla 31 aquellas configuraciones que permiten la operación de

aeronaves convencionales y RPAS de manera segura en el espacio aéreo LECMZGZ.

Tabla 31. Configuraciones permitidas de aeronaves convencionales y RPAS según los indicadores de seguridad.

Aeronaves convencionales	RPAS			
	0	1	2	3
0	Sí	Sí	Sí	No
1	Sí	Sí	Duda	No
2	Sí	Sí	No	
3	Sí	No		
4	TLS	No		
5	No			



HOJA DEJADA INTENCIONADAMENTE EN BLANCO

7 SIMULACIONES DE MONTE CARLO REALES

El objetivo en este apartado es evaluar la probabilidad de conflicto entre aeronaves volando según distribuciones de tráfico reales y RPAS introducidos de manera aleatoria en el escenario. Se mantiene el sector sobre el cual se han realizado anteriormente simulaciones de Monte Carlo aleatorias, que es LECMZGZ. De este modo, son realizadas nuevas simulaciones de Monte Carlo según distribuciones de tráfico reales, mostrando el avance de la investigación en la Ilustración 26.

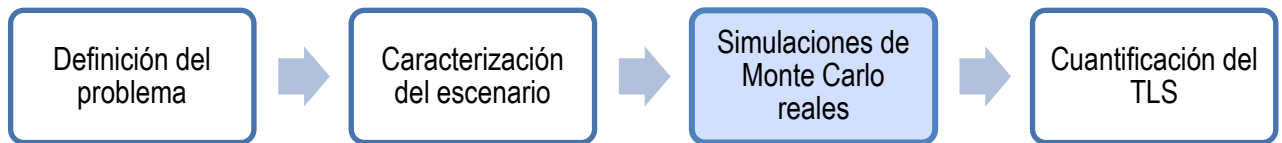


Ilustración 26. Diagrama de fases del proceso y ubicación actual del mismo.

La propuesta en este punto es mantener la integración de RPAS aleatoriamente mientras el flujo de aeronaves convencionales se adecúa a su operativa real en un día pico. Las variables de control que van a determinar las simulaciones, así como sus características al respecto de su aleatoriedad, se adjuntan en la Tabla 32 como ya se realizase para las simulaciones aleatorias.

Tabla 32. Valores de las variables de control en las simulaciones de Monte Carlo reales.

Variables de control		Rango posible de valores	Aleatoriedad
Número total de aeronaves		2 a 10	No
Aerovía	Aeronave convencional	Distribución de tráfico real	No
	RPAS	1 a 14 (LECMZGZ)	Sí
Tiempo de entrada		U (1,3600) segundos	Sí
Velocidad		N_{conv} (450,20); N_{RPAS} (250,5) knots	Sí
FL		270	No

Nuevamente, el máximo número de aeronaves permitidas va a ser diez, repartiéndose dicha simulación entre mitad de aeronaves convencionales y mitad de RPAS. Para cada simulación, el número total de aeronaves es fijo, por lo cual no se contempla en esta variable aleatoriedad alguna. Los niveles de vuelo de estudio continúan siendo los seis habituales, realizándose el análisis para uno de ellos, independientemente. De este modo, esta variable tampoco añade aleatoriedad al estudio.

Sin embargo, las variables velocidad y tiempo de entrada se mantienen con igual distribución que en el conjunto de simulaciones anteriores e introducen aleatoriedad al análisis. De esta manera, para cada una de las variables se identifican las siguientes características:

- **Velocidad de aeronaves convencionales.** Esta variable sigue una distribución de valor medio 450 kts y desviación estándar 20 kts. A cada aeronave introducida se le asigna un valor aleatorio dentro de ese rango.
- **Velocidad de RPAS.** Esta variable sigue una distribución de valor medio 250 kts y desviación estándar 5 kts. A cada RPAS introducido se le asigna un valor aleatorio dentro de ese rango.
- **Tiempo de entrada de aeronaves convencionales.** Esta variable sigue una distribución uniforme donde, para cada aeronave introducida, se le asigna un valor aleatorio entre 1 y 3600.
- **Tiempo de entrada de RPAS.** Esta variable sigue una distribución uniforme donde, para cada RPAS introducido, se le asigna un valor aleatorio entre 1 y 3600.

Falta, por tanto, asignar los valores a las variables de control propias de las aerovías. Como se ha comentado, los RPAS van a integrarse al sector de manera aleatoria por cualquiera de sus catorce aerovías. En cambio, las aeronaves convencionales van a seguir distribuciones de tráfico reales por el sector LECMZGZ. Para ello, se ha realizado el análisis de un día tipo del Ciclo AIRAC 1608 obteniendo los tráficos por los niveles de vuelo de estudio que se muestran en la Tabla 33.

Tabla 33. Distribución de tráfico el día 25 de julio de 2016 en el sector LECMZGZ.

AWY_j	Q_{AWY_j}	FL 250	FL 260	FL 270	FL 280	FL 290	FL 300
UM601	24	0	0	1	3	6	14
UN725	8	0	0	0	0	0	8
UQ400	0	-	-	-	-	-	-
UQ88	0	-	-	-	-	-	-
UN976	10	0	7	0	3	0	0
UL184	0	-	-	-	-	-	-
UQ268	0	-	-	-	-	-	-
UL27	1	0	0	0	1	0	0
UN871	3	0	1	0	1	0	1
UQ98	0	-	-	-	-	-	-
UQ126	0	-	-	-	-	-	-
UQ53	0	-	-	-	-	-	-
UN869	3	1	1	1	0	0	0
UM176	1	0	0	0	0	0	1
TOTAL	50	1	9	2	8	6	24

Únicamente en la mitad de las aerovías (por tanto, siete) es detectado tráfico de aeronaves convencionales. De ellas, el total del tráfico se concentra mayoritariamente en tres (UM601, UN725 y UN976). A su vez, el flujo de aeronaves también se encuentra principalmente localizado en los niveles de vuelo superiores. Al respecto de las aerovías con menos tráfico, éste se disgrega de manera homogénea entre los distintos niveles de vuelo. Con intención de facilitar el trabajo a la herramienta de programación implementada en MatLab®, se han convertido a porcentaje los flujos anteriormente especificados. De este modo, para cada aerovía y su correspondiente nivel de vuelo, el porcentaje de tráfico para todo un día es el mostrado según la Tabla 34.

Tabla 34. Distribución porcentual del tráfico el día 25 de julio de 2016 en el sector LECMZGZ.

AWY_j	$\overline{Q_{AWY_j}}$	FL 250	FL 260	FL 270	FL 280	FL 290	FL 300
UM601	0,48	0	0	0,02	0,06	0,12	0,28
UN725	0,16	0	0	0	0	0	0,16
UQ400	0	-	-	-	-	-	-
UQ88	0	-	-	-	-	-	-
UN976	0,20	0	0,14	0	0,06	0	0
UL184	0	-	-	-	-	-	-
UQ268	0	-	-	-	-	-	-
UL27	0,02	0	0	0	0,02	0	0
UN871	0,06	0	0,02	0	0,02	0	0,02
UQ98	0	-	-	-	-	-	-
UQ126	0	-	-	-	-	-	-
UQ53	0	-	-	-	-	-	-
UN869	0,06	0,02	0,02	0,02	0	0	0
UM176	0,02	0	0	0	0	0	0,02
TOTAL	1	0,02	0,18	0,04	0,16	0,12	0,48

La expresión $\overline{Q_{AWY_j}}$ hace referencia al flujo porcentual de aeronaves por cada una de las aerovías. Puede corroborarse a lo largo de la fila y la columna con formato de letra negrita que la suma del flujo total para los niveles de vuelo es de valor unidad. El FL más ocupado de cuantos los analizados es el 300, por tratarse de un sector de espacio aéreo eminentemente en ruta. Sus niveles de vuelo impares, a su vez, se encuentran más liberados de tráfico. Ello indica que el flujo predominante es hacia el Norte según la morfología del sector.

7.1 Resultados de las simulaciones de Monte Carlo reales

Se repite el proceso efectuado en el apartado anterior, pero con el nuevo grupo de simulaciones realizadas. En cada una de ellas han sido obtenidos tres indicadores de seguridad distintos. Con ellos es

posible evaluar el estado operativo del sector LECMZGZ en la operación conjunta de aeronaves convencionales según sus distribuciones de tráfico reales y RPAS por aerovías aleatorias. De este modo, durante el presente apartado se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones de Monte Carlo reales para los siguientes tres indicadores de seguridad:

- Número de conflictos (N_c)
- Tiempo de exposición (τ_{exp})
- Tiempo medio de duración de conflictos ($\overline{\tau_{con}}$)

7.1.1 Número de conflictos (N_c)

El primero de cuantos mostrados, que puede ofrecer una información preliminar al respecto del estado operacional del sector, es el número de conflictos para el total de simulaciones realizadas. Así, se contabiliza el número de ellas en las cuales dos aeronaves o más infringen la distancia mínima de separación. Dentro de una simulación puede producirse más de un conflicto. Con intención de constatar este hecho se incluye en la Tabla 35 las simulaciones con conflictos y su número para la configuración de dos aeronaves según distribuciones reales de tráfico y un RPAS integrado de manera aleatoria.

Tabla 35. Simulaciones en conflicto para la configuración de 2 aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y 1 RPAS aleatorio.

Número de simulaciones con conflictos					
Nº Conv.	Nº RPAS	Sin conflicto	1 conflicto	2 conflictos	3 conflictos
2	1	9306	686	7	1

En la mayoría de casos planteados, más del 93% de las ocasiones, no se produce ningún conflicto. Ello es indicativo de la viabilidad en la integración de RPAS sobre programaciones reales de aeronaves convencionales. Respecto al 7% de casos restantes, en su mayoría se produciría exclusivamente un conflicto entre las tres aeronaves de la programación, para este ejemplo en concreto. El número total de conflictos no tiene que coincidir, necesariamente, con el número de simulaciones con conflictos. De este modo, para la configuración expuesta el número total de conflictos son 703 según la expresión siguiente para el número de conflictos: $N_c = 686 * 1 + 7 * 2 + 1 * 3$.

Se ha obtenido, pues, el primer indicador referente al número total de conflictos. Sobre el resto de simulaciones planteadas se ha procedido del mismo modo, obteniendo tanto el total de conflictos como sus histogramas asociados. Dichos histogramas se recogen en el 0, como ya se realizase con aquellos de las simulaciones de Monte Carlo aleatorias. Los valores medios de conflictos detectados por simulación ($\overline{N_c}$) para cada una de las configuraciones entre aeronaves convencionales siguiendo distribuciones reales de tráfico y RPAS aleatorios se muestran en la Tabla 36.

Tabla 36. \overline{N}_c para cada configuración de aeronaves convencionales reales y RPAS aleatorios.

Aeronaves convencionales	RPAS					
	0	1	2	3	4	5
0	0	0	0,0294	0,0914	0,1840	0,3051
1	0	0,0258	0,0874	0,1813	0,3006	0,4543
2	0,0136	0,0703	0,1618	0,2795	0,4289	0,6121
3	0,0439	0,1249	0,2438	0,3901	0,5685	0,7663
4	0,0822	0,2034	0,3475	0,5168	0,7280	0,9690
5	0,1445	0,2757	0,4577	0,6669	0,8951	1,1507

Las principales conclusiones que pueden obtenerse del análisis de estos resultados son:

- El \overline{N}_c aumenta conforme lo hace el número de aeronaves convencionales, por un lado, o de RPAS, por otro. Esta tendencia puede apreciarse a lo largo de las filas y columnas de la tabla.
- La comparación en el número de conflictos entre únicamente aeronaves convencionales o únicamente RPAS es siempre mayor en el caso de los RPAS. Así, el \overline{N}_c se duplica en cualquiera de las simulaciones donde sólo operan RPAS frente a su correspondiente donde sólo lo hacen aeronaves convencionales. Este resultado también viene influido por el hecho de que los RPAS se integran en el sector de manera aleatoria mientras que las aeronaves convencionales siguen distribuciones de tráfico real.
- Para un mismo número de aeronaves totales en la programación por el espacio aéreo LECMZGZ, el número de conflictos es más elevado cuantos más RPAS participen en una programación. De esta manera, a lo largo de las diagonales ascendentes de izquierda a derecha en la tabla, se puede comprobar cómo \overline{N}_c alcanza sus valores máximos para un mismo número de aeronaves cuantos más RPAS integran la configuración de aeronaves convencionales y RPAS.

Es posible conocer la evolución en el número de conflictos medio mediante una representación gráfica. De este modo, para cada número de aeronaves constante se crea una línea de tendencia que muestra el número de conflictos medio detectado en su combinación con distintos números de RPAS. La evolución en el número de conflictos medio para las distintas simulaciones de tráficos convencionales reales y RPAS aleatorios se acompaña, a continuación, en la Ilustración 27.

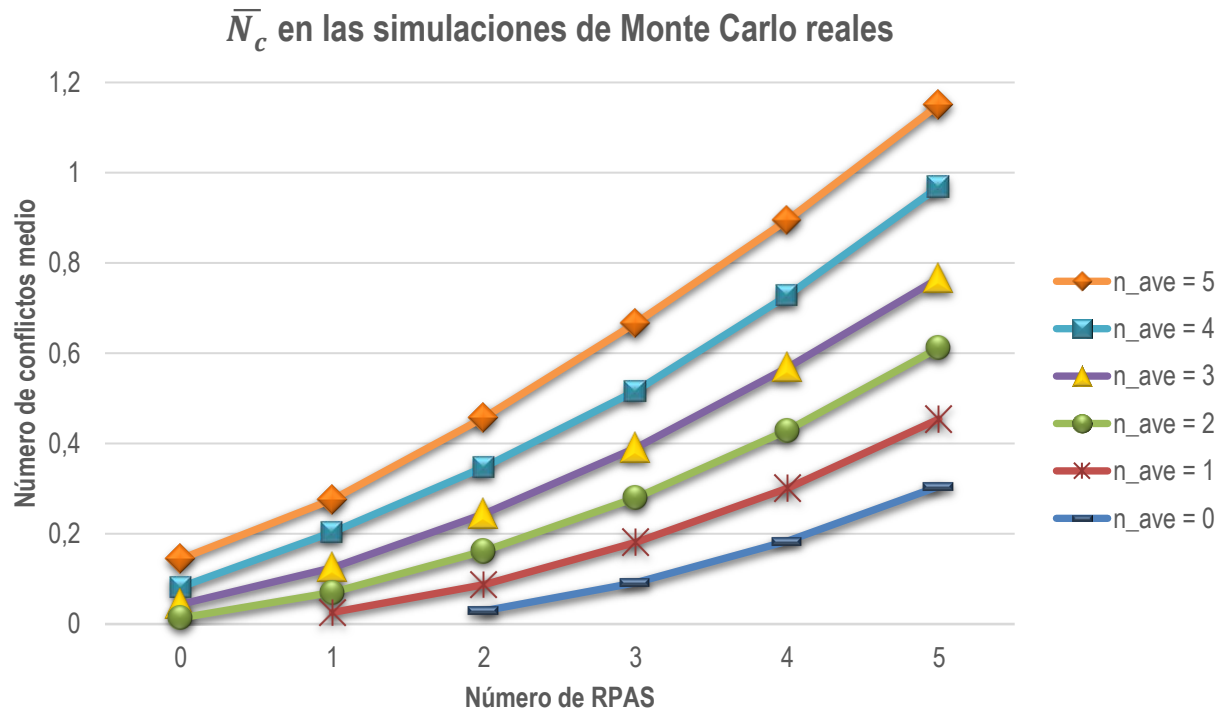


Ilustración 27. Evolución en el número de conflictos medio entre aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios.

Puede comprobarse una evolución exponencial de las series de datos. Cuantos más RPAS se integran, mayor es la divergencia de las líneas de tendencia. Dan comienzo en un intervalo de unos 0,13 conflictos de media entre la serie de dos aeronaves convencionales (representada según marcadores con circunferencias) y la de cinco (en su caso, con rombos anaranjados). En las últimas simulaciones realizadas, el intervalo se hace hasta cuatro veces superior llegando a más de 0,52 conflictos de diferencia.

La evolución en el número de conflictos medio para un número de aeronaves constante puede representarse de manera tridimensional como ya se realizase en el apartado 6.1.1. De esta manera puede evaluarse la afección en la introducción de aeronaves del tipo convencional o RPAS sobre una programación de valor constante para el total de las mismas. En la Ilustración 28 se muestra la evolución en el número de conflictos medio para un número de aeronaves constante en las simulaciones de Monte Carlo reales.

Número de conflictos medio por número constante de aeronaves

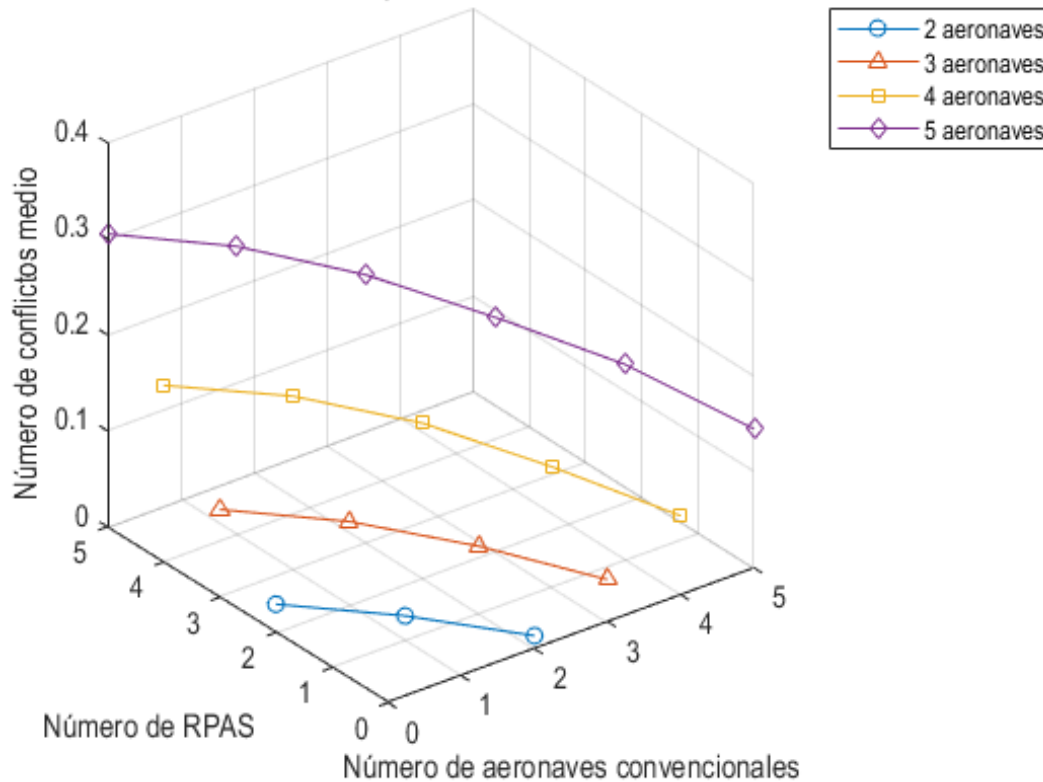


Ilustración 28. Evolución en el número de conflictos medio para un número de aeronaves constante en las simulaciones de Monte Carlo reales.

Puede observarse una tendencia lineal en la evolución del $\overline{N_c}$ para un número constante de aeronaves. Las simulaciones con exclusivamente RPAS generan los valores más elevados en lo referido a promedios. Desde esos puntos se produce un descenso lineal hacia aquellas configuraciones exclusivamente conformadas por aeronaves convencionales. En caso de apreciarse algo de curvatura esto es debido a la perspectiva de la representación puesto que, tal como se comentó al respecto de los resultados de la Tabla 36, la evolución para estas simulaciones resulta lineal. Esto viene a significar que cuantas más aeronaves y, en particular, más RPAS integran una programación, mayor es el $\overline{N_c}$ detectados.

Adicionalmente a la tabla previamente mencionada pueden expresarse los conflictos detectados en las simulaciones de una manera más detallada. En ciertos casos se produce más de un conflicto para una simulación en concreto. La siguiente tabla tiene por objeto precisar cuántos conflictos se producen en cada una de las 10.000 simulaciones realizadas para cada configuración de aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios. Los resultados del número de simulaciones con el número de conflictos indicados para cada configuración de aeronaves se muestran en la Tabla 37.

Tabla 37. Número de simulaciones con los conflictos indicados para cada configuración de

aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios.

N° Conv.	N° RPAS	Número de simulaciones con los conflictos indicados											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	1	9742	258	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0	9864	136	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	0	9564	433	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	0	9213	760	19	8	-	-	-	-	-	-	-	-
5	0	8660	1258	61	19	2	-	-	-	-	-	-	-
2	1	9306	686	7	1	-	-	-	-	-	-	-	-
3	1	8819	1126	42	13	-	-	-	-	-	-	-	-
4	1	8163	1671	138	25	3	-	-	-	-	-	-	-
5	1	7560	2175	219	42	2	2	-	-	-	-	-	-
2	2	8499	1404	78	18	1	-	-	-	-	-	-	-
3	2	7848	1928	171	47	4	1	1	-	-	-	-	-
4	2	7083	2466	357	84	8	1	1	-	-	-	-	-
5	2	6297	2989	579	116	14	4	1	-	-	-	-	-
0	2	9706	294	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0	3	9114	863	18	5	-	-	-	-	-	-	-	-
0	4	8294	1592	94	20	-	-	-	-	-	-	-	-
0	5	7312	2396	224	65	3	-	-	-	-	-	-	-
1	2	9152	823	24	1	-	-	-	-	-	-	-	-
1	3	8330	1552	94	23	1	-	-	-	-	-	-	-
1	4	7361	2321	274	40	3	1	-	-	-	-	-	-
1	5	6283	3056	522	120	16	0	2	1	-	-	-	-

2	3	7523	2209	224	39	4	1	-	-	-	-	-
2	4	6731	2742	435	80	11	1	-	-	-	-	-
2	5	5966	3145	690	163	28	6	2	-	-	-	-
3	3	6731	2742	435	80	11	1	-	-	-	-	-
4	4	4788	3693	1126	300	73	16	8	1	1	-	-
4	3	5966	3145	690	163	28	6	2	-	-	-	-
3	4	5653	3314	787	193	48	4	1	-	-	-	-
5	3	5136	3476	1063	258	50	11	4	2	-	-	-
3	5	4660	3634	1258	339	87	19	5	1	2	-	-
5	4	4113	3726	1511	465	132	42	9	0	2	-	-
4	5	3840	3708	1657	592	152	31	14	3	3	-	-
5	5	3166	3780	1945	743	266	66	27	5	1	1	-

El mayor número de simulaciones con conflictos tiene su ocurrencia, consecuentemente, cuantas más aeronaves integran la programación. Ello también es debido a que, en el primero de los casos entre dos aeronaves el número máximo de posibles conflictos es uno. Sin embargo, si por el sector circulan cinco aeronaves convencionales y cinco RPAS, el número máximo de posibles conflictos entre ellas sería de hasta 45. Puede constatarse que no se alcanza un valor tan elevado en lo que a N_c por simulación se refiere, siendo nueve el mayor número de conflictos detectados, en cualquiera de los casos.

Pueden relacionarse las distintas series de datos mostradas en la tabla previa para conocer la evolución del número de simulaciones con conflictos para cada configuración. En este caso y, como ya se realizase en el apartado 0, el número de aeronaves convencionales va a mantenerse fijo por cada representación. Las series de RPAS, en cambio, van a presentar distintos valores entre cero y cinco lo cual va a permitir evaluar su evolución respecto del número de simulaciones con el número de conflictos indicados. En primer lugar, se acompaña en la Ilustración 29 las líneas de tendencia del número de simulaciones con conflictos para 0 aeronaves convencionales y distintos valores de RPAS en el espacio aéreo LECMZGZ.



Ilustración 29. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 0 aeronaves convencionales reales con distintos valores de RPAS.

Este análisis no introduce novedades respecto a simulaciones anteriormente efectuadas. Los RPAS operan por aerovías aleatorias (como ya hicieran en el grupo de simulaciones de Monte Carlo aleatorias) mientras que no circulan aeronaves convencionales por el sector. No se introduce, por tanto, dependencia al respecto de las distribuciones de tráfico real en el espacio aéreo. Los resultados del número de simulaciones con los conflictos indicados resultan prácticamente similares. Las escasas diferenciadas apreciadas se deben a la incertidumbre introducida por los valores aleatorios de aerovías, velocidades y tiempos de entrada de los RPAS. Cabe comentar, no obstante, que la tendencia de las distintas series es semejante puesto que descienden rápidamente hacia valores nulos o casi nulos de simulaciones con conflictos una vez se superan los dos conflictos por cada simulación. El siguiente paso en la investigación es la introducción progresiva de aeronaves convencionales en el escenario base según las distribuciones de tráfico real expuestas en la Tabla 34. De este modo, el número de simulaciones con los conflictos indicador para configuraciones con 1 aeronave convencional y distintos valores de RPAS se acompaña en la Ilustración 30.

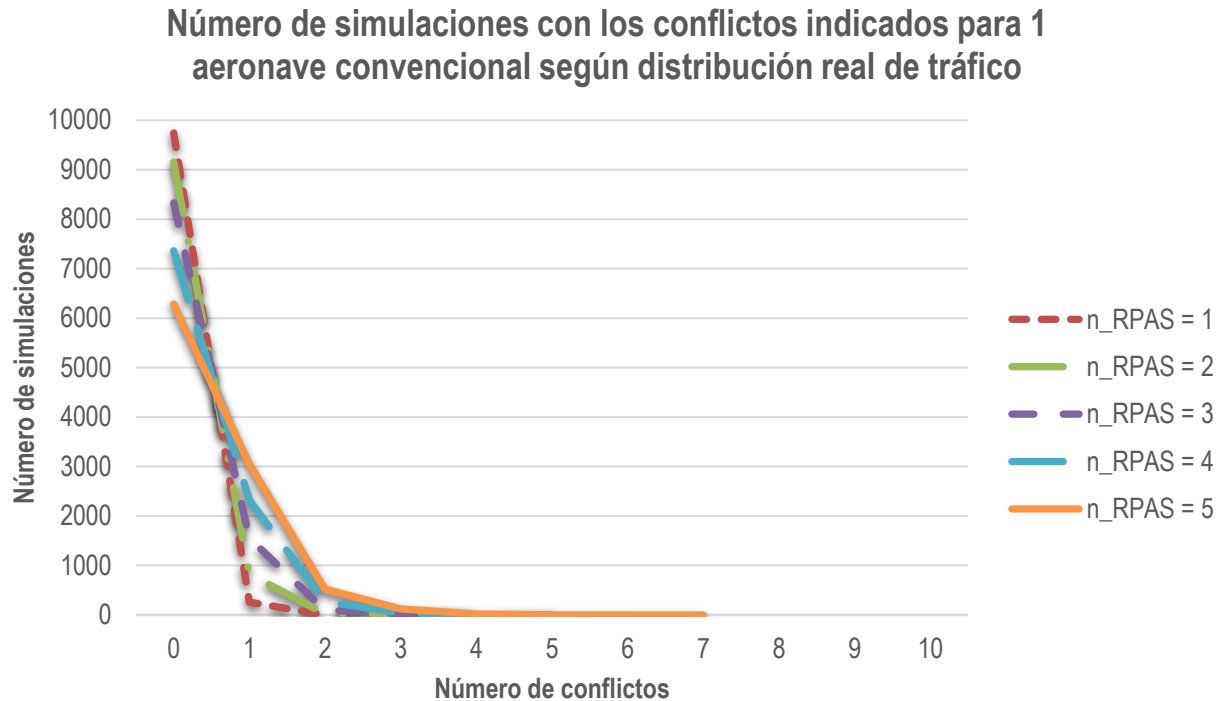


Ilustración 30. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 1 aeronave convencional real con distintos valores de RPAS.

La apariencia de las series es relativamente similar a la desarrollada para 0 aeronaves convencionales. Consecuencia de la inclusión de la serie para un RPAS en el sector (“n_RPAS” según la correspondiente leyenda) el resto de ellas desciende hacia un número inferior de simulaciones con número de conflictos igual a cero. La tendencia continúa siendo linealmente descendente para todas ellas con menor inclinación conforme aumenta el número de RPAS que integran las programaciones. El siguiente paso es la modificación del escenario base partiendo de dos aeronaves convencionales según distribuciones de tráfico real y distintos valores de RPAS aleatorios en LECMZGZ. Para estas series se ha generado la Ilustración 31 donde se representan el número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 2 aeronaves convencionales reales con distintos valores de RPAS.

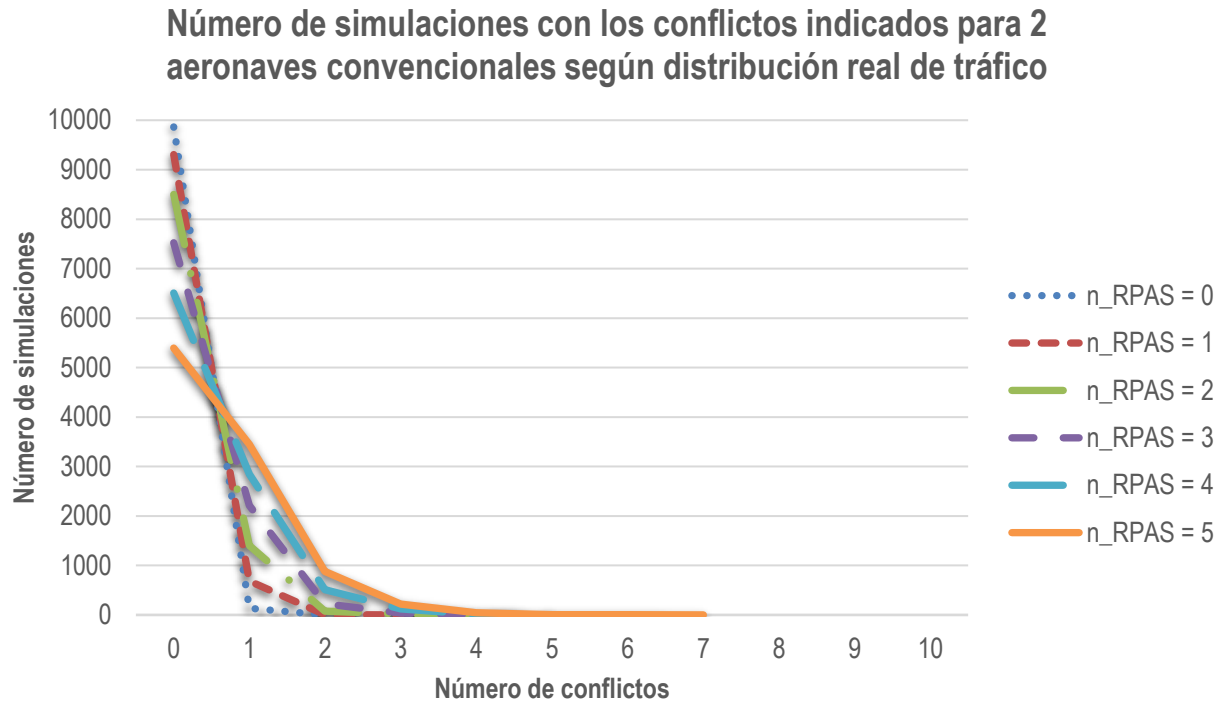


Ilustración 31. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 2 aeronaves convencionales reales con distintos valores de RPAS.

Nuevamente, añadir una nueva serie como es la de cero RPAS (“n_RPAS = 0” en la leyenda) provoca la caída del resto de series hacia valores inferiores del número de simulaciones con conflictos nulos. La tendencia de las seis series es linealmente descendente, con distintas pendientes según el número de RPAS que integran cada una de las configuraciones. No obstante, el número máximo de conflictos detectados en una simulación para cualquiera de los casos es siempre siete o inferior. El análisis continúa desde un escenario base donde el número de aeronaves convencionales sea tres. Para estas series de datos, con distintos valores de RPAS, se ha incluido una nueva representación gráfica. En ella (ver Ilustración 32) se recoge el número de simulaciones con el número de conflictos indicados para configuraciones de 3 aeronaves convencionales y distintos valores de RPAS.

Número de simulaciones con los conflictos indicados para 3 aeronaves convencionales según distribución real de tráfico

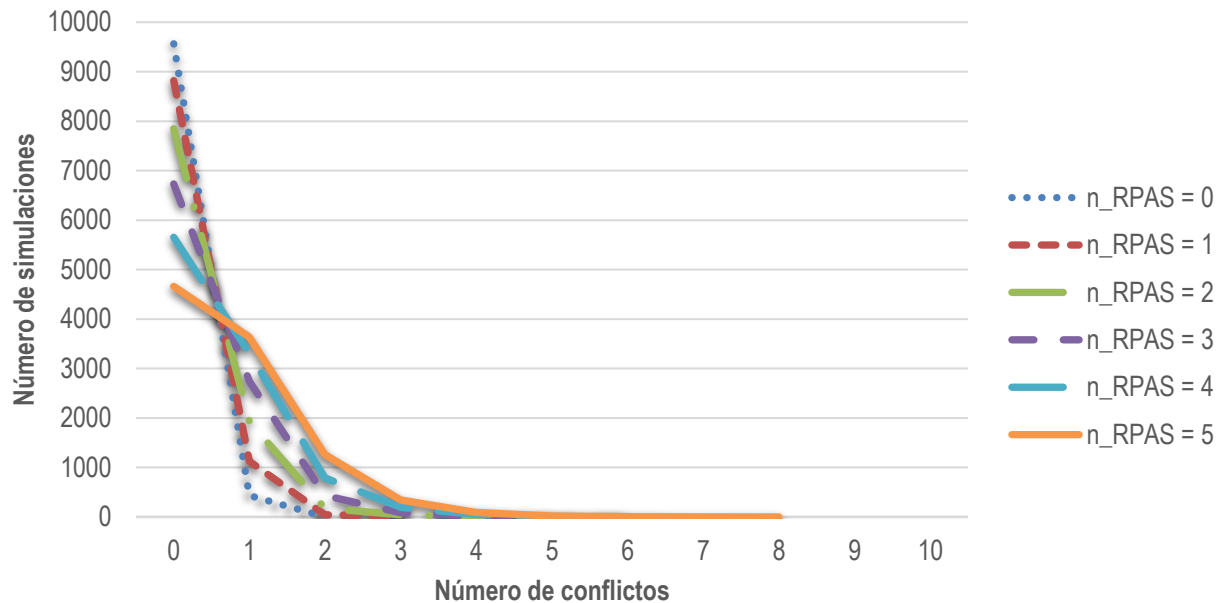


Ilustración 32. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 3 aeronaves convencionales reales con distintos valores de RPAS.

Las series continúan alcanzando valores nulos del número de simulaciones con conflictos elevados, pero su descenso es ahora mucho menos pronunciado. De hecho, para la serie con más aeronaves de este grupo (3 aeronaves convencionales y 5 RPAS, en color naranja liso) parece hasta mantenerse en un inicio. De este modo, existe una diferencia de mil simulaciones entre aquellos casos en los cuales no se produce ningún conflicto y aquellos en los que se produce únicamente un conflicto. En el resto, ocurre un descenso más moderado en lo que a número de simulaciones con conflictos se refiere.

El siguiente de los conjuntos de series de datos puede establecerse como uno de los más importantes dentro del análisis. Esto es debido a que se parte de una situación inicial de 4 aeronaves convencionales en el espacio aéreo LECMZGZ. Este valor de cuatro aeronaves convencionales según distribución de tráfico real es el que presenta el sector en uno de sus niveles de vuelo en su hora pico. Así, la base desde la cual se introducen distintos valores de RPAS es la que va a ser determinante para fijar un TLS en el sector por un FL en concreto. Los resultados del número de simulaciones con el número de conflictos indicados para configuraciones de 4 aeronaves convencionales y distintos valores de RPAS se representa, a continuación, en la Ilustración 33.

Número de simulaciones con los conflictos indicados para 4 aeronaves convencionales según distribución real de tráfico

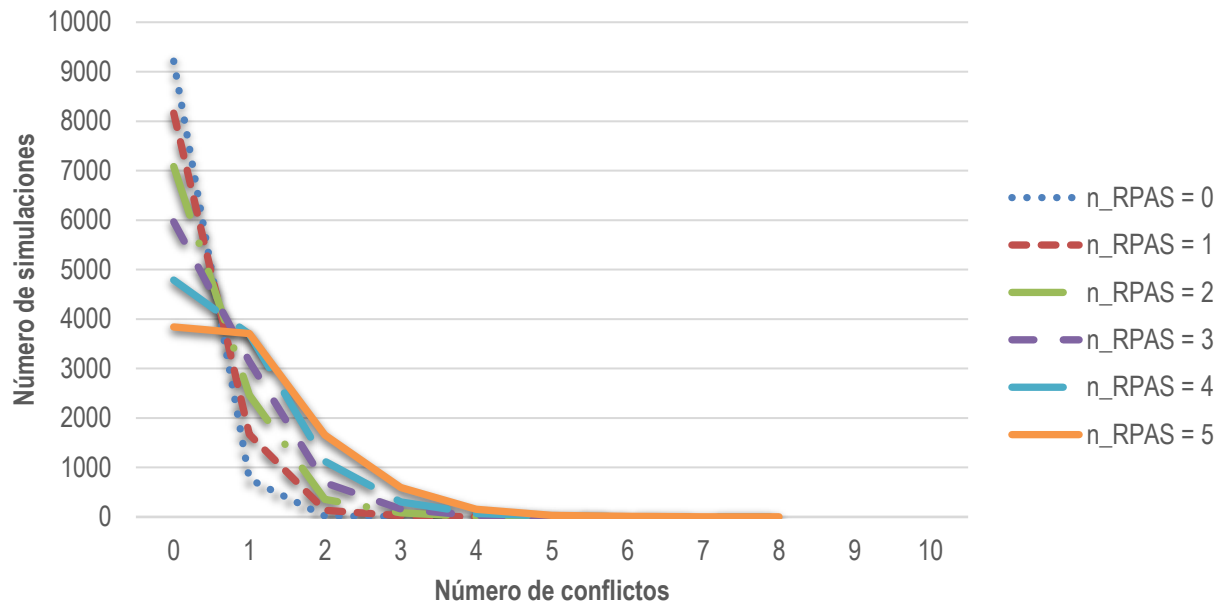


Ilustración 33. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 4 aeronaves convencionales reales con distintos valores de RPAS.

Se confirma la tendencia reportada durante las anteriores ilustraciones. Llegados a un punto, cuantas más aeronaves integran una programación, el número de simulaciones con ningún o un conflicto se mantiene constante en el inicio. Ello ocurre para la línea de tendencia de cinco RPAS, representada en color naranja. Después de estos dos valores, realiza un descenso exponencial hacia valores nulos del número de simulaciones con valores elevados de conflictos. Estos datos ofrecen una aproximación al respecto de la introducción de varios RPAS en un espacio aéreo en conjunto con aeronaves convencionales ya existentes. Pese a que las últimas desarrollen su operación conforme a distribuciones de tráfico real, la dificultad en la integración de RPAS es patente dado el alto número de conflictos que generan.

Finalmente, se procede a realizar el estudio sobre un escenario base de cinco aeronaves convencionales. En ninguna de las horas de operación del día tipo considerado en el espacio aéreo LECMZGZ, ni siquiera en la hora pico, se han encontrado tantas aeronaves convencionales en un mismo nivel de vuelo. No obstante, este análisis es de especial interés para la comprobación en la evolución de las líneas de tendencia. Se busca conocer si la tendencia se mantiene para valores elevados del número de aeronaves convencionales por el sector. La Ilustración 34 es incluida para representar la evolución de las distintas series de RPAS respecto del número de simulaciones con los conflictos indicados para configuraciones con 5 aeronaves convencionales.

Número de simulaciones con los conflictos indicados para 5 aeronaves convencionales según distribución real de tráfico

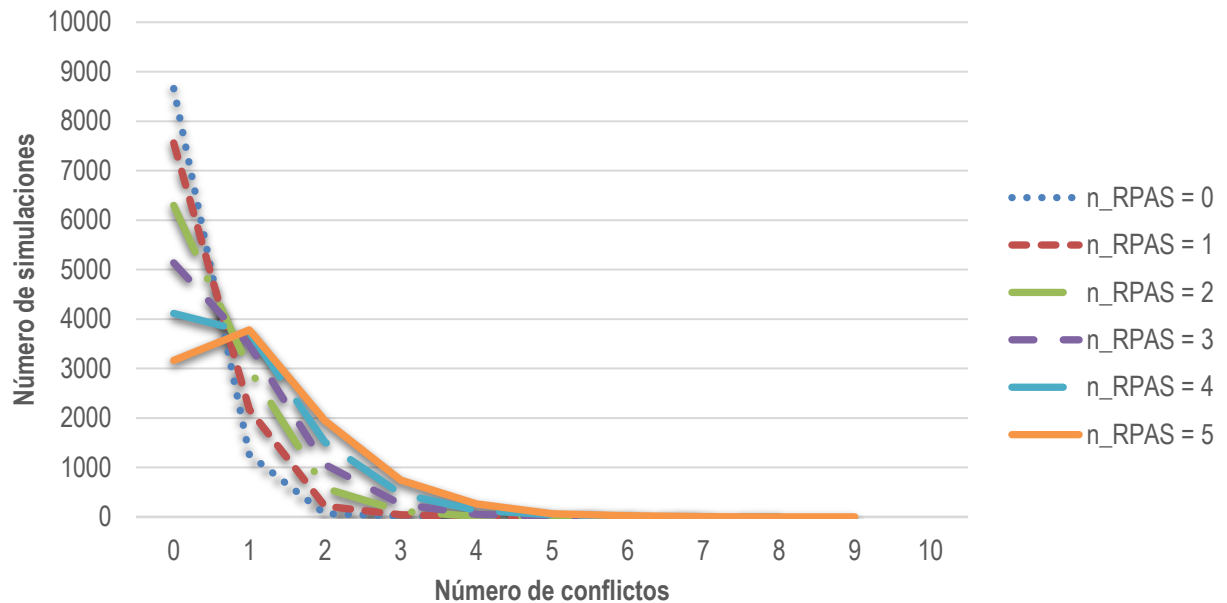


Ilustración 34. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 5 aeronaves convencionales reales con distintos valores de RPAS.

Se contrasta que se produce una inversión de la línea de tendencia cuando diez aeronaves integran la programación por el sector LECMZGZ. Respecto a ellas, cinco aeronaves convencionales y cinco RPAS, es más probable la ocurrencia de un conflicto en sus simulaciones que de ninguno. Sobre decir que, en consecuencia, hay muchas más simulaciones relativas a esta configuración con número de conflictos distinto de cero que iguales a cero. La evolución en el resto de series ha mantenido la tendencia esperada. Se ha suavizado su descenso lineal desde más de 4.000 simulaciones con conflictos hasta cero simulaciones con los conflictos indicados. Ahora todas las series presentan un descenso lineal uniforme entre uno y dos conflictos. Igualmente, también existe una alta probabilidad de que configuraciones con alto número de RPAS (de “n_RPAS = 3” a “n_RPAS = 5”) presenten un conflicto para aproximadamente 3.500 de las 10.000 simulaciones realizadas.

En caso de mantener fijo el número total de aeronaves, en vez del número de aeronaves convencionales, puede obtenerse una nueva figura sobre los mismos ejes. En ella son expresadas el número de simulaciones con los conflictos indicados cuando 4 aeronaves integran una programación. Cada serie de datos (ver leyenda) corresponde a un valor particular bien de aeronaves convencionales, bien de RPAS. De esta manera, las simulaciones con los conflictos obtenidos para 4 aeronaves se muestra según la Ilustración 35.

Número de simulaciones con los conflictos indicados para un total de 4 aeronaves constantes según distribución real de tráfico

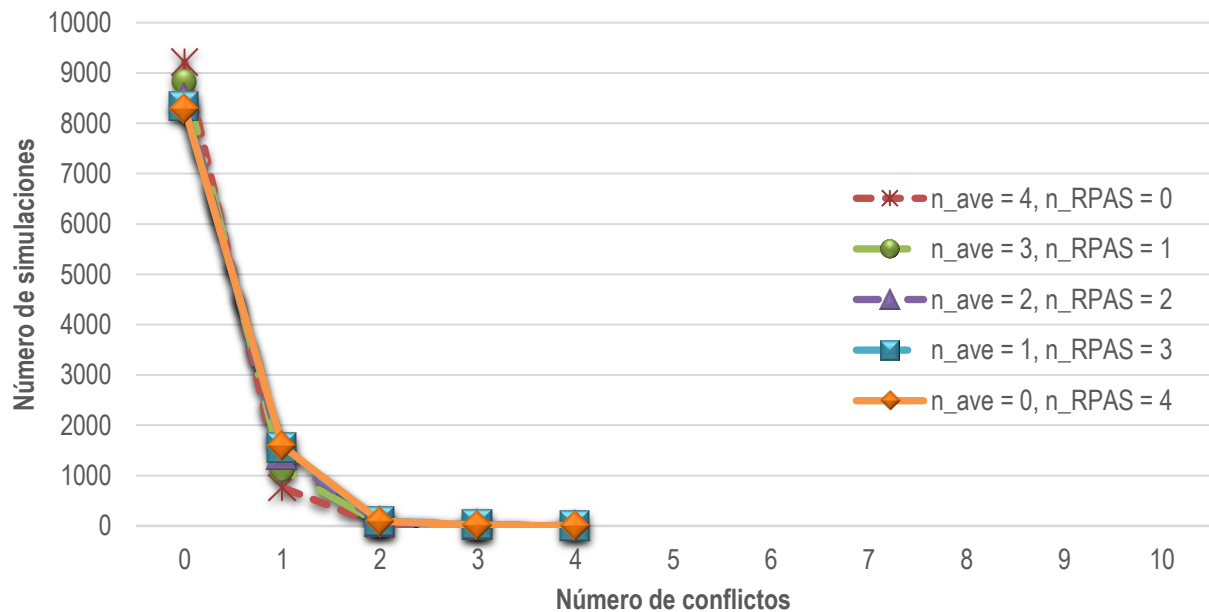


Ilustración 35. Número de simulaciones con el número de conflictos indicados para la configuración de 4 aeronaves constantes según distribución de tráfico real.

Las series de datos se superponen de manera casi unívoca unas sobre otras. Esto da cuenta de las similitudes en el número de simulaciones con los conflictos indicados independientemente de la configuración de aeronaves convencionales y RPAS. Como ocurriese en las simulaciones de Monte Carlo aleatorias (ver Ilustración 22), las diferencias en el número de simulaciones con dos conflictos o más son prácticamente inapreciables. Sin embargo, sí se notifica una evidente divergencia cuando el número de conflictos detectados en una simulación es nulo o unidad. La serie de datos correspondiente a 4 aeronaves convencionales según distribución de tráfico real presenta el mayor número de simulaciones sin conflicto. Por el contrario, resulta la configuración de 4 aeronaves donde menos simulaciones con 1 conflicto se obtienen. Estas dos características son consecuencia directa del empleo exclusivo por esta configuración de distribuciones de tráfico real. Ello provoca minimizar los conflictos en el espacio aéreo, resultando así la programación de 4 aeronaves que menor riesgo operativo introduce sobre el sector.

Con esta representación gráfica finaliza el estudio del primer indicador de seguridad, N_c . Adicionalmente, en el 0, se incluyen los histogramas extraídos de la simulación en MatLab® y que suponen la base para la representación de las anteriores ilustraciones. En los siguientes apartados se continúa el estudio para los demás indicadores de seguridad necesarios para la determinación de un TLS en el espacio aéreo LECMZGZ.

7.1.2 Tiempo de exposición (τ_{exp})

El segundo de los indicadores obtenido de la realización de simulaciones de Monte Carlo reales es el

indicador de tiempo de exposición. Éste viene a representar de manera adimensional la relación entre el tiempo en el cual una aeronave se encuentra expuesta a un conflicto en su longitud de sección crítica frente al período de estudio seleccionado de una hora. Los resultados del indicador τ_{exp} para cada configuración de aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios se muestra según la Tabla 38.

Tabla 38. τ_{exp} para cada configuración de aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios.

Aeronaves convencionales	RPAS					
	0	1	2	3	4	5
0	0	0	0,0920	0,2691	0,5068	0,8150
1	0	0,0432	0,1776	0,3764	0,6415	0,9852
2	0,0100	0,0903	0,2560	0,4925	0,7872	1,1508
3	0,0264	0,1424	0,3360	0,5832	0,8981	1,2736
4	0,0484	0,1920	0,4086	0,6867	1,0184	1,4211
5	0,0750	0,2448	0,4781	0,7888	1,1412	1,5460

Las principales conclusiones extraídas del análisis de este indicador continúan en la línea de lo expuesto anteriormente para el indicador \overline{N}_c :

- τ_{exp} aumenta conforme lo hace el número de aeronaves en la programación, bien sean aeronaves convencionales, RPAS o ambos a la vez.
- El incremento del tiempo de exposición es más moderado cuando es debido a la integración de una aeronave convencional. En un plano comparativo, dado un número fijo de aeronaves de un mismo tipo, la relación de tiempos de exposición llega a ser nueve veces superior en caso de tratarse de RPAS que en caso de aeronaves convencionales. Anteriormente, respecto a \overline{N}_c , la relación entre únicamente RPAS o únicamente aeronaves convencionales sólo se duplicaba.
- Para un mismo número de aeronaves en una programación, esto es, siguiendo las diagonales ascendentes de izquierda a derecha de la tabla anterior, el valor del indicador τ_{exp} es más elevado cuantos más RPAS integran dicha programación. Por ejemplo, para cinco aeronaves τ_{exp} evoluciona desde el valor mínimo en cinco aeronaves convencionales hasta el máximo en cinco RPAS.

La evolución para cada configuración de aeronaves puede representarse de manera gráfica. Para cada conjunto de datos con un número de aeronaves convencionales fijo se desarrolla una línea de tendencia que lo relacione con el número de distintos RPAS considerados. Se genera así una ilustración donde se muestran los distintos tiempos de exposición obtenidos en las simulaciones de Monte Carlo reales. De

este modo, la Ilustración 36 recoge la evolución del indicador τ_{exp} para cada configuración de aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios.

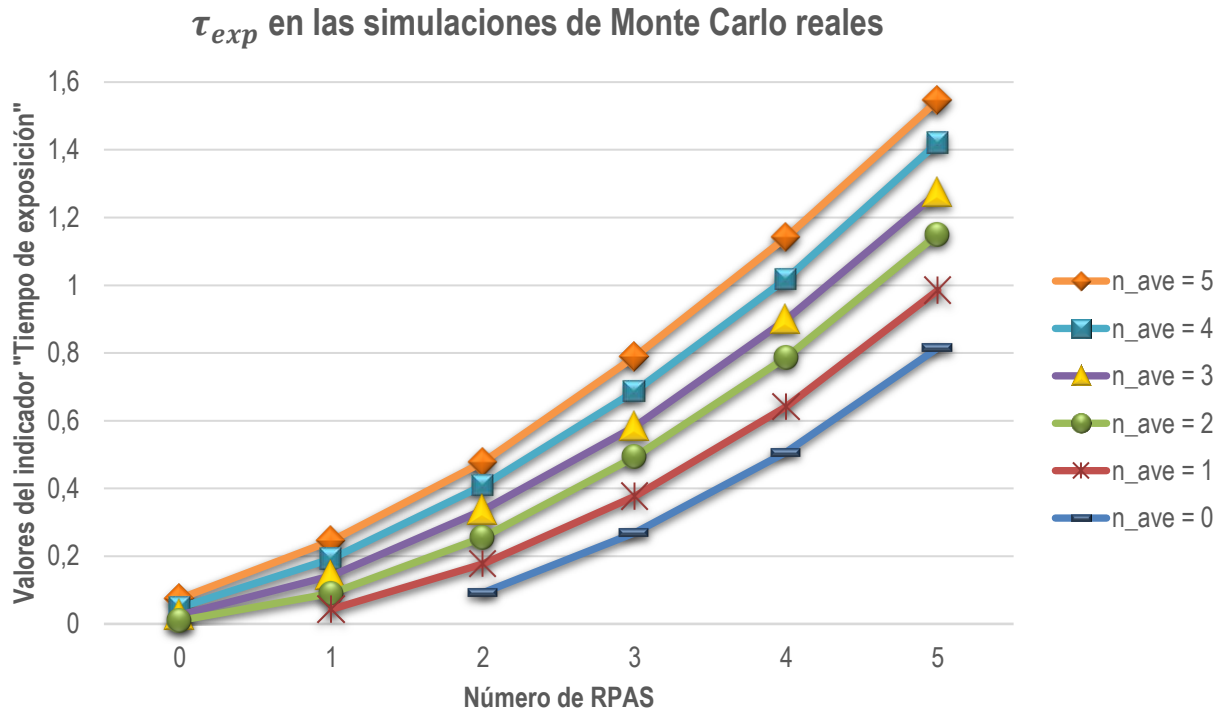


Ilustración 36. Evolución de τ_{exp} para cada configuración de aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios.

Se observa, nuevamente, una evolución exponencial de las líneas de tendencia de aeronaves convencionales. Este comportamiento ya fue notificado durante la representación del indicador número de conflictos medio durante el apartado anterior. Sin embargo, la divergencia actual entre series es mucho menor con una diferencia del 50% entre los grupos de simulaciones más expuestas al conflicto ("n_ave = 5") y las que menos ("n_ave = 0"). En el mismo caso, según el indicador \overline{N}_c la diferencia entre los valores máximos y mínimos era de orden cuatro veces superior frente al doble que presenta el presente caso. Cabe destacar la baja exposición al conflicto para todas las series cuando el número de RPAS es igual a cero en las simulaciones. Esto es consecuencia del seguimiento de distribuciones reales de tráfico en las mismas, lo cual ocasiona su concentración en un número menor de aerovías, minimizando la exposición a los conflictos.

Los resultados de este indicador pueden representarse de modo que el número de aeronaves sea constante. De esta manera, se conoce la evolución para τ_{exp} cuando distintas aeronaves convencionales o RPAS integran una configuración de aeronaves pero su número total se mantiene fijo. Esta representación se obtuvo en la Ilustración 24 para las simulaciones de Monte Carlo aleatorias. Ahora, para las reales, se genera el mismo ejemplo en la evolución de τ_{exp} para un número de aeronaves constante según la Ilustración 37.

Tiempo de exposición por número constante de aeronaves

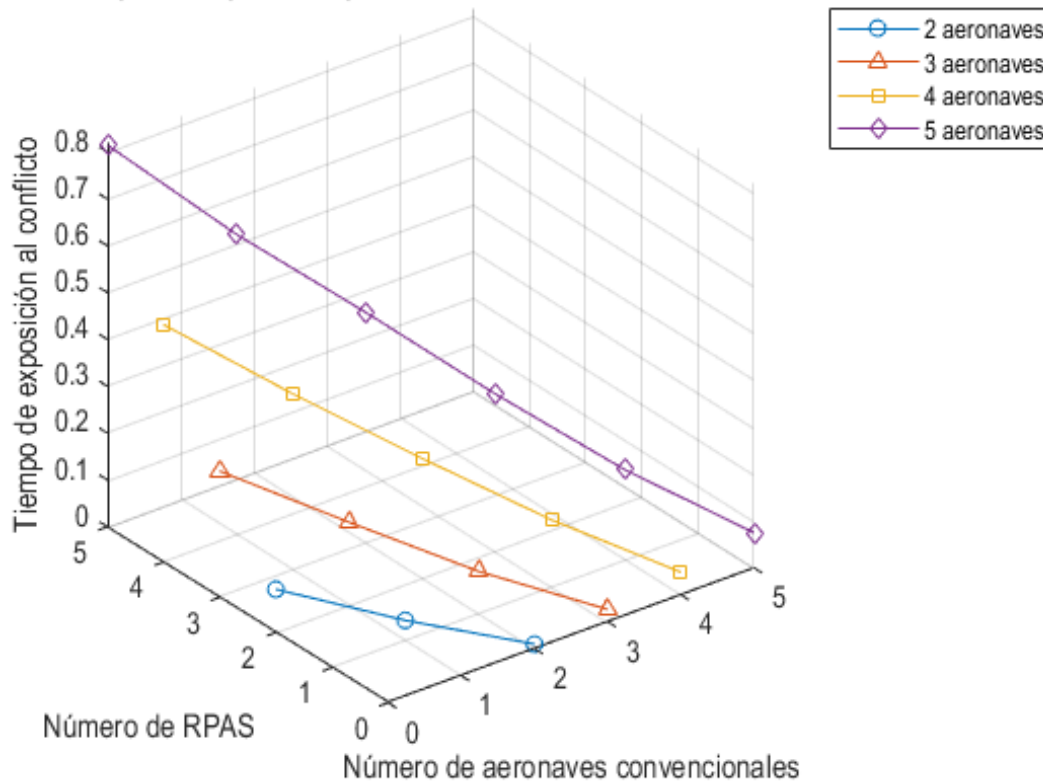


Ilustración 37. Evolución de τ_{exp} para un número de aeronaves constante.

Se aprecia un marcado descenso desde los valores de τ_{exp} obtenidos para exclusivamente RPAS hacia los valores hallados para sólo aeronaves convencionales. Puede determinarse, incluso, que las tendencias de las series de datos para un número constante de aeronaves son parabólicas descendentes. Los tiempos de exposición al conflicto de exclusivamente aeronaves convencionales en LECMZGZ son muy reducidos debido al empleo de distribuciones de tráfico real. Esto influye sobre el hecho de que la evolución del indicador sea más abrupta lo cual genera dicha morfología parabólica de las series de datos. En la Ilustración 24, donde todas las configuraciones seguían distribuciones de tráfico aleatorias, el descenso producido era lineal. Contrasta, de esta manera, con lo obtenido en este apartado al respecto de las simulaciones reales.

7.1.3 Tiempo medio de duración de conflictos ($\overline{\tau_{con}}$)

El último de los indicadores calculados en las simulaciones de Monte Carlo reales es el de tiempo medio de duración de conflictos. Además del parámetro \overline{N}_c se ha obtenido el promedio de los tiempos totales de duración de dichos conflictos. Esta variable indica los instantes de tiempo para los cuales la distancia mínima de separación es inferior a los mínimos publicados para el espacio aéreo LECMZGZ, por tanto, $d_{min} < 5 NM$. Los resultados alcanzados de la duración media de los conflictos se adjuntan, en segundos, para cada configuración de aeronaves convencionales según distribuciones reales de tráfico y RPAS aleatorios en la Tabla 39.

Tabla 39. $\overline{\tau}_{con}$ (s) para cada configuración de aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios.

Aeronaves convencionales	RPAS					
	0	1	2	3	4	5
0	0	0	8,1087	27,6968	51,5370	87,4336
1	0	2,4558	14,4201	35,4433	62,0886	104,0318
2	2,4260	7,7900	21,2876	43,8145	76,4341	117,3849
3	8,4067	15,0761	32,9060	58,1229	90,1101	131,8762
4	14,2197	26,9511	43,9201	70,6896	110,2317	153,9666
5	25,6654	38,1114	58,2643	88,8494	128,3146	172,0881

Las principales conclusiones obtenidas del análisis del indicador $\overline{\tau}_{con}$ son las siguientes:

- Conforme aumenta el número de aeronaves en la programación, bien aeronaves convencionales o bien RPAS, también aumenta el tiempo medio de duración de conflictos.
- Un valor más elevado del indicador \overline{N}_c implica un mayor tiempo de duración media de los conflictos en el espacio aéreo LECMZGZ. De esta manera, cuantas más aeronaves integran la programación y en particular, mayor número de RPAS lo hacen, mayores son los tiempos medios de duración de los conflictos.
- Puede observarse cómo, para el mismo número de vehículos en la programación (siete, por ejemplo), el tiempo medio de conflictos es más elevado a mayor número de RPAS conlleva la configuración. Es el caso de cinco aeronaves convencionales y dos RPAS frente a dos aeronaves convencionales y cinco RPAS, donde la segunda configuración duplica en tiempo medio de duración total de los conflictos a la primera.

Con intención de comparar estas relaciones se incluyen las siguientes tablas. Aquí va a evaluarse el perjuicio en la introducción de RPAS sobre las programaciones reales de tráfico de aeronaves convencionales. En primer lugar, se busca conocer el estado operativo del sector con el tráfico exclusivo de aeronaves convencionales en sus distribuciones de tráfico. Para ello van a introducirse sucesivamente nuevas aeronaves convencionales siguiendo distribuciones de tráfico reales. Se acompaña el tiempo medio de la duración de sus conflictos en segundos para cada configuración y se añade la relación adimensional entre cada caso de estudio en la Tabla 40.

Tabla 40. Relación entre $\overline{\tau}_{con}$ cuando se introduce sucesivamente una aeronave convencional según distribución de tráfico real frente a 0 RPAS.

N° Conv.	N° RPAS	$\overline{\tau}_{con}$ (s)	Relación entre tiempos de duración
----------	---------	-----------------------------	------------------------------------

2	0	2,4260	3,465
3	0	8,4067	
3	0	8,4067	1,691
4	0	14,2197	
4	0	14,2197	1,805
5	0	25,6654	

Se aprecia cómo la introducción de una aeronave en la programación de exclusivamente dos aeronaves convencionales es perjudicial para el estado del espacio aéreo LECMZGZ. Consecuencia de ampliar la programación en una aeronave según distribuciones reales de tráfico, la relación entre los tiempos totales de conflicto llega a triplicarse. Si se continúa este proceso añadiendo una nueva aeronave convencional hasta llegar a cuatro, puede verse cómo el aumento en los tiempos de conflicto se convierte en la mitad del caso previamente expuesto. Sin embargo, cabría esperar que introduciendo nuevas aeronaves esta relación prosiguiese disminuyendo. No es así el caso cuando es integrada en la programación según distribuciones de tráfico reales una nueva aeronave convencional hasta alcanzar las cinco por el sector. La relación entre tiempos vuelve a aumentar, no pudiendo validar la tendencia identificada anteriormente.

Otro supuesto de estudio realizado es el de la introducción de RPAS en programaciones reales fijas de aeronaves convencionales en el escenario. Para este caso, va a procederse a la integración de un RPAS aleatorio en programaciones ya establecidas de únicamente aeronaves convencionales según distribuciones reales de tráfico. Estas distribuciones de tráfico fueron detalladas en la introducción de este apartado y añadidas al código implementado en MatLab® para un efectivo seguimiento según las distintas trayectorias.

El objetivo en este punto es la comparación entre las distintas alternativas posibles y evaluar dónde se produciría la menor afección a la hora de introducir RPAS sobre programaciones reales de aeronaves convencionales. Los resultados de introducir un RPAS de manera aleatoria en una programación de tráfico real para distinto número de aeronaves convencionales se muestran en la Tabla 41.

Tabla 41. Relación entre $\overline{\tau_{con}}$ cuando se introduce un RPAS en programaciones reales con tráfico exclusivamente conformado por aeronaves convencionales.

Nº Conv.	Nº RPAS	$\overline{\tau_{con}}$ (s)	Relación entre tiempos de duración
2	0	2,4260	3,211
2	1	7,7900	
3	0	8,4067	1,793

3	1	15,0761	
4	0	14,2197	1,895
4	1	26,9511	
5	0	25,6654	1,485
5	1	38,1114	

El perjuicio temporal al introducir un RPAS sobre dos aeronaves convencionales resulta menor que si se hiciese lo propio con una aeronave convencional, como ocurría en el estudio anterior (ver Tabla 40). Sin embargo, esta tendencia se invierte cuando la programación base son tres o cuatro aeronaves convencionales y se introduce un RPAS aleatorio, provocando que la relación entre tiempos de conflicto aumente respecto al caso de las aeronaves convencionales. En último término, añadir un RPAS aleatorio sobre una programación de cinco aeronaves convencionales siguiendo distribuciones reales de tráfico resulta el supuesto más favorable dado que únicamente incrementa los tiempos de conflicto en menos de un 50%.

Puesto que se parte desde un escenario inicial donde el tráfico representativo son aeronaves convencionales según distribución de tráfico real, no van a detallarse las suposiciones de RPAS en solitario por el espacio aéreo. Esto es debido a que su distribución de tráfico continúa siendo aleatoria, sin introducir novedades en el análisis frente a apartados anteriores. Sin embargo, pese a no desarrollar en profundidad estos supuestos con únicamente RPAS, sí va a contrastarse su comportamiento desde el estado del sector donde dos aeronaves integran la programación base.

De esta manera, se expresa en la siguiente tabla la relación entre los tiempos de duración de conflictos al introducir una aeronave sobre una configuración de dos aeronaves del mismo tipo. Los cuatro casos posibles son la introducción de una aeronave (convencional o RPAS) en una programación ya constituida por dos aeronaves convencionales, o bien, la introducción de una aeronave (convencional o RPAS) en una programación ya constituida por dos RPAS. Los resultados de la relación entre tiempos de duración de conflictos para estos casos se adjuntan en la Tabla 42.

Tabla 42. Relación entre $\overline{\tau_{con}}$ cuando se introduce una aeronave en programaciones exclusivamente conformadas por dos aeronaves del mismo tipo.

Nº Conv.	Nº RPAS	Configuración original	Relación entre tiempos de duración
		Configuración nueva	
2	0	Convencionales	3,465
3	0	Convencionales + 1 Convencional	
2	0	Convencionales	3,211

2	1	Convencionales + 1 RPAS	
0	2	RPAS	1,778
1	2	1 Convencional + RPAS	
0	2	RPAS	3,416
0	3	RPAS + 1 RPAS	

Las principales conclusiones obtenidas del análisis del indicador $\overline{\tau_{con}}$ son las siguientes:

- Añadir una aeronave a una programación de ese mismo tipo de aeronave incrementa en casi un 250% la duración de los tiempos de conflicto. Sea el caso de aeronaves convencionales o RPAS, en ambos la relación entre los tiempos de duración se eleva hasta más de 3,4. Esto da cuenta del perjuicio ocasionado consecuencia de ampliar una programación con más aeronaves cuando el número inicial de aeronaves en el sector LECMZGZ es reducido.
- Integrar un RPAS en una programación base de dos aeronaves convencionales según distribución de tráfico real no resulta tan perjudicial como resultaría añadir otra aeronave convencional. El orden de magnitud es prácticamente similar al caso antes planteado, pero es importante remarcar la consideración de que ahora la integración se produce de manera aleatoria por tratarse de un RPAS.
- Finalmente, si una aeronave convencional desarrollase su operativa en conjunto con dos RPAS ya existentes en el espacio aéreo, ello provocaría el menor aumento en los tiempos de conflicto calculados. Esta situación no llega a incrementar ni siquiera en un 80% la duración de los tiempos de conflicto. Puede determinarse, por tanto, que esta configuración es la más apropiada (conforme al indicador $\overline{\tau_{con}}$) para el desarrollo de las operaciones de aeronaves convencionales y RPAS cuando coexisten tres aeronaves distintas en el sector LECMZGZ.

El análisis de resultados de las simulaciones de Monte Carlo reales concluye con la comparación entre los dos últimos indicadores de tiempo hallados. Relacionando el indicador $\overline{\tau_{con}}$ con el tiempo de exposición total al conflicto en segundos, se obtiene una magnitud adimensional. Ella expresa el tiempo en el cual una aeronave se encuentra infringiendo las mínimas de separación respecto a su tiempo de exposición al conflicto. La evolución de estos valores, para cada configuración de aeronaves reales y RPAS aleatorios se acompaña en la Ilustración 38.

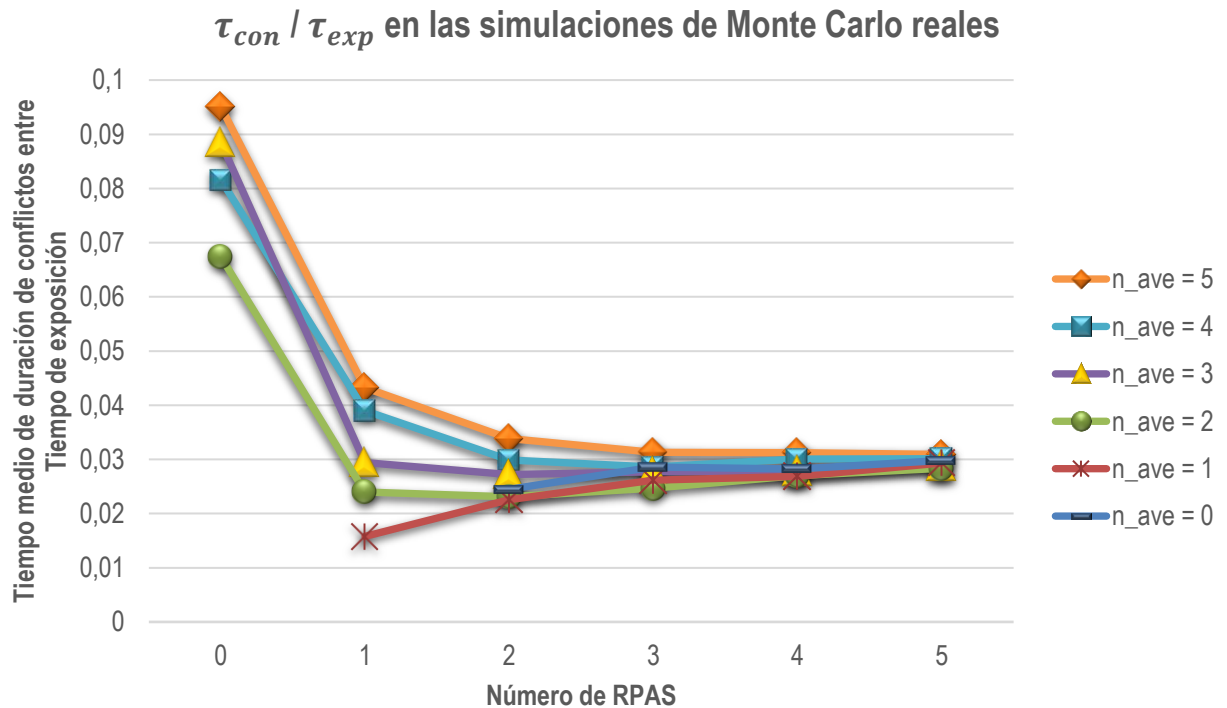


Ilustración 38. τ_{con} / τ_{exp} para cada configuración de aeronaves convencionales según distribución real de tráfico y RPAS aleatorios.

Las series de datos convergen hacia un valor aproximado del 3%. Esto representa que una aeronave estaría sufriendo un conflicto el 3% del tiempo total en el cual se encontrase expuesta al mismo. Llama la atención el pronunciado descenso desde valores de RPAS nulos para la magnitud considerada. Ello es debido a que, en esos cuatro casos, las aeronaves convencionales se distribuyen según tráficos reales por el sector lo cual provoca una concentración en un número menor de aerovías. Consecuentemente, el tiempo de exposición al conflicto disminuye, provocando el aumento de la relación frente al tiempo de duración de conflictos. Conforme se introducen RPAS en el espacio aéreo (los cuales vuelan aleatoriamente por las aerovías) los valores disminuyen, convergiendo hacia una relación en tiempos del 3%.

7.2 Cuantificación del TLS

La realización de simulaciones de Monte Carlo reales ha permitido la obtención de un conjunto de indicadores de seguridad. Para cada una de las configuraciones de aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios se ha obtenido el valor de $\overline{N_c}$, τ_{exp} y $\overline{\tau_{con}}$. En base a estos indicadores es posible establecer un nivel límite de seguridad, también denominado *TLS*, con el cual restringir la operación de aquellas configuraciones que excedan dicho límite. Una vez contrastados individualmente, los tres indicadores se ponen en común para establecer posibles restricciones a determinadas configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS.

La referencia sobre la cual determinar el valor del TLS en el grupo de simulaciones de Monte Carlo reales queda especificada según el valor de los indicadores de la configuración de cuatro aeronaves convencionales. Esta programación, real en la hora pico de operación, ha sido empleada como base en el total de las simulaciones. Fruto del análisis del Ciclo AIRAC 1608 se encontró que el máximo de aeronaves convencionales en dicha hora pico y por un nivel de vuelo era de cuatro. De ahí que haya sido seleccionada esta configuración real de aeronaves, sin presencia de RPAS, como referencia para la cuantificación del TLS. De este modo, el valor límite para cada uno de los indicadores de seguridad en la configuración de cuatro aeronaves convencionales según distribución de tráfico real es el que se expresa en la Tabla 43.

Tabla 43. Valor de los indicadores de seguridad para la cuantificación del TLS en las simulaciones de Monte Carlo reales.

Indicadores de seguridad para la cuantificación del TLS				
Nº Conv.	Nº RPAS	$\overline{N_c}$	τ_{exp}	$\overline{\tau_{con}}$
4	0	0,0822	0,0484	14,2197

En el siguiente apartado se realiza el análisis sobre estos valores de TLS. Para cada uno de ellos va a realizarse un estudio individualizado con intención de conocer el comportamiento del indicador en las simulaciones según distribuciones de tráfico reales desarrolladas. Ello va a permitir conocer cuáles son las configuraciones que menor riesgo de conflicto presentan y las más adecuadas en términos de los indicadores planteados para la introducción aleatoria de RPAS en el espacio aéreo LECMZGZ.

7.3 Restricciones al número de RPAS

Los indicadores de seguridad se han calculado mediante la realización de simulaciones de Monte Carlo reales. Cada configuración de aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios ha sido simulada en 10.000 ocasiones para la obtención de dichos indicadores globales. Puesto que por cada configuración se han alcanzado unos resultados diferentes, el objetivo en este apartado es comparar los valores obtenidos con uno de referencia denominado TLS. Este TLS supone un límite operativo al desarrollo de aquellas operaciones de aeronaves que se encuentren por encima de él.

El análisis pasa por la revisión respecto del valor del *TLS* determinado en el apartado previo de las tablas correspondientes a los diferentes indicadores de seguridad. De este modo, va a adjuntarse cada una de las tablas expuestas anteriormente con los resultados de los tres indicadores y un código de colores que represente la viabilidad en las operaciones. Este código de colores se mantiene respecto del empleado en el apartado 6.3 en la evaluación de restricciones a las configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS, ambos aleatorios.

Las restricciones impuestas al primer indicador, relativo al número de conflictos medio, se muestran en la siguiente tabla. En ella se comparan los distintos valores de \overline{N}_c respecto del TLS (casilla blanca) indicando la posibilidad de realización de operaciones (casillas verdes), restricción a las mismas (casillas rojas) o aquellas configuraciones cercanas al límite pero que convendría estudiar más en detalle. De este modo, las restricciones a la operación de configuraciones de aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios en función del indicador \overline{N}_c por simulación se acompañan en la Tabla 44.

Tabla 44. Restricciones a la operación de configuraciones de aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios en función del indicador \overline{N}_c .

Aeronaves convencionales	RPAS			
	0	1	2	3
0	0	0	0,0294	0,0914
1	0	0,0258	0,0874	0,1813
2	0,0136	0,0703	0,1618	
3	0,0439	0,1249		
4	0,0822	0,2034		
5	0,1445			

Son identificadas cinco configuraciones con número de aeronaves superior a uno que no infringen los márgenes de seguridad determinados por el TLS en función del indicador \overline{N}_c . Estas cinco configuraciones permiten la operación de aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y

RPAS aleatorios en el sector LECMZGZ. Todas ellas involucran un número máximo de tres aeronaves, contando con las siguientes características en función de si se trata de unas u otras configuraciones:

- Cualquiera de las programaciones que involucren un número inferior a cuatro aeronaves convencionales tiene permitida su operación en el sector LECMZGZ. Esto es debido a que el TLS viene determinado por la configuración de cuatro aeronaves convencionales según distribución de tráfico real por lo cual es trivial afirmar que un número menor del mismo tipo de aeronave induzca un menor riesgo sobre las operaciones. De esta manera, la configuración de cinco aeronaves convencionales y ningún RPAS queda restringida para la operación, pero no así las de dos y tres aeronaves convencionales y ningún RPAS, respectivamente.
- Dos de las configuraciones permiten la integración de un RPAS en el espacio aéreo sin vulnerar el valor marcado por el TLS. Es el caso de una y dos aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y un RPAS aleatorio, en cada caso, respectivamente. Es importante destacar que con dichas configuraciones se estaría logrando una integración efectiva de RPAS en un espacio aéreo no segregado como es LECMZGZ, en su fase de ruta.
- La última de las configuraciones que realiza sus operaciones bajo el máximo determinado por el TLS es la de dos RPAS aleatorios. En este caso la integración se produciría de manera exclusiva para los RPAS y sin compartir espacio aéreo con las aeronaves convencionales reales. Los conflictos detectados según este indicador suponen un tercio de los marcados por el TLS, lo cual da cuenta de la viabilidad de esta configuración para sus operaciones.
- Finalmente, existe una configuración que requiere de un estudio particular por su cercanía al valor límite. Se trata de la operación desarrollada por una aeronave convencional según distribución de tráfico real y un RPAS aleatorio. Su valor de \overline{N}_c excede en únicamente 0,0052 conflictos por simulación al límite impuesto por el TLS. Conviene evaluar si se acepta o descarta ese riesgo en la integración de dos RPAS en un espacio aéreo con una aeronave convencional de inicio.

Continuando con el orden expuesto en apartados anteriores, el siguiente indicador analizado es el relativo al tiempo de exposición en cada simulación e instante de tiempo. Para él ha sido generada una nueva tabla en la cual contrastar los diferentes valores obtenidos al respecto de τ_{exp} con respecto al TLS. Para ello se ha hecho uso del código de colores anteriormente explicado. Así, las restricciones impuestas a la operación de configuraciones de aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios en función del indicador τ_{exp} se muestran en la Tabla 45.

Tabla 45. Restricciones a la operación de configuraciones de aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios en función del indicador τ_{exp} .

Aeronaves convencionales	RPAS		
	0	1	2
0	0	0	0,0920
1	0	0,0432	0,1776
2	0,0100	0,0903	
3	0,0264	0,1424	
4	0,0484	0,1920	
5	0,0750		

Se produce un notable descenso en el número de configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS permitidas según la comparación con el TLS de τ_{exp} . Únicamente tres configuraciones con un número superior a una aeronave quedan permitidas respecto del valor límite. Las principales características que ellas presentan se detallan, a continuación:

- Todas aquellas programaciones de aeronaves convencionales de número inferior a cuatro (la que determina el TLS) están permitidas en el espacio aéreo LECMZGZ. Esta conclusión ya es evidente desde el apartado de las simulaciones de Monte Carlo aleatorias y en el apartado anterior respecto del indicador \overline{N}_c de las simulaciones reales. Sin embargo, debido al seguimiento de distribuciones de tráfico real, se produce una disminución claramente apreciable en los valores de τ_{exp} de las configuraciones sin RPAS. Las aeronaves encuentran su operación restringida a un número inferior de aerovías, lo cual provoca el descenso de su tiempo de exposición en el sector. Ello genera que la introducción de RPAS aleatorios eleve por encima del TLS sus valores de τ_{exp} .
- La configuración de una aeronave convencional según distribución de tráfico real y un RPAS tiene permitida la operación según el indicador τ_{exp} . Pese a encontrarse cerca del TLS, la operación de estas dos aeronaves en el espacio aéreo LECMZGZ sería posible sin suponer ello un perjuicio sobre la seguridad global del sector LECMZGZ. No existe ningún otro caso en el cual aeronaves convencionales y RPAS pudiesen desarrollar operaciones no segregadas en base al indicador τ_{exp} . Tampoco se da el caso de ningún valor en celdas amarillas que requiriese de un estudio más detallado dado que el resto de valores calculados se aleja en mayor o menor medida del TLS.

Por último, se procede a la comparación del indicador $\overline{\tau}_{con}$ respecto del valor determinado por el TLS. Este corresponde al tiempo medio de duración de conflictos de $\overline{\tau}_{con} = 14,2197$ establecido por la configuración de cuatro aeronaves convencionales según distribución de tráfico real. Por tanto, los datos

relativos a las restricciones a la operación de configuraciones de aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios en función del indicador $\overline{\tau}_{con}$ se resumen en la Tabla 46.

Tabla 46. Restricciones a la operación de configuraciones de aeronaves convencionales según distribución de tráfico real y RPAS aleatorios en función del indicador $\overline{\tau}_{con}$.

Aeronaves convencionales	RPAS			
	0	1	2	3
0	0	0	8,1087	27,6968
1	0	2,4558	14,4201	35,4433
2	2,4260	7,7900	21,2876	
3	8,4067	15,0761		
4	14,2197	26,9511		
5	25,6654			

La apariencia de los resultados vuelve a ser parecida a los del indicador \overline{N}_c tras el análisis de τ_{exp} . Se permite la operación de cinco configuraciones con más de una aeronave en su programación. Igualmente, es identificada otra adicional cuyo valor del indicador queda cercano al determinado por el TLS. Las características para cada uno de los grupos de simulaciones caracterizados durante este análisis son las que se explican, a continuación:

- Se mantienen las configuraciones de aeronaves convencionales sin RPAS inferiores al límite marcado por el TLS. Cualquier programación de exclusivamente aeronaves convencionales de número menor que cuatro puede desarrollar su operación sin suponer ello un perjuicio sobre la seguridad.
- Dos de las configuraciones permiten la integración de un RPAS en el espacio aéreo LECMZGZ. Son las correspondientes a una y dos aeronaves convencionales, respectivamente, más el RPAS.
- Una de las configuraciones favorece la integración de dos RPAS, pero en este caso, sin presencia de aeronaves convencionales. Su operación se desarrollaría algo por encima del 50% respecto del TLS.
- La configuración de una aeronave convencional y dos RPAS es susceptible de permitir la integración de estos últimos. No obstante, su valor de $\overline{\tau}_{con}$ es algo superior al del TLS por lo cual habría que efectuar un estudio individualizado para comprobar que no se infringen los mínimos de seguridad.

Una vez conocidas las restricciones que impone cada uno de los indicadores de seguridad por separado, se contrasta la información de todos ellos para establecer las limitaciones globales en el espacio aéreo LECMZGZ. En algunos de los casos de estudio se han alcanzado las mismas conclusiones entre unos

indicadores y otros, pero también se han encontrado otros en particular que limitaban el desarrollo de ciertas operaciones. Se concluye este apartado, por tanto, con las configuraciones permitidas de aeronaves convencionales según distribución real de tráfico y RPAS aleatorios según la Tabla 47.

Tabla 47. Configuraciones permitidas de aeronaves convencionales según distribución real de tráfico y RPAS aleatorios según los indicadores de seguridad.

Aeronaves convencionales	RPAS		
	0	1	2
0	Sí	Sí	No
1	Sí	Sí	No
2	Sí	No	
3	Sí	No	
4	TLS	No	
5	No		

Un número muy reducido de configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS puede desarrollar sus operaciones de manera segura en las simulaciones de Monte Carlo reales. Igualmente, sólo existe una configuración donde puedan integrarse RPAS junto a aeronaves convencionales y es el caso de una aeronave de cada tipo, exclusivamente. Los resultados de esta tabla de configuraciones permitidas vienen fundamentalmente influidos por los valores del indicador τ_{exp} . Éste limita en gran medida las operaciones puesto que el TLS lo determina una configuración de sólo aeronaves convencionales según distribución de tráfico real. Ella presenta uno de los valores más bajos en lo que a exposición se refiere. Este hecho condiciona al resto de configuraciones, ya con RPAS aleatorios, que se encuentran más expuestas al conflicto.



HOJA DEJADA INTENCIONADAMENTE EN BLANCO

8 COMPARATIVA ENTRE SIMULACIONES DE MONTE CARLO

El objetivo en este apartado es la cuantificación de un TLS operativo en el espacio aéreo LECMZGZ. Para llegar a esta conclusión se comparan los resultados obtenidos de la realización de los dos grupos de simulaciones de Monte Carlo. Durante esta investigación se han generado distintas trayectorias de aeronaves en base a distribuciones de tráfico tanto aleatoria como real. Las aeronaves simuladas en el escenario de ruta han sido tanto RPAS, como aeronaves convencionales como combinaciones de ambas. En cada uno de los grupos de simulaciones de Monte Carlo se han empleado 33 configuraciones diferentes de aeronaves convencionales y RPAS, obteniendo un conjunto de indicadores de seguridad en cada caso.

La operatividad del TLS va a venir determinada por el valor de los indicadores de seguridad. Siempre que en alguna de las configuraciones entre aeronaves convencionales y RPAS el valor de cualquier indicador vulnere su respectivo TLS, esto impide que dicha configuración sea válida para su desarrollo. La realización de operaciones en el sector de acuerdo a dicha configuración supondría un riesgo adicional en el escenario de ruta seleccionado. De esta manera, van a ser contrastados los indicadores de seguridad obtenidos.

En las siguientes ilustraciones se muestra la evolución de los parámetros definidos según se trate del grupo de simulaciones aleatorias (gráfico de la izquierda), o bien, reales (gráfico de la derecha). En primer lugar, en la Ilustración 39, se acompañan las líneas de tendencia para el indicador N_c en los dos grupos de simulaciones de Monte Carlo realizadas.

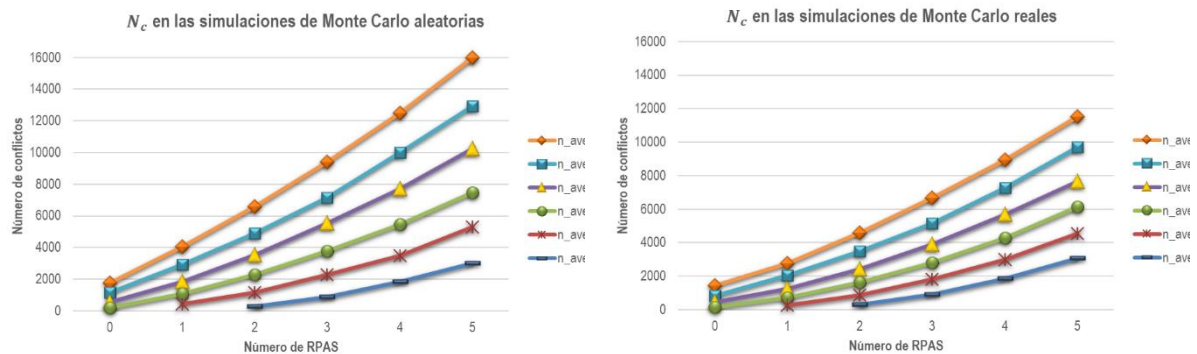


Ilustración 39. Comparación del indicador N_c entre los dos grupos de simulaciones.

Para conseguir una mejor visualización de resultados, se han ajustado ambos ejes al valor máximo determinado por la configuración de cinco aeronaves convencionales y cinco RPAS de la simulación aleatoria. Puede apreciarse cómo para los casos reales se produce una disminución global en el número de conflictos. En consecuencia, la divergencia entre series resulta menor, quedando más agrupadas en los casos con mayor número de aeronaves en la programación. A la vista de los resultados y, en términos generales, se determina que la relación entre los valores de N_c en los dos grupos de simulaciones es un 25% inferior en los casos en los cuales las aeronaves siguen distribuciones de tráfico reales y, los RPAS, aleatorias.

En relación al primer indicador, N_c también puede contrastarse la evolución en el número de simulaciones con conflictos entre los dos grupos de simulaciones de Monte Carlo. En los apartados anteriores se incluyeron las gráficas correspondientes a un número de aeronaves fijo mientras las líneas de tendencia expresaban la información de los distintos RPAS simulados en el espacio aéreo. Como punto de partida se comienza analizando las gráficas correspondientes a 0 y 1 aeronave convencional en el sector LECMZGZ según distribuciones aleatorias (izquierda) o reales (derecha) en la Ilustración 40.

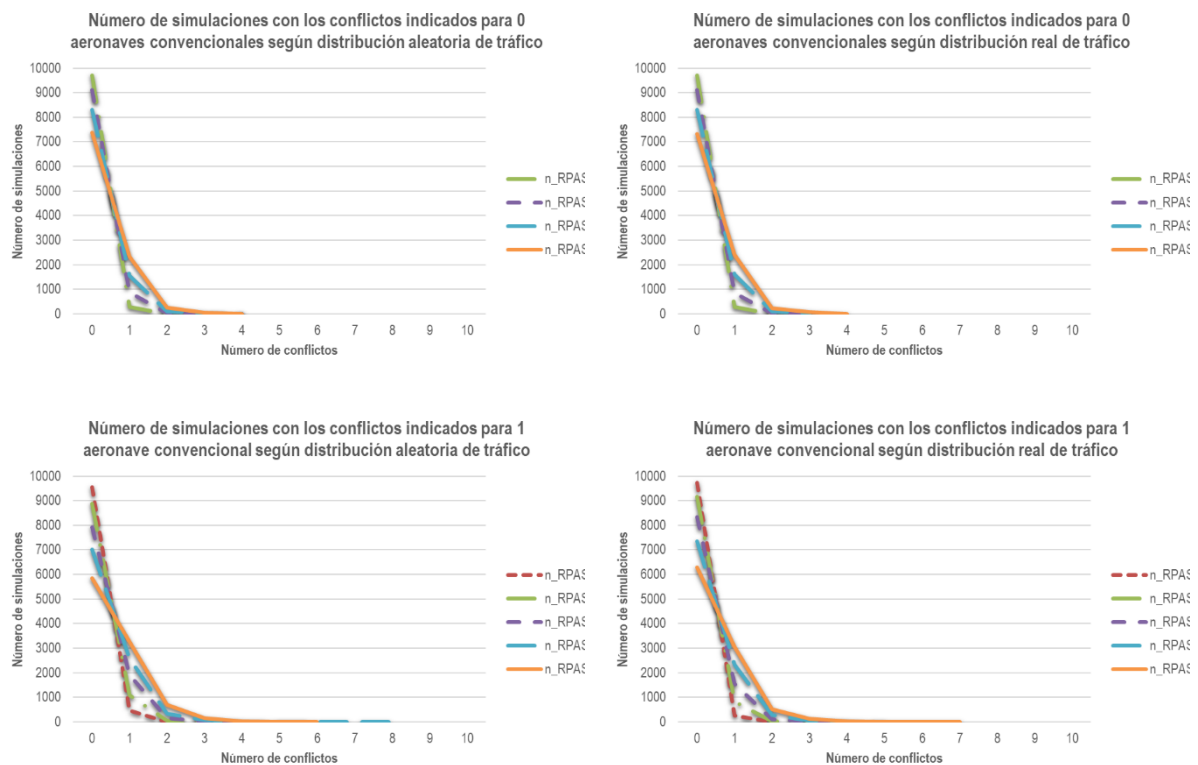


Ilustración 40. Comparación de las simulaciones con conflictos para 0 y 1 aeronave convencional.

Las diferencias entre las simulaciones con tráficos aleatorios y reales son prácticamente inapreciables. Esto es debido a que, en estos dos casos, el número de aeronaves convencionales es muy reducido en comparación al número de RPAS. Las aeronaves convencionales pueden operar de manera aleatoria por las aerovías o siguiendo distribuciones de tráfico real. En estos dos primeros casos predomina el comportamiento de los RPAS, que operan siempre con aleatoriedad por las distintas aerovías del sector LECMZGZ. Así puede notificarse en las gráficas superiores una evolución en las líneas de tendencia prácticamente similar, aunque, atendiendo a los datos anteriormente recogidos en la Tabla 20 y la Tabla 37 se comprueba que existen ligeras disimilitudes entre los distintos casos.

En segundo lugar, se efectúa este mismo estudio para el número de 2 y 3 aeronaves convencionales con distintos valores de RPAS en el escenario de ruta. De este modo, se plasma en la siguiente ilustración la evolución en el número de simulaciones con los conflictos indicados para 2 aeronaves convencionales (gráficas superiores) y un número variable de RPAS. Mientras, en las gráficas inferiores se acompaña la

misma información para un número constante de 3 aeronaves convencionales. Se recuerda que las gráficas a la izquierda corresponden a simulaciones aleatorias y las de la derecha a simulaciones reales. La comparación en la evolución de las series de datos del número de simulaciones con el número de conflictos indicado se muestra en la Ilustración 41.

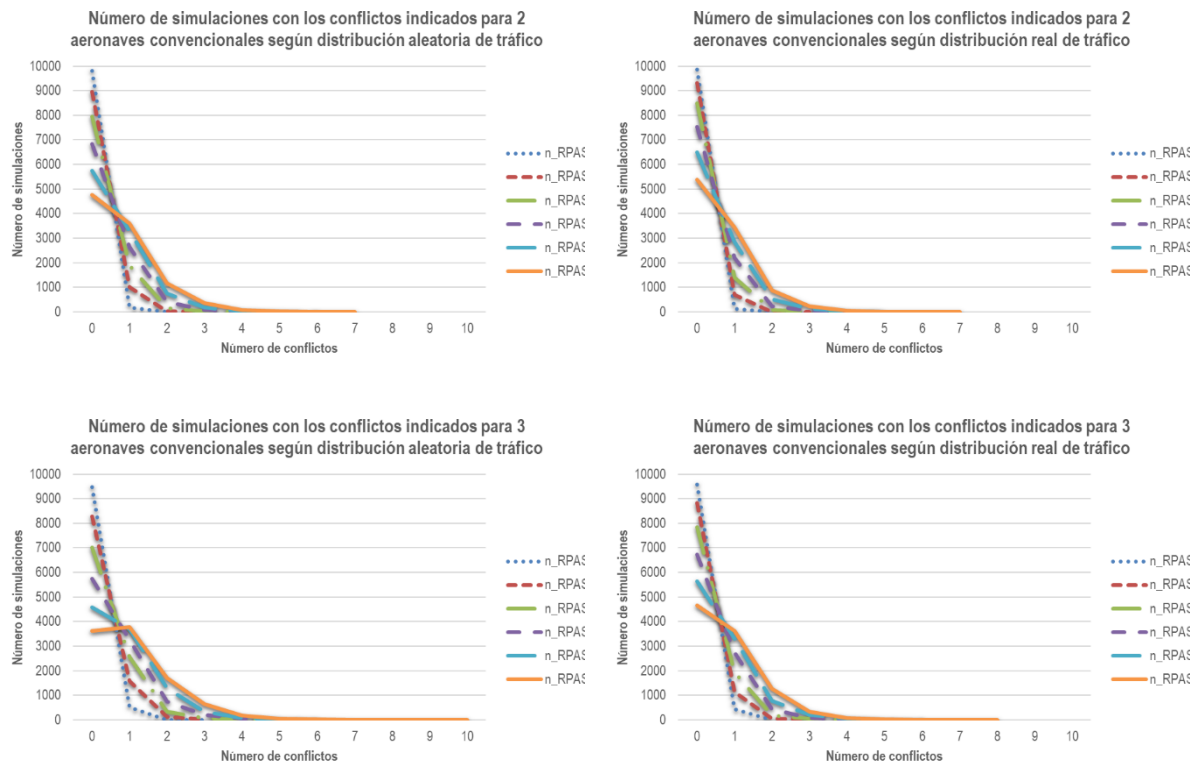


Ilustración 41. Comparación de las simulaciones con conflictos para 2 y 3 aeronaves convencionales.

Comienzan a apreciarse las primeras diferencias entre la tendencia de las series. En los últimos casos planteados, ya figura la información del número completo de RPAS involucrados en el estudio (de 0 hasta 5). Puede identificarse cómo, a partir de 3 aeronaves convencionales, las series con mayor número de aeronaves tienden a converger más lentamente hacia número de simulaciones con los conflictos indicados nulos. Es más, en el caso aleatorio se produce un mantenimiento inicial del número de conflictos entre 0 y 1 mientras que en el caso real (abajo a la derecha) la tendencia es todavía descendente.

Para finalizar el estudio del indicador N_c se incluyen las gráficas correspondientes al número de simulaciones con los conflictos indicados de un número constante de aeronaves convencionales igual a 4 y 5. Este último conjunto de simulaciones son las que integran un mayor número de aeronaves en el espacio aéreo LECMZGZ. Por tanto, su apariencia presenta notables diferencias entre los resultados anteriores. De esta manera, la información correspondiente a la evolución del número de simulaciones con los conflictos indicados para un número constante de 4 o 5 aeronaves convencionales se adjunta en la Ilustración 42.

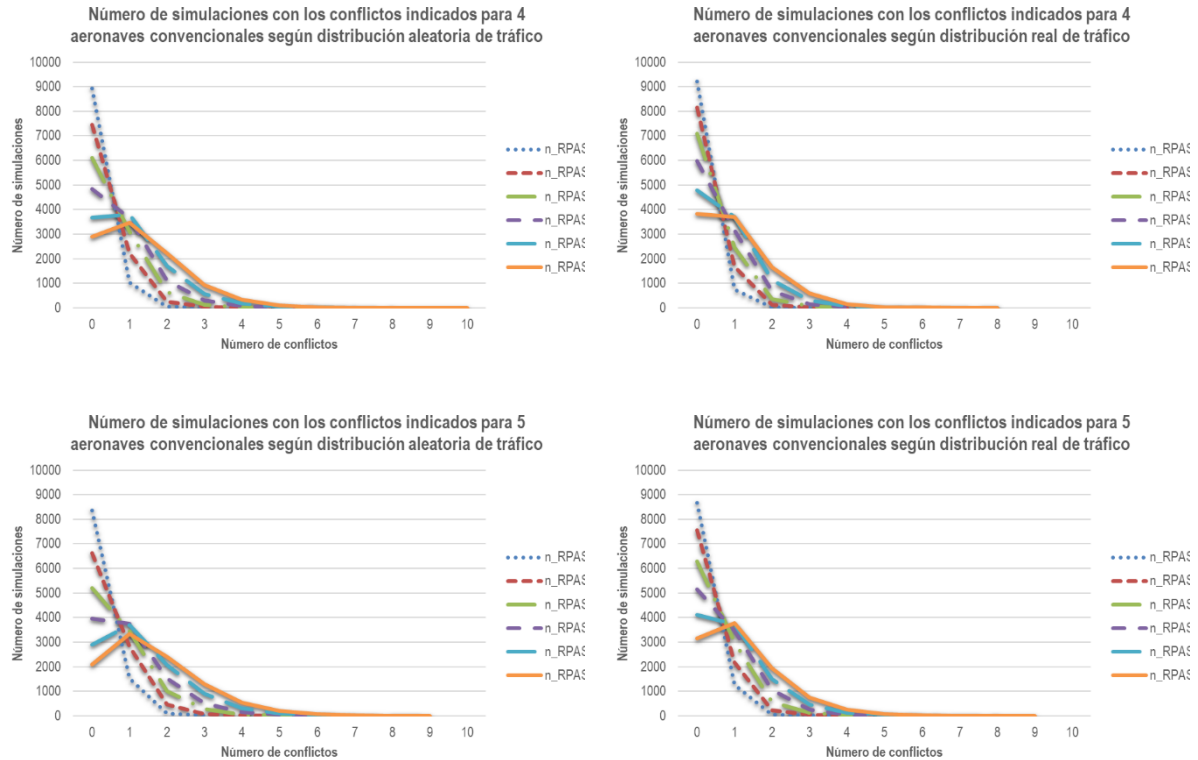


Ilustración 42. Comparación de las simulaciones con conflictos para 4 y 5 aeronaves convencionales.

Como pudo observarse en la Ilustración 39, el número de conflictos resulta más crítico en el supuesto aleatorio que en el grupo de simulaciones reales. Consecuentemente, las líneas de tendencia evolucionan con menor rapidez cuando las aeronaves convencionales siguen distribuciones de tráfico reales que en los casos aleatorios. No obstante, ello no provoca que se produzca una inversión en la tendencia llegando a producirse más simulaciones con un conflicto que con ninguno cuando diez aeronaves desarrollan su programación según distribución de tráfico real (gráfica abajo a la derecha). Puede determinarse, por tanto, que la tendencia esperada en los dos casos es similar, pero evoluciona más lentamente cuando las simulaciones son reales.

Conocidas las diferencias con respecto al primero de los indicadores, se avanza al análisis del segundo de cuantos considerados, τ_{exp} . Para ello, el proceso seguido va a ser similar al primero de los desarrollados, N_c . Primeramente, se contrasta la evolución del indicador en los dos grupos de simulaciones respecto a unos ejes de ordenadas ajustados a los mismos valores. Esta ilustración tiene por objetivo comparar cuál de los casos se encuentra más expuesto al conflicto en cada una de sus configuraciones. De esta forma, se incluye en la Ilustración 43 la comparación de los valores del indicador τ_{exp} entre los grupos de simulaciones de Monte Carlo aleatorias y reales.

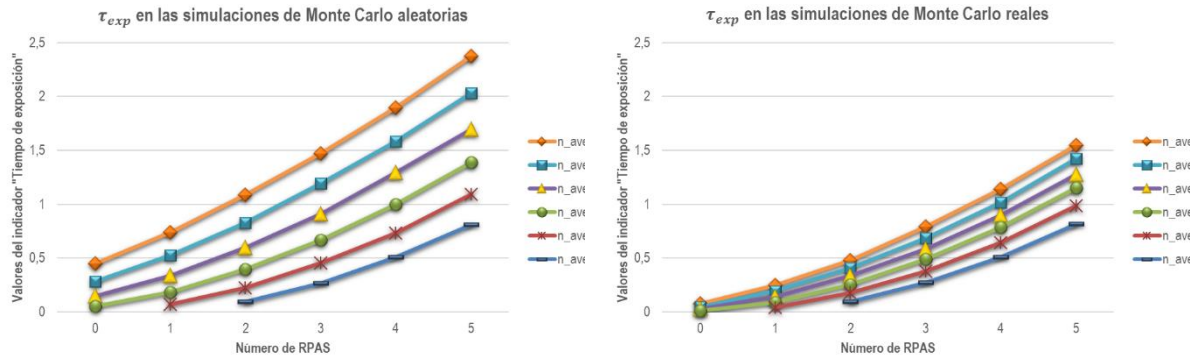


Ilustración 43. Comparación del indicador τ_{exp} entre los dos grupos de simulaciones.

En este caso puede apreciarse cómo los valores del indicador de tiempos de exposición son más elevados en los casos de simulaciones aleatorias que en los reales. Nuevamente, se repite la tendencia identificada de manera previa en la Ilustración 39 aunque incluso de forma más evidente. La relación entre los valores de los grupos aleatorios y reales presenta una diferencia del 40% menos del segundo respecto del primero, mientras que en el caso de N_C era del 25%. La divergencia entre las distintas series es mucho menor en las simulaciones de Monte Carlo reales, presentando un avance prácticamente en paralelo entre ellas. Este hecho viene en gran parte condicionado por el cercano origen de todas sus series alrededor de un valor adimensional de 0,05. Finalmente, puede detectarse una línea de tendencia en torno a la cual pivotan el resto de series, siendo ella “ $n_{ave} = 0$ ”. En ambos grupos de simulaciones los RPAS siguen distribuciones de tráfico aleatorias por lo que su apariencia es similar entre ambas gráficas.

En último término, se expone la comparación del tercero de los indicadores seleccionados en el estudio, $\overline{\tau_{con}}$. Para continuar con el *modus operandi* expuesto durante este apartado, se han generado las gráficas correspondientes a este indicador y que no habían sido mostradas anteriormente. De este modo, en la siguiente ilustración se incluye la evolución del tiempo total de duración de conflictos en las simulaciones de Monte Carlo aleatorias y reales. Dicha información, para cada uno de los grupos y sus configuraciones se acompaña en la Ilustración 44.

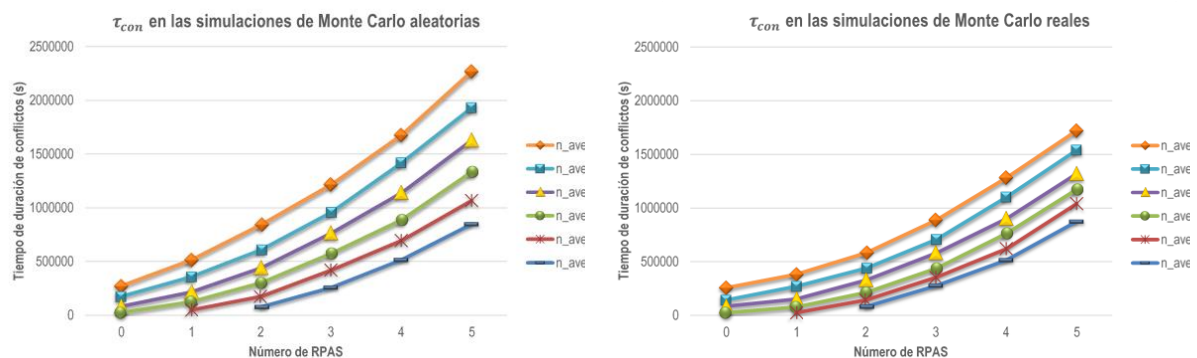


Ilustración 44. Comparación del indicador $\overline{\tau_{con}}$ entre los dos grupos de simulaciones.

Puede observarse la tendencia identificada tanto con el indicador N_c como con τ_{exp} . Los valores de $\overline{\tau_{con}}$ evolucionan de manera menos pronunciada en el caso de las simulaciones reales que en el de las aleatorias. A nivel comparativo, su divergencia respecto del estado inicial se encontraría en un punto intermedio entre τ_{exp} (menor divergencia) y N_c (mayor divergencia). Sin embargo, el valor cuantitativo que ofrece su relación numérica se sitúa en torno a un tiempo medio de duración de conflictos un 20% inferior en el caso de las simulaciones reales frente a las simulaciones aleatorias. Esto lo sitúa como el indicador más parejo entre los dos grupos, pese a la apariencia cualitativa de las series.

Finalmente, podían relacionarse los dos últimos indicadores (referidos a tiempos) de manera adimensional para comparar cuánto tiempo se encuentran sufriendo un conflicto un par de aeronaves del total del tiempo que se encuentran expuestas al mismo. Esta relación se resumía según la expresión τ_{con} / τ_{exp} . De esta manera, en la Ilustración 45 se muestra la evolución de las series de datos relativas a la expresión antes formulada para las simulaciones de Monte Carlo aleatorias (izquierda) y reales (derecha).

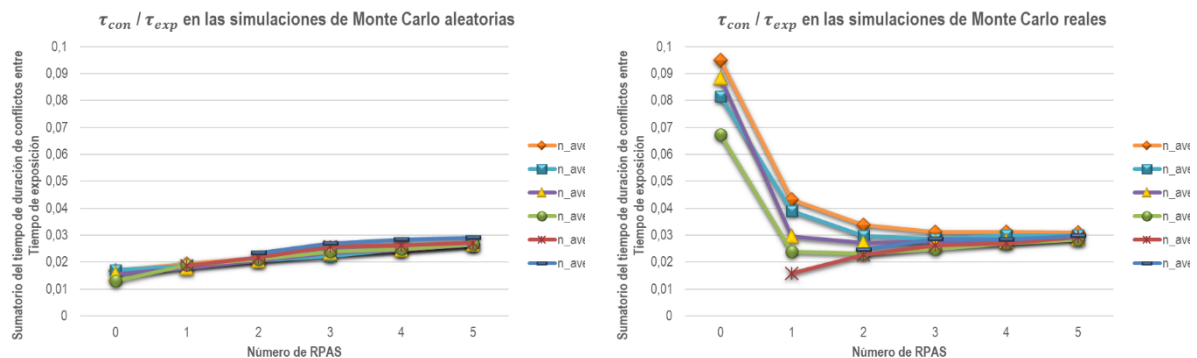


Ilustración 45. Comparación de la relación τ_{con} / τ_{exp} entre los dos grupos de simulaciones.

En este caso no se produce divergencia entre las distintas series sino la tendencia contraria. Todas ellas, además en ambos grupos de simulaciones, convergen hacia un valor que relaciona τ_{con} / τ_{exp} . Dicho valor, como ya fue comentado durante el desarrollo en apartados previos (ver Ilustración 25 e Ilustración 38) se sitúa en torno a 0,03. Esta magnitud viene a significar que, del total de tiempo que una aeronave se encontraría expuesta al conflicto, únicamente un 3% del mismo se encontraría en situación de conflicto con otras aeronaves. Cabe recordar la característica particular inicial de las series en las simulaciones de Monte Carlo reales donde se produce un descenso de los valores obtenidos hacia el valor de 0,03. Esto es debido a la ausencia de RPAS en todas las configuraciones de aeronaves lo cual provoca que la totalidad de las mismas, aeronaves convencionales, sigan distribuciones de tráfico real. El tráfico se concentra en un número inferior de aerovías, disminuyendo la exposición, hecho que genera que la relación τ_{con} / τ_{exp} aumente. Conforme se introducen RPAS y, por ende, aleatoriedad en las simulaciones, la relación disminuye.

En conclusión, resta comentar las configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS permitidas de acuerdo a las restricciones operativas impuestas por el TLS. Fruto del análisis de los tres indicadores de seguridad planteados se han obtenido determinadas programaciones de aeronaves que pueden operar, sin producir con ello un aumento del riesgo, en el sector LECMZGZ. La última fase efectuada durante el

estudio de los resultados de los dos grupos de simulaciones fue determinar, individualmente, qué configuraciones podían realizar sus operaciones de manera segura. Con intención de refrescar dicha información, se incluyen en la siguiente ilustración las dos tablas obtenidas anteriormente con el código de colores utilizado mediante el cual se señalan los distintos pareceres de cada configuración de aeronaves. De este modo, la información relativa a las restricciones a las configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS introducidas por los diferentes valores de TLS considerados se incluye la Ilustración 46.

Aeronaves convencionales aleatorias	RPAS aleatorios						Aeronaves convencionales reales	RPAS aleatorios					
	0	1	2	3	4	5		0	1	2	3	4	5
0	Sí	Sí	Sí	No	No	No	0	Sí	Sí	No	No	No	No
1	Sí	Sí	Duda	No	No	No	1	Sí	Sí	No	No	No	No
2	Sí	Sí	No	No	No	No	2	Sí	No	No	No	No	No
3	Sí	No	No	No	No	No	3	Sí	No	No	No	No	No
4	TLS	No	No	No	No	No	4	TLS	No	No	No	No	No
5	No	No	No	No	No	No	5	No	No	No	No	No	No

Ilustración 46. Comparación de las restricciones a las configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS introducidas en los dos grupos de simulaciones.

Son identificadas cinco configuraciones de aeronaves convencionales aleatorias y RPAS aleatorios cuya operación no significa un aumento en los niveles de riesgo respecto del TLS. En cambio, el número se reduce a tres configuraciones cuando las aeronaves convencionales siguen distribuciones de tráfico real. El TLS impuesto en el grupo de simulaciones de Monte Carlo reales es más restrictivo por la utilización de unas aerovías y distribuciones de tráfico en concreto por parte de las aeronaves convencionales. Al operar los RPAS según distribuciones de tráfico aleatorias ello provoca un aumento de la incertidumbre y, en consecuencia, del riesgo global del sector LECMZGZ. De esta manera, las configuraciones de aeronaves de número superior a cero cuya operación estaría permitida de acuerdo al TLS de ambos grupos de simulaciones serían las siguientes:

- 3 aeronaves convencionales y 0 RPAS.
- 2 aeronaves convencionales y 0 RPAS.
- 1 aeronave convencional y 0 RPAS.
- 1 aeronave convencional y 1 RPAS.
- 0 aeronaves convencionales y 1 RPAS.



HOJA DEJADA INTENCIONADAMENTE EN BLANCO

9 PROCESO DE ENCAMINAMIENTO DEL PLAN DE VUELO PARA RPAS

Una vez determinado el número de RPAS que pueden operar junto a aeronaves convencionales en un espacio aéreo. El último objetivo de este proyecto es desarrollar el proceso de encaminamiento del plan de vuelo para RPAS. Este proceso de encaminamiento del plan de vuelo está desarrollado para la aviación convencional. No obstante, la introducción de operadores de RPAS con los mismos fines en el espacio aéreo controlado y no segregado requiere de un análisis y una propuesta sobre el modo a realizar este proceso de encaminamiento de planes de vuelo. Este y los siguientes apartados constituyen una propuesta de guía para el operador de un RPAS con el fin de validar su plan de vuelo. Esta propuesta engloba el proceso por el cual se validará la implantación de un plan de vuelo seguro para los RPAS.

La Ilustración 47 muestra esquemáticamente los pasos a seguir hasta el momento de aprobación del plan de vuelo de un RPAS los cuales se describirán más adelante en esta parte.

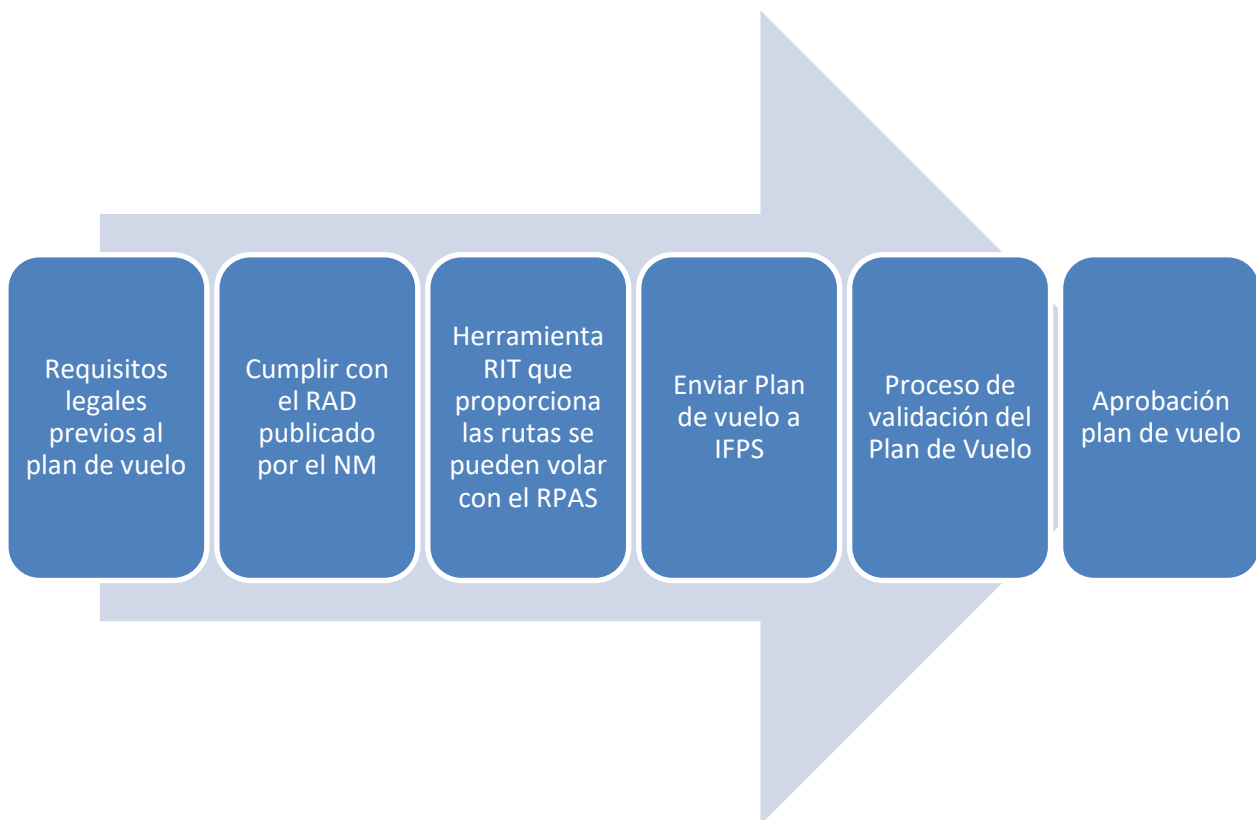


Ilustración 47: Diagrama de pasos a seguir para la aprobación de un plan de vuelo RPAS.

9.1 Descripción de los requisitos previos al Plan de Vuelo

En el vuelo de un RPAS por un espacio aéreo controlado es imprescindible y de obligado cumplimiento presentar un plan de vuelo. El encaminamiento para la presentación de este se explicará con profundidad más adelante debido a que previamente se han de conocer los requisitos a cumplir como operador en España.

Se toma como caso de interés un RPAS realizando operaciones especializadas en un espacio aéreo controlado con pilotaje BVLOS y MTOW (Maximum Take Off Weight) >2Kg.

9.1.1 Autorización AESA (Agencia Estatal de Seguridad Aérea)

La información acerca de la autorización necesaria por parte de la AESA para realizar un vuelo con RPAS se encuentra en el documento de procedimiento de solicitud de autorización para operaciones aéreas especiales (Ministerio de Fomento, 2018), referido al artículo 40 (Presidencia, Real Decreto 1036 , 2017).

Para poder realizar un vuelo de este tipo es necesaria una autorización de la AESA, la cual se concederá cumpliendo una serie de requisitos expuestos a continuación.

En primer lugar, en cuanto a documentación general, es necesaria una caracterización del RPAS, un estudio aeronáutico de seguridad de la operación, una póliza de seguro, una protección del RPAS de interferencias ilícitas y una documentación que refleja que la aeronave está pilotada por pilotos que cumplan con los requisitos del (Presidencia, Real Decreto 1036 , 2017).

Las operaciones especializadas también denominadas trabajos técnicos, científicos o trabajos aéreos, son cualquier operación, ya sea comercial o no comercial, que se realiza con un RPAS para realizar actividades tales como la investigación o desarrollo, actividades agroforestales, levantamientos aéreos, fotografía, vigilancia, observación y patrulla, incluyendo la filmación, publicidad aérea, emisiones de radio y televisión, lucha contra incendios, lucha contra la contaminación, prevención y control de emergencias, búsqueda y salvamento o entrenamiento y formación práctica de pilotos remotos.

Por lo tanto, será necesario presentar un manual de operaciones y de instrucción si procede, un programa de mantenimiento y una acreditación de vuelos de prueba.

Si el RPAS tiene un peso de más de 25 kg es necesario un certificado de aeronavegabilidad, así como cumplir los requisitos referidos en el documento (Presidencia, Real Decreto 1036 , 2017) entre los que destacan:

- Tener identificado el RPAS (Artículo 8).
- Respetar las distancias mínimas de seguridad (Artículo 23.ter.3.b).
- Cumplir con los requisitos de los equipos (Artículo 23).
- Cumplir con los requisitos del operador indicados (Artículo 26).
- Establecer un área de protección y zona de recuperación (Artículo 30).
- Está prohibido llevar objetos y sustancias peligrosas (Artículo 31)
- El pilotaje BVLOS requiere, además, de un dispositivo de visión orientado hacia delante y un sistema de detección y evasión aprobado por AESA. Para volar en espacio aéreo controlado es necesario un equipo de comunicaciones y de frecuencia adecuadas, una certificación de radiofonista emitido por una ATO o Escuela de Ultraligeros, un conocimiento adecuado del idioma y un estudio de seguridad específico coordinado con el proveedor de servicios de tránsito

aéreo. Si la aeronave tiene un MTOW>25Kg o la operación es en BVLOS o EVLOS (Extended Visual Line of Sight) la aeronave necesita un transpondedor Modo S.

Únicamente podrán realizarse vuelos nocturnos con sujeción a las limitaciones y condiciones que establezca un estudio aeronáutico de seguridad en el que se constata la seguridad de la operación y además serán necesarias luces para garantizar la visibilidad del RPAS.

El proceso de autorización de un vuelo de RPAS por parte de la AESA en las condiciones mencionadas anteriormente seguirá el siguiente flujo de acontecimientos de la Ilustración 48.

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE AUTORIZACION PARA OPERACIONES ESPECIALIZADAS

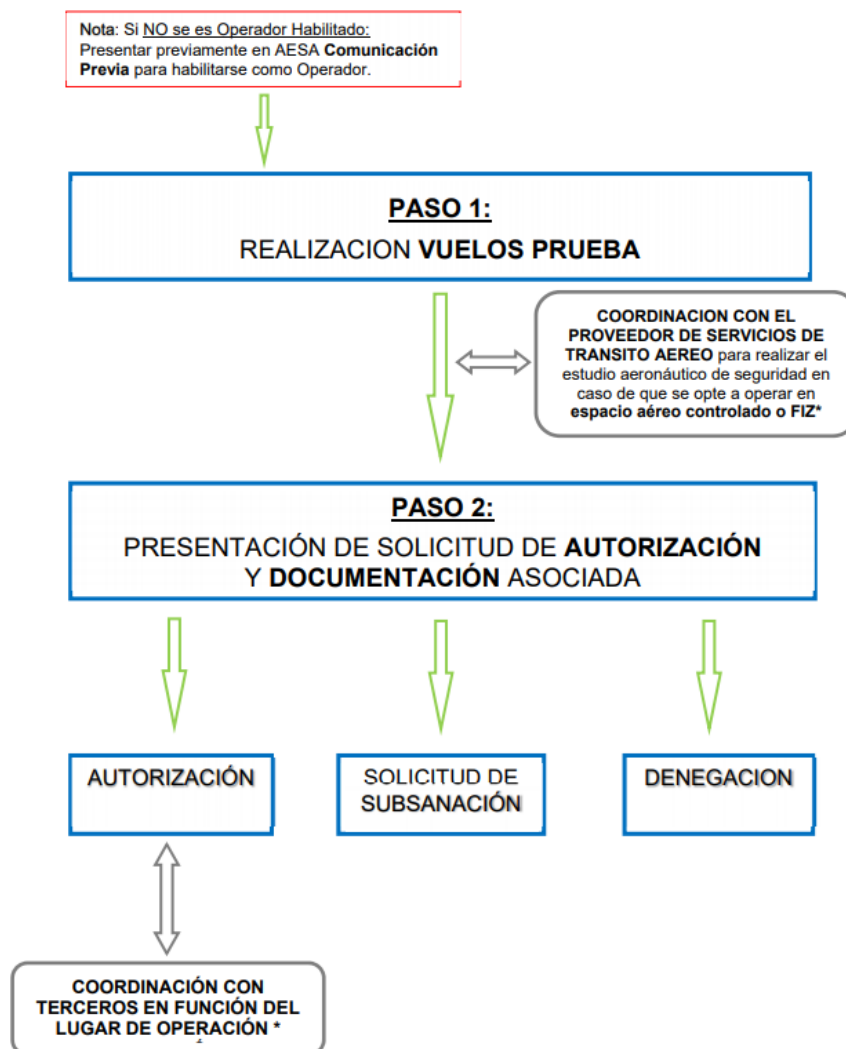


Ilustración 48: Diagrama de flujo del proceso de autorización para operaciones especializadas.
Fuente: (Ministerio de Fomento, 2018)

9.1.2 Coordinación con terceros

Según el documento (Ministerio de Fomento, 2018) tras recibir la autorización de la AESA para llevar a cabo el vuelo del RPAS el siguiente paso es la coordinación con terceros en función del lugar de operación. La información necesaria para llevar a cabo la coordinación con terceros en función del lugar de operación se encuentra recogida en el documento (Ministerio de Fomento, 2018).

9.1.2.1 Estudio aeronáutico de seguridad coordinado con el ATSP

La realización de operaciones aéreas especializadas en espacio aéreo controlado o dentro de zonas de información de vuelo (FIZ) requiere la elaboración de un estudio aeronáutico de seguridad, realizado al efecto por el operador y coordinado con el ATSP (Proveedor de servicios de tránsito aéreo) designado en el espacio aéreo de que se trate, de forma que se constate la seguridad de la operación. Esta coordinación debe realizarse antes de la presentación de la solicitud de autorización ante AESA.

El proveedor y el horario de servicios de tránsito aéreo (ATS) se detalla en el AIP (Aeronautical Information Publication), dependiendo de la zona de operación. Junto a la solicitud de autorización ante AESA, el operador deberá presentar el estudio de seguridad completo (art 26 letra b, (Presidencia, Real Decreto 1036 , 2017)), incluyendo la parte específica coordinada con el proveedor de servicios de tránsito aéreo (ATSP).

9.1.2.2 Autorización del control de tránsito aéreo o comunicación al personal AFIS

Una vez obtenida la correspondiente autorización de AESA para operar en este tipo de espacio aéreo, será necesaria la implementación de las medidas de mitigación estratégicas y tácticas definidas en el estudio de seguridad.

Será necesaria la previa autorización del control de tráfico aéreo (ATC) o comunicación al personal de información de vuelo de aeródromo (AFIS) de los vuelos a realizar, dependiendo del caso.

Si el espacio aéreo en el que se va a desarrollar la operación del RPAS se encuentra total o parcialmente dentro de las distancias mínimas descritas en el artículo 23 ter b (Presidencia, Real Decreto 552, 2014) el operador del RPAS remitirá la solicitud de coordinación de la operación directamente al gestor aeroportuario. Si la operación solicitada se lleva a cabo en un espacio aéreo en los que se prestan servicios de tránsito aéreo por más de un proveedor, el gestor aeroportuario será el encargado de remitir a cada uno de los proveedores la información correspondiente a la solicitud.

Si el espacio aéreo en el que se va a desarrollar la operación del RPAS se encuentra totalmente fuera de las distancias mínimas descritas en el artículo 23 ter b) del (Presidencia, Real Decreto 552, 2014) el operador del RPAS remitirá la solicitud de coordinación táctica de la operación directamente al ATSP designado para prestar servicios en dicho espacio aéreo. El ATSP podrá tomar en consideración la necesidad de coordinar, a su vez, con el gestor aeroportuario correspondiente.

En el caso de operaciones en dependencias gestionadas por proveedores ATS del Ministerio de Defensa, se dispone de procedimiento publicado en la circular aeronáutica nacional (Enaire, Circular aeronáutica nacional, 2017) publicada en el AIP.



9.1.2.3 Presentación del Plan de Vuelo para los servicios de tránsito aéreo

Para dar cumplimiento al reglamento SERA y la normativa española vigente (Presidencia, Real Decreto 1036 , 2017) las siguientes operaciones de RPAS están obligadas a presentar un plan de vuelo : los vuelos en espacio aéreo controlado o zona de información de vuelo FIZ, en áreas designadas de coordinación con dependencias militares o de servicios de tránsito aéreo de estados adyacentes, cruzando fronteras internacionales o de noche si se opera desde las proximidades de un aeródromo. Además, en el plan de vuelo deberá indicarse que se trata de un vuelo no tripulado (Presidencia, Real Decreto 1036 , 2017).

9.2 Documento de disponibilidad de rutas (RAD)

En este apartado de la propuesta se desarrolla una descripción del documento de disponibilidad de rutas (RAD) y a continuación se analiza su posible utilización en la integración de RPAS en un espacio aéreo controlado y una posible propuesta de integración de planes de vuelo de RPAS en el RAD.

9.2.1 Descripción

Según el AIP concretamente el documento (Enaire, ENR 1.10-1, 2017) ningún plan de vuelo en el que se pretenda volar dentro del espacio aéreo de los ACC/UAC (Area Control Center/Upper Area Control Center) de España, deberá ser formulado sin estar sujeto a las Reglas del Documento de Disponibilidad de Rutas. Este documento, que es de referencia en Europa, contiene todas las restricciones de uso del espacio aéreo de los ACC/UAC de España.

RAD es parte del ERNIP (Plan de mejora de la red de rutas europeas) y contiene los procedimientos y descripciones pertinentes para vuelos en ruta, así como para la orientación del tráfico aéreo. Es aplicable únicamente para la parte IFR (Instrument Flight Rules) del Plan de Vuelo.

Eurocontrol es responsable de la preparación del documento RAD compaginándolo, coordinándolo, validándolo y publicándolo de acuerdo con un proceso cooperativo de toma de decisiones entre el Gestor de Red (NM) y los operadores interesados. El RAD es publicado y gestionado por el Gestor de Red.

Además, se trata de una herramienta ATFCM diseñada como la única fuente para planificar el vuelo que integra los requisitos ATFCM. El documento RAD consta de la siguiente información:

- Descripción general
- 6 apéndices:
 - Apéndice 2: Definición de Área
 - Apéndice 3: Límites de los niveles de vuelo
 - Apéndice 4: Límites de vuelo directo en ruta
 - Apéndice 5: Conectividad aeroportuaria
 - Apéndice 6: Restricciones del perfil de vuelo
 - Apéndice 7: Restricciones FUA (Flexible Use of Airspace)
- Anexo de la red Paneuropea
- Si es necesario contendrá un Anexo separado para posibles eventos especiales (Juegos Olímpicos, Mundiales deportivos europeos, ejercicios militares de gran extensión...)

Los cambios de última hora se encuentran en el documento *Increment File* disponible en la página de Eurocontrol referida al documento de disponibilidad de rutas.

Por último, el RAD se publica cada ciclo AIRAC (Aeronautical Information Regulation and Control), y se encuentra disponible en el portal NM NOP de Eurocontrol (<https://www.public.nm.eurocontrol.int/PUBPORTAL/gateway/spec/>, s.f.). Los márgenes temporales con los que se publica el RAD son los que aparecen en la Ilustración 49.

DAY	PROCESS	ACTION
D-63	Notification to States/FABs/ANSPs "One week to Cut-off".	NM
D-56	Finalisation of States/FABs/ANSPs requirements.	States/FABs/ANSPs
	Cut-off date. States/FABs/ANSPs provide amendments to NM.	
	Three weeks to compile the RAD and to resolve errors/conflicts.	NM
D-28	Publication.	NM
	Two weeks to assess impact of new restrictions.	
D-14	Results of impact assessment of new restrictions.	NM
	Changes/amendments to be promulgated via the "Increment File" on the NOP Portal.	
D-10	Freeze of ENVironment tape for AIRAC.	NM

Ilustración 49: Información de publicación del documento RAD. Fuente: Eurocontrol.

En cuanto a la información disponible para RPAS, el RAD actualmente no proporciona restricciones específicas para RPAS. No obstante, en el caso de que un RPAS opere un Plan de Vuelo en los espacios aéreos donde apliquen las restricciones publicadas en el RAD deberá cumplir con ellas.

9.2.2 Propuesta de integración de planes de vuelo para RPAS en el RAD

Tras analizar la información que proporciona el RAD y los tiempos de presentación de la información, se ha valorado la posibilidad de emplear este documento para la integración de información específica para RPAS. La finalidad es proporcionar información de la disponibilidad de rutas aéreas para el vuelo de un RPAS. De este modo, se dispondría de un documento de consulta automática para el operador aéreo.

9.2.2.1 Diseño de aerovías para RPAS

En el análisis realizado en el documento (SATAA, Entregable 6: Integración de RPAS en fase de Diseño del espacio aéreo: Desarrollo de una Herramienta para la integración de RPAS (RIT) en un escenario de ruta, 2018), en el que se ha desarrollado una metodología para el funcionamiento de la herramienta RIT, se ha llegado a la siguiente conclusión. La distribución del tráfico aéreo en las aerovías impide la segregación de RPAS en una aerovía, pero no impide que existan corredores de espacio aéreo, siendo estos conjuntos de niveles de vuelo de una aerovía, que permitan una segregación más limitada.

Por lo tanto, es necesario analizar los distintos niveles de vuelo que no presenten tráfico aéreo y en los que la introducción de RPAS por los mismos no suponga un incremento del riesgo operacional.

De esta forma pueden existir corredores aéreos que sean óptimos para el vuelo de RPAS con distintas funcionalidades, lo que lleva a proponer un diseño de posibles city-pairs por parte del ANSP en aquellas conexiones que tengan una alta demanda en lo que a RPAS se refiere.

El RAD podría integrar esta posibilidad cada ciclo AIRAC y determinar corredores aéreos para uso de RPAS con funcionalidades tales como transporte de mercancía y así dar una posibilidad operacional más amplia al vuelo de RPAS.

9.2.2.2 Publicación de la información para RPAS en el RAD

Más adelante se describe el funcionamiento de la herramienta RIT desarrollada para generar ese tipo de información, pero como acercamiento inicial ésta es capaz de proporcionar las aerovías disponibles para el vuelo de RPAS en función de distintas programaciones de vuelo.

Esta información proporcionada es dinámica y es preciso conocerla con una semana de antelación como máximo para cumplimentar el plan de vuelo y presentarlo en los plazos impuestos.

El RAD es publicado cada ciclo AIRAC, como se ha explicado anteriormente, por lo tanto, no es un documento dinámico que permita satisfacer las necesidades de un operador a corto plazo. Dicho documento sería de utilidad en el caso de presentar información acerca de aerovías segregadas para el vuelo de RPAS.

De la misma forma que se encuentra publicada información de las restricciones para el vuelo por determinadas rutas o niveles de vuelo, la publicación de información referida a la segregación de aerovías para la introducción libre de riesgos de un RPAS daría lugar a una utilización óptima de dicho documento.

9.3 Herramienta para la integración de RPAS (RIT)

La herramienta RIT tiene como objetivo la integración de RPAS en un escenario de ruta. Se encuentra desarrollada con detalle en los documentos (SATAA, Entregable 6: Integración de RPAS en fase de Diseño del espacio aéreo: Desarrollo de una Herramienta para la integración de RPAS (RIT) en un escenario de ruta, 2018) y (SATAA, Entregable 8: Análisis dinámico sobre la disponibilidad del espacio aéreo y aplicación de la fase táctica para la integración de RPAS en un escenario de ruta, 2019).

El marco metodológico de dicha herramienta, concretamente en la fase de diseño, comprende tres niveles. En primer lugar, el análisis de la situación operativa actual del espacio aéreo caso de estudio. En segundo lugar, la detección de aerovías y corredores aéreos seguros para la integración de RPAS y, por último, el análisis del posible riesgo que se produciría con la integración de estos.

Por lo tanto, la finalidad principal de dicha herramienta es identificar cómo afecta la introducción de un RPAS a un espacio aéreo en un horizonte de planificación. En cuanto al principal objetivo de este documento, relacionado con la presentación del plan de vuelo de un RPAS, se propone la utilización de esta para visualizar las aerovías y niveles de vuelo disponibles para la operación del RPAS.

Las principales variables a tener en cuenta para el proceso de presentación del plan de vuelo de un RPAS son las horas de operación, el nivel de vuelo, así como el sector por el que está dispuesto a volar. En función de estas, la herramienta RIT permite comprobar la viabilidad del plan de vuelo a presentar.

El proceso que debe seguir la herramienta es mostrar una caracterización dinámica en base a sus flujos de aeronaves según el sector en el que se desea volar. En un primer lugar se utiliza la información publicada en el RAD para definir las diferentes limitaciones referidas al uso del espacio aéreo teniendo presente la información propia del ANSP (Proveedor de Servicios de navegación aérea).

El RAD proporciona una información de entrada, un input para la herramienta, pero como se ha comentado anteriormente es necesaria una actualización dinámica de la información por lo tanto no constituirá un documento de información base para la herramienta RIT.

A partir de la herramienta RIT el operador consulta en función de la hora y el nivel de vuelo, en el sector correspondiente, la disponibilidad de aerovías para su operación. Con esa información puede decidir la configuración más adecuada y con ella cumplimentar el plan de vuelo.

En el siguiente diagrama en la Ilustración 50 se muestra el proceso que sigue la herramienta RIT, la cual a partir de la elección de día y hora de vuelo es capaz de determinar las diferentes configuraciones de aerovías mediante la modelización del espacio aéreo y la programación diaria.

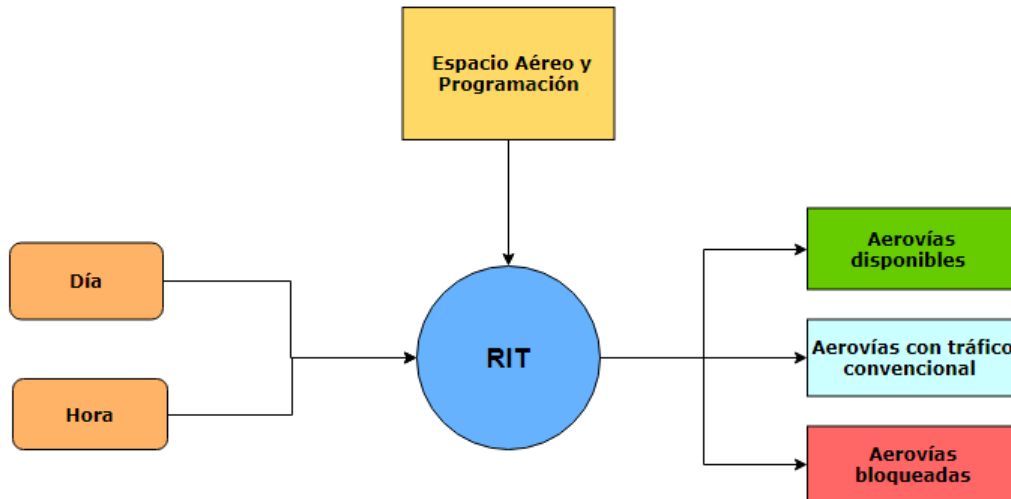


Ilustración 50: Diagrama funcionamiento herramienta RIT.

9.3.1 Descripción del funcionamiento de la herramienta RIT

El diagrama de la Figura 4 representa de forma esquemática el funcionamiento de la herramienta RIT desarrollado en este apartado de forma más detallada. Por un lado, se expone la elección del día y la hora de vuelo RPAS y por otro la elección de las aerovías.

9.3.1.1 Elección día y hora

A partir de la información del espacio aéreo y la programación para el ciclo AIRAC en el que se encuentre en ese momento será necesario establecer una fecha de vuelo concreta y una elección de hora de vuelo. Se fijará la fecha de vuelo y se podrá variar la hora de manera que sea posible visualizar todas las posibilidades.

Una vez seleccionada la hora a la que se va a realizar la operación la herramienta RIT proporciona los niveles de vuelo con la configuración de aerovías para dicha elección.

9.3.1.2 Elección aerovías

La herramienta RIT proporciona todos los niveles de vuelo operativos en el sector seleccionado con la configuración de aerovías para la hora de vuelo elegida. En primer lugar, muestra las aerovías totalmente disponibles para la operación de RPAS en las cuales no exista riesgo de conflicto con aeronaves convencionales.

Al mismo tiempo, presenta las aerovías con tráfico convencional en las cuales es necesario conocer las horas exactas de entrada y salida de aeronaves. Por último, presenta las aerovías bloqueadas en un principio y pendientes de un estudio táctico para la operación de RPAS de manera que el operador pueda decidir qué nivel de vuelo es el adecuado y qué aerovía desea utilizar.

Con esa información será posible cumplimentar el plan de vuelo de manera adecuada teniendo en cuenta todos los riesgos posibles. A continuación, se muestra el proceso de determinación de aerovías

segregables de una manera más detallada y un ejemplo de cómo el operador visualizaría las aerovías disponibles.

La determinación de aerovías segregables para la introducción de tráfico de RPAS se realiza mediante el cálculo de una serie de indicadores entre los cuales el último paso será el cálculo de los valores del indicador dinámico de conflicto de aerovía en función de la hora y el nivel de vuelo. Dicho cálculo proporciona una matriz como la que se presenta a continuación en la Tabla 48.

Tabla 48: Riesgo de conflicto según el nivel de vuelo y la programación horaria.

	FL 260	UM601	UN725	UQ400	UQ88	UN976	UL184	UQ268	UL27	UN871	UQ98	UQ126	UQ53	UN869	UM176
5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0125	0,0125	0,0125	0	0	0
7:00	0,0125	0,0125	0,0125	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0125	0	0
8:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10:00	0,0123	0,0123	0,0123	0,0123	0,0002	0,0123	0,0123	0,0245	0,0002	0,0248	0,0248	0,0002	0,0002	0,0123	0,0123
11:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0125	0,0125	0,0125	0	0	0
16:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0125	0,0125	0,0125	0	0	0
17:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0125	0,0125	0,0125	0	0	0
18:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0125	0,0125	0,0125	0	0	0
19:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0125	0,0125	0,0125	0	0	0

Para la obtención de dichos valores del indicador dinámico de conflicto de aerovía se han estudiado aquellos casos de aerovías desocupadas. El indicador dinámico de ocupación de aerovía es el que determina si se encuentran ocupadas o no. Por lo tanto, las casillas en blanco determinan que ese caso en concreto no ha sido analizado por ser una aerovía ocupada, es decir, el indicador es distinto de cero. Por otro lado, las casillas en verde indican que el riesgo de introducir RPAS por esa aerovía no aumenta y de esa forma ésta será segregable a esa hora. Las casillas en rojo indican que sí se supera el riesgo de conflicto límite ya determinado previamente, por lo tanto, no se trataría de una aerovía segregable en principio.

La visualización de los valores del indicador en forma de matriz permite tener una visión global de la disponibilidad de las distintas aerovías del sector en cuestión en función de las horas operativas del día.

Se presenta en la Ilustración 51 un ejemplo de lo que el operador del RPAS visualizaría una vez elegida la fecha y la hora del vuelo. Se muestran las aerovías disponibles, aquellas con tráfico convencional y

las bloqueadas. De esta manera, el operador en cuestión es capaz de decidir qué ruta es operativamente viable para el vuelo que quiere realizar.

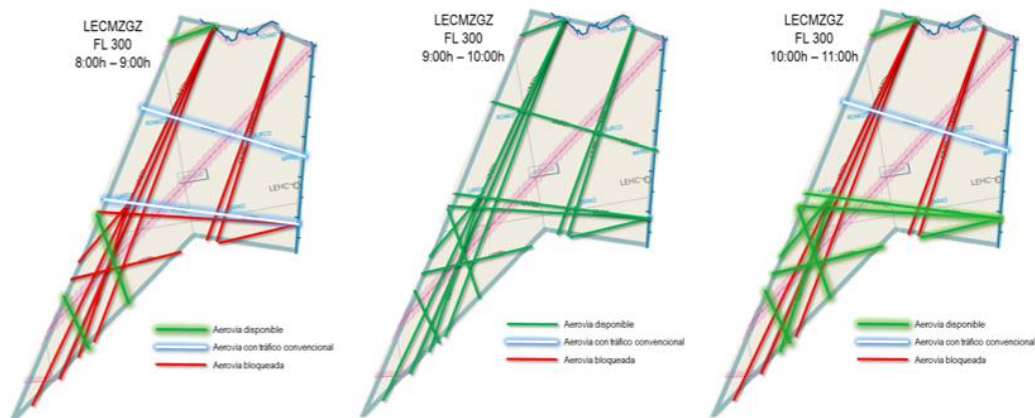


Ilustración 51: Visualización disponibilidad aerovías en un sector determinado.

Se presenta la variación en la disponibilidad de rutas en función de las distintas horas del día para el mismo nivel de vuelo. Por lo tanto, será interesante analizar según a la hora a la que se decida volar las posibilidades operacionales del vuelo RPAS.

El operador puede comprobar la amplia disponibilidad de aerovías en el horario de 9:00 a 10:00 horas en comparación con la hora anterior o la siguiente, dándole una visión completa de sus posibilidades. Una vez comprobada la disponibilidad procederá a la elaboración del plan de vuelo del RPAS correspondiente y con ello su presentación y posible aprobación.

La herramienta RIT proporciona al operador de forma automática sus posibilidades operativas para el vuelo del RPAS minimizando el riesgo de conflicto con aeronaves convencionales. El enfoque ideal es la creación de un programa mediante el cual un operador que desea realizar un vuelo con un RPAS sea capaz de cumplimentar un plan de vuelo de forma automática y conocer todos los requisitos necesarios para dicho vuelo.

9.4 Presentación del Plan de Vuelo

Una vez utilizada la herramienta expuesta anteriormente con el objetivo de determinar una ruta válida para el vuelo del RPAS y haber elaborado el plan de vuelo en función de las características operativas que tendrá el vuelo se procede a presentarlo.

La presentación de un plan de vuelo representa la confirmación por parte de la compañía de la utilización del slot aeroportuario que se le ha asignado. Este documento ha de contener toda la información sobre la operación que requiera la dependencia *Air Traffic Service* (ATS) (ENAIRES, 2019).

El plan de vuelo se ha de presentar obligatoriamente cuando se dé cualquiera de los siguientes casos:

- Cualquier vuelo, o parte del mismo, al que tenga que prestarse servicio de control de tránsito aéreo.
- Cualquier vuelo bajo reglas de vuelo instrumental (IFR) que opere dentro de un espacio aéreo con servicio de asesoramiento.
- Cualquier vuelo dentro de las áreas designadas si así lo requiere la dependencia ATS responsable de cara a facilitar el servicio de información de vuelo, de alerta y de búsqueda y salvamento.
- Cualquier vuelo dentro de las áreas o a lo largo de las rutas, cuando así lo requiera la autoridad ATS a fin de evitar la posible necesidad de interceptación para fines de identificación.
- Todo vuelo a través de fronteras internacionales.

Por otro lado, los vuelos exentos de la obligatoriedad de presentar el plan de vuelo son los vuelos militares en misión táctica o de defensa aérea, los vuelos de búsqueda y salvamento en misiones de emergencia y los vuelos expresamente autorizados por la Autoridad Competente.

9.4.1 Contenido del plan de vuelo

La plantilla de un plan de vuelo convencional contiene un total de 19 casillas. En ellas se recoge el total de la información que se le requiere a cada uno de los vuelos para permitirles operar en el espacio aéreo controlado correspondiente.

No todos los planes de vuelo están obligados a contener toda la información que se puede recoger en un plan de vuelo. Éste contiene información referida a los siguientes conceptos, seleccionando la autoridad competente aquellos que considere de obligatoria presentación (ENAIRES, 2019):

- Identificación de la aeronave.
- Reglas de vuelo y tipo de vuelo.
- Número y tipos de aeronaves y categoría de estela turbulenta.
- Equipo.
- Aeródromo o lugar de operaciones de salida.
- Hora prevista de fuera calzos.
- Velocidades de crucero.
- Niveles de crucero.
- Ruta que ha de seguirse.
- Aeródromo o lugar de operaciones de destino y duración total prevista.

- Aeródromos o lugar de operaciones de alternativa.
- Autonomía.
- Número total de personas a bordo.
- Equipo de emergencia y de supervivencia.
- Otros datos.

Un plan de vuelo convencional se presenta rellenando un formulario donde se hallan las 19 casillas previamente citadas. La Ilustración 52 representa dicho formulario.

FLIGHT PLAN / PLAN DE VUELO			
1 PRIORITY Prioridad -<< FF ->>		ADDRESSSEE(S) Destinatario (s)	
2 FILING TIME Hora de depósito		ORIGINATOR Remitente	
SPECIFIC IDENTIFICATION OF ADDRESSEE(S) AND/OR ORIGINATOR Identificación exacta del (de los) destinatario(s) y/o del remitente			
3 MESSAGE TYPE Tipo de mensaje -<< FPL ->>		7 AIRCRAFT IDENTIFICATION Identificación aeronave	
9 NUMBER Número		8 FLIGHT RULES Reglas de vuelo	
13 DEPARTURE AERODROME Aeródromo de salida		10 EQUIPMENT Equipo	
15 CRUISING SPEED Velocidad de crucero		11 WAKE TURBULENCE CAT. Cat. de estela turbulenta	
LEVEL Nivel		ROUTE Ruta	
16 DESTINATION AERODROME Aeródromo de destino		TOTAL EET / EET Total HR. MIN.	
18 OTHER INFORMATION / Otros datos		ALTN AERODROME Aeródromo alt.	
19 ENDURANCE Autonomía HR. MIN.		PERSONS ON BOARD Personas a bordo	
SURVIVAL EQUIPMENT / Equipo de supervivencia		EMERGENCY RADIO Equipo radio de emergencia	
Polar, Desertic, Maritime, Jungle		UHF, VHF, ELBA	
DINGHIES / Botes neumáticos		LIGHT, FLUORES	
NUMBER, CAPACITY, COVER, COLOUR / Color		JACKETS / Chalecos	
AIRCRAFT COLOUR AND MARKINGS / Color y marcas de las aeronaves		PILOT IN COMMAND / Piloto al mando	
REMARKS / Observaciones		FILED BY / Presentado por	
SPACE RESERVED FOR ADDITIONAL REQUIREMENTS Espacio reservado para requisitos adicionales			

Ilustración 52: Formulario en blanco de un plan de vuelo. (ENAIRES, 2019)

9.4.2 Tiempo de presentación

Todo plan de vuelo ha de ser enviado, como mínimo, 60 minutos antes del *Estimated Off-Block Time* (EOBT) en vuelos internacionales y 30 minutos antes en vuelos nacionales. Se podrá presentar tanto a

la *Air Traffic Services Reporting Office* (ARO) o al Sistema Procesador de Planes de Vuelo Iniciales (IFPS). Aun así, es preferible, siempre que sea posible, que el plan de vuelo se envíe directamente al IFPS y se presente al menos 3 horas antes del EOBT para su procesamiento. A su vez, el IFPS no debe aceptar planes de vuelo enviados más de 120 horas (5 días) antes del EOBT. Por otro lado, se aceptan planes de vuelo en formato físico o correo electrónico con 15 minutos de antelación respecto a la EOBT en casos de emergencia o evacuaciones. (EUROCONTROL, IFPS Users Manual , 2018)

El IFPS forma parte de la *Central Flow Management Unit* (CFMU) ubicada en Bruselas y está configurado en dos unidades (IFPU), una en Francia (Brétigny) y otra en Bélgica (Haren). Dichas unidades tienen una dirección cada una para el envío de mensajes: por un lado, la FP1 se refiere a la unidad en Haren (Bélgica) y por otro, la FP2 a la unidad en Brétigny (Francia).

El IFPS recibe y procesa todos los planes de vuelo IFR/*General Air Traffic* (GAT) con origen, destino o sobrevuelo el área formada por los países integrantes de la Conferencia Europea de Aviación Civil (CEAC), de la que España forma parte. El IFPS es el responsable de direccionar el plan de vuelo a todas las unidades ATS afectadas.

En caso de que se desee presentar durante el vuelo, ha de ser enviado cuando exista la total seguridad de que la dependencia responsable lo recibirá y falten 10 minutos para la hora en la que la aeronave llegue al punto de entrada previsto en un área de control o en un área de servicio de asesoramiento, o al punto de cruce con una aerovía o una ruta con servicio de asesoramiento.

9.4.3 Dirección de envío del plan de vuelo

Cuando el aeródromo de salida esté dentro de la zona IFPS (IFPZ), los planes de vuelo y los mensajes asociados han de ser enviados (en caso de estar autorizado por el estado competente) directamente al IFPS y no al ARO, que está en el aeródromo de salida. Aun así, los operadores que no sean capaces de mandar el plan al IFPS lo deben mandar al ARO. (EUROCONTROL, IFPS Users Manual , 2018)

Es responsabilidad del ARO que estos últimos planes lleguen al IFPS para su procesamiento. Los operadores se han de asegurar de que envían el plan al IFPS o al ARO, pero nunca a los dos.

Si el plan de vuelo es enviado al IFPS desde un aeródromo de salida fuera de dicha IFPZ, se envía de acuerdo a lo establecido por el Estado responsable. Es responsabilidad del ARO el asegurar el envío y aceptación por el IFPS para el procesamiento de los planes y mensajes.

Los operadores se han de asegurar de que, una vez enviado al ARO, su plan de vuelo y mensajes asociados son admitidos por el IFPS antes de la operación y que cualquier cambio notificado por el IFPS es comunicado al piloto.

Todos los planes de vuelo o mensajes asociados para vuelos IFR/GAT o partes de ellos intentando operar dentro del IFPZ, cuando son archivados mediante las compañías *Aeronautical Fixed Telecommunication Network* (AFTN) o *Société Internationale de Télécommunications Aéronautiques* (SITA), deben ser dirigidos solo a las 2 direcciones IFPS para esa porción del vuelo dentro del IFPZ. La Tabla 49 define las direcciones IFPS para todos los envíos de planes de vuelo/mensajes asociados vía AFTN o SITA.

Tabla 49: Direcciones AFTN y SITA.

Network	FP1 Haren, Bélgica	FP2 Brétigny, Francia
AFTN	EUCHZMFP	EUCBZMFP
SITA	BRUEP7X	PAREP7X

Por otro lado, los operadores pueden probar si un plan de vuelo es viable mediante un test. Los envíos de “test” de planes de vuelo no pueden ser enviados al IFPS. Los creadores de mensajes que deseen realizar una prueba de un plan de vuelo deben usar el *IFPS test system* (IFPUV). Estos test se utilizan para comprobar la viabilidad de planes de vuelo que, a priori, no van a llevarse a cabo, de ahí que no deban ser enviados al IFPS.

A su vez, El IFPS no debe procesar planes bajo *Visual Flight Rules* (VFR) o vuelos operando completamente bajo condiciones *Operational Air Traffic* (OAT). Además, el IFPS no debe incluir las direcciones de aeródromos alternativos en el proceso de introducir la dirección automáticamente. Cuando el creador del mensaje requiera que éste sea enviado a un aeródromo alternativo, será su responsabilidad incluir cualquier dirección relevante en la función redirección de ese mensaje.

9.4.4 Redirección

La función de redirección se usa para que haya una sola fuente para toda la información de los planes de vuelo para los *Air Traffic Control Unit* (ATCU), ya estén dentro o fuera del IFPZ. Permite que la consistencia entre la información de los planes de vuelo dentro del IFPZ y fuera del mismo sea posible. Solo está disponible si las direcciones especificadas por el creador del mensaje son direcciones AFTN. Por ello, no se debe usar con SITA.

9.4.5 Información para la herramienta RIT

La información de la que dispone la herramienta RIT de forma dinámica la provee el NM perteneciente a Eurocontrol, de manera que previo a la presentación del plan de vuelo será posible conocer una previsión de las rutas disponibles y de forma general el tráfico aéreo de forma actualizada.

Entre las herramientas e información utilizadas por el NM se encuentra PREDICT, destinada a operaciones de red y utilizada para asistir en la fase pre-táctica de planificación desde 6 días antes del de la operación. Es posible acceder a partir de una interfaz llamada CHMI (Collaboration Human Machine Interface) para la que es necesario solicitar el acceso a Eurocontrol mediante una serie de requisitos.

El servicio CHMI es una aplicación que proporciona una interfaz gráfica a los sistemas desarrollados por el NM permitiendo a sus usuarios visualizar información (como rutas, atribuciones a rutas, espacios aéreos...) a partir de mapas gráficos. Se trata de información a tiempo real que favorece el proceso CDM (Collaboration Decision Making) entre interesados.

Con el objetivo de acomodar las necesidades de todos los operadores se han creado productos adaptados a los mismos como pueden ser:

- CIAO: CHMI para explotadores de aeronaves

- CIFLO: CHMI para gestión de flujo de aeronaves
- CIREN: CHMI para coordinadores de entorno
- CITO: CHMI para torres de control en aeropuertos
- CIAM: CHMI para celdas de gestión del espacio aéreo (sectores)

La herramienta PREDICT proporciona:

- Una visualización precisa de la capacidad de tráfico que se tendrá el día de la operación.
- Configuraciones de sector y datos proporcionados por los FMP (Flow Management Positions).
- Una simulación de tipo ETFMS (Enhanced Tactical Flow Management System), sistema utilizado para comparar la demanda de tráfico con la capacidad disponible en un determinado sector ATC, siendo posible simular medidas ATFCM con el fin de determinar sus posibles efectos.
- La habilidad para lidiar con los efectos de red que se produzcan.

Utiliza como información de entrada:

- ❖ Flight Data: de los primeros planes de vuelo entregados D-7 con el fin de determinar una previsión de tráfico.
- ❖ ENV Data: la herramienta PREDICT recibe información del entorno aeronáutico cada cuatro semanas como parte de un ciclo AIRAC normal, así como actualizaciones de dicha información on-line.

De esta forma la herramienta de Eurocontrol PREDICT puede servir con el objetivo de obtener la información necesaria de manera actualizada por parte de la herramienta RIT. Debido a que los planes de vuelo se pueden entregar con un máximo de cinco días antes de la EOBT (Estimated Off-Block Time), previo a esos 5 días es necesario realizar un proceso de predicción de manera que los operadores cumplieren el plan de vuelo. Más adelante se modificarán los errores que presente el plan de vuelo hasta su aprobación.

Siguiendo con el proceso de presentación del plan de vuelo se aceptarán planes de vuelo tanto en formato físico como por correo electrónico 15 minutos antes del EOBT en el caso de tratarse de una emergencia o algún caso de evacuación.

Siempre que se presente 24 horas antes del EOBT se deberá incluir la fecha del vuelo en el plan correspondiente. En el caso de ser presentado durante el vuelo, se podrá enviar una vez exista la seguridad de que será recibido por la dependencia responsable y falten 10 minutos para la llegada de la aeronave al punto de entrada previsto en un área de control o de servicio de asesoramiento, al punto de cruce de una aerovía o una ruta con servicio de asesoramiento.

9.5 Proceso de validación del Plan de Vuelo

En este apartado se explica el proceso entre los distintos agentes que participan en el procesamiento de un plan de vuelo desde la presentación de este, hasta su aprobación o reprobación final. Dichos agentes son el operador que realiza y presenta el plan de vuelo; el IFPS, que decide si dicho plan de vuelo es viable o no; y la unidad ATS correspondiente, que mediante los Centros ATC (ATCC) define las modificaciones necesarias, proponiendo cuales han de ser dichas modificaciones mediante los mensajes *ATC Flight Plan Proposal* (AFP), que son enviados al IFPS. Toda la información recogida en este apartado se ha obtenido del Manual IFPS (EUROCONTROL, IFPS Users Manual , 2018).

A modo de resumen, en la Ilustración 53 se presenta el procedimiento mediante un diagrama de flujos. En él quedan representados los distintos pasos que ha de llevar a cabo cada uno de los agentes que participan en el proceso, es decir, el operador (como creador del mensaje), el IFPS y los ATCC. Cabe destacar que las líneas rojas representan un “NO” y las verdes un “SÍ”, las azules están como guía.

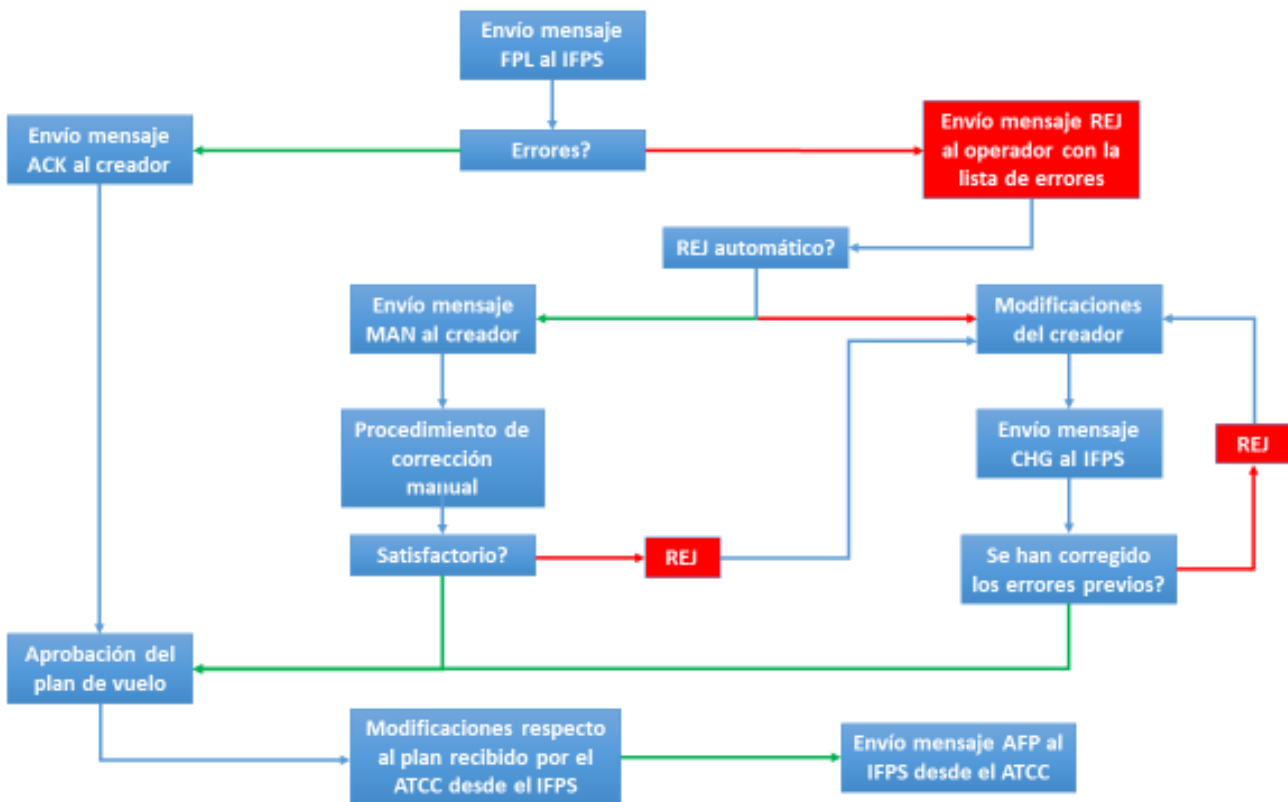


Ilustración 53: Diagrama de flujos del procesamiento de planes de vuelo para RPAS.

Como se aprecia en el diagrama, todo parte del envío del mensaje *Flight Plan* (FPL) al IFPS. Si éste no contiene errores, se envía un mensaje *Acknowledgement* (ACK) al creador del mensaje y se aprueba el plan de vuelo. En caso de que sí contenga errores, se envía un mensaje *Reject* (REJ) que ha de contener una lista de los errores presentes en el plan de vuelo. Si la reprobación es automática, la lista de errores se redirige al *staff* IFPS, que lleva a cabo un procedimiento de corrección manual, el cual en caso de ser satisfactorio deriva en la aprobación del plan de vuelo, y en caso contrario en el envío de un REJ al

creador del mensaje. El procedimiento de corrección manual se le notifica al creador con un mensaje *Manual* (MAN). En caso de que la reprobación del mensaje no sea automática, el creador recibe la lista de errores y modifica el plan de vuelo mediante el envío de un mensaje de modificación (CHG). Si así se corrigen dichos errores el plan de vuelo es aprobado, y en caso contrario se reenvía la nueva lista con los errores pendientes de corrección. Por último, una vez el plan de vuelo es aprobado, se somete a un reprocesamiento y en caso de que los ATCC reconozcan modificaciones en un vuelo respecto al plan de vuelo establecido, se envía un mensaje AFP al IFPS. En los siguientes apartados se explica de manera más detallada este proceso, comenzando por el primer paso, que es el del envío del FPL.

9.5.1 Envío del mensaje *Flight Plan* (FPL)

El mensaje FPL, enviado por el operador, contiene el plan de vuelo como tal. Por ello, cuando se hable del creador del mensaje, será referido al operador. De cara a enviarlo para ser procesado ha de respetar los tiempos de presentación estipulados (véase 9.4.2). Dentro del FPL existen varios campos clave que no son modificables, dado que se utilizan para propósitos de la asociación de mensajes. Dichos campos clave de un plan de vuelo son:

- Identificación de la aeronave.
- Aeródromo de salida.
- Aeródromo de llegada.
- Fecha de vuelo. No se puede cambiar el subcampo del *Date Of Flight* (DOF) directamente, pero un cambio de EOBT puede hacer que se cambie la fecha de salida.

Para cambiar cualquiera de estos campos, es necesario cancelar el plan de vuelo original y presentar un plan de vuelo nuevo con los datos correctos.

9.5.2 Respuesta del IFPS al mensaje recibido

El IFPS, en base a si el procesamiento del plan de vuelo ha sido satisfactorio o no, responde al operador con distintos mensajes. El IFPS puede responder con tres tipos de mensajes al FPL, los cuales se denominan *Operational Reply Message* (ORM). Son utilizados por el IFPS para informar al creador del mensaje acerca de la situación del procesamiento del mensaje enviado. El IFPS, bajo ciertas circunstancias puede mandar una copia de los ORM-s al piloto de la aeronave. Los 3 tipos de ORM se definen a continuación.

- El mensaje ACK significa el procesamiento satisfactorio de un mensaje enviado en comparación con la información ambiental que posea el *Network Manager* a la hora de procesar dicho mensaje. Aun así, el procesamiento satisfactorio a manos de IFPS no puede garantizar que el mensaje esté completamente de acuerdo con los requerimientos de cada Estado miembro, ni tampoco asegura que todas las partes del vuelo que se realizan fuera del IFPZ sean correctas. Esto es debido a que el procesamiento IFPS no tiene en cuenta criterios como el sobrevuelo, la autorización diplomática, requerimientos de *Extended Operations* (ETOPS), las restricciones de *Safety Assessment of Foreign Aircraft* (SAFA), requerimientos *Minimum Navigation Performance Specifications* (MNPS) etc. Por lo que cualquier creador de mensaje que reciba un ACK tiene que tener en cuenta también esos requerimientos y restricciones. El ACK viene precedido de un

mensaje MAN a no ser que el creador del mensaje haya establecido que no quiere recibir MAN. Si no se recibe un ACK es responsabilidad del creador del mensaje comprobar el estado de éste.

- El mensaje MAN se envía para informar al creador del mensaje de que se han detectado errores en dicho mensaje y que ha sido puesto en manos del *staff* IFPS para el procesamiento manual. El mensaje MAN va seguido de un ACK en caso de que el procesamiento manual haya sido satisfactorio, o de un mensaje REJ en caso contrario.
- Se envía un mensaje REJ para determinar que el mensaje no ha sido procesado satisfactoriamente, ya sea automáticamente o manualmente, y que el mensaje enviado no ha sido aceptado y procesado por el IFPS. Si no se recibe es responsabilidad el creador comprobar el estado mediante la pestaña *Filing* del *NOP Flight List*. Cada mensaje REJ debe contener una lista de errores (máximo 10) determinando la naturaleza de los errores seguido del área o áreas a las que afectan. La Tabla 50 define los distintos tipos de errores.

Tabla 50: Tipos de errores en los mensajes Reject.

Tipo de error	Explicación	Referencia
Syntax	El mensaje enviado no respeta el formato y manera de especificar la información	SYN
Expanded Flight plan Message	La información adjunta en el mensaje enviado es inconsistente con los otros ítems en el mensaje o con la data base de IFPS sobre planes de vuelo, o cuando hay insuficiente información para crear un plan de vuelo.	EFPM
General Route	Errores referidos al formato de la data y el contenido en cuanto a ruta del mensaje en términos de formato y manera de especificar la data.	ROUTE
Rerouting	Errores relacionados con el uso de AOWIR	REROUTING
Profile	Errores referidos a inconsistencias de la data o infracciones a la hora de calcular el perfil de vuelo.	PROF
Warning	Errores generados para proveer de indicaciones de dificultad antes de la introducción de comprobaciones específicas llevadas a cabo por el IFPS.	WARNING
Routing Assistance	Errores referidos al sistema de <i>Proporse Routes</i>	RA

Por lo tanto, si un plan de vuelo ha sido rechazado y el operador quiere llevar el vuelo a cabo, el operador debe realizar los cambios pertinentes en el plan de vuelo original en base a los errores que éste contenga y reenviar el mensaje de modificación correspondiente. Un plan de vuelo debe ser enviado a y admitido por el IFPS antes de que el vuelo pueda operar bajo reglas IFR/GAT dentro del IFPZ. Hasta que un plan de vuelo en manos del IFPS haya sido cancelado o cerrado, ha de mantenerse accesible para posibles actualizaciones. Los creadores de mensajes no deben enviar un segundo plan de vuelo donde ya exista uno en el IFPS para el mismo vuelo. De esta manera, el diagrama de flujos que representa el proceso que deben seguir los mensajes enviados al IFPS desde su envío hasta su aprobación o reprobación final se muestra en la Ilustración 54.

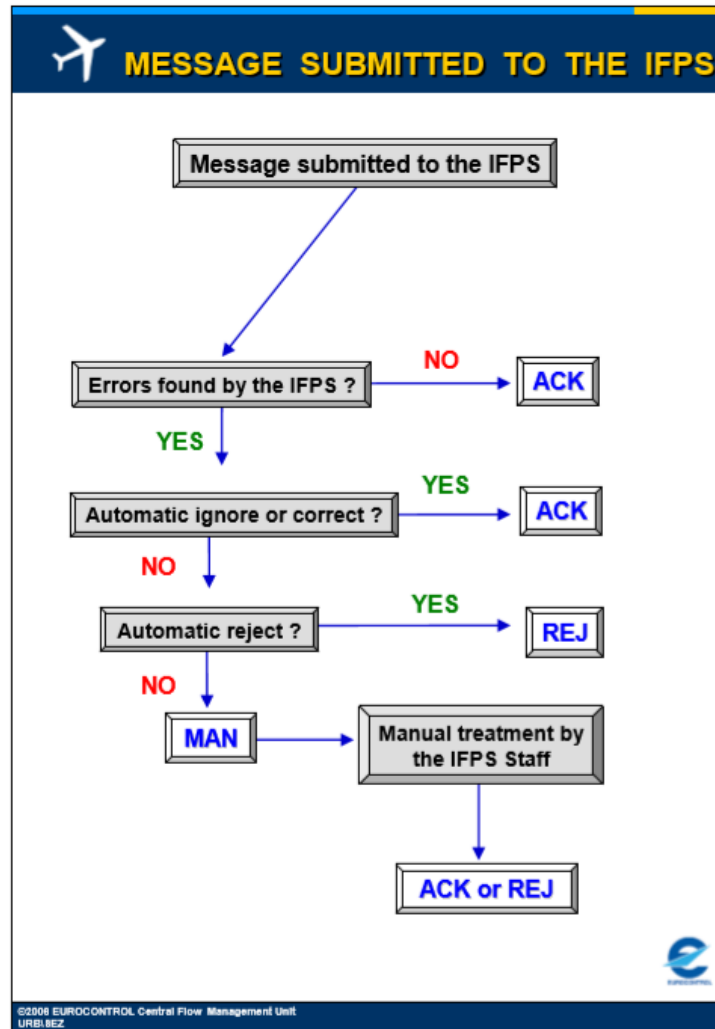


Ilustración 54: Proceso de los mensajes enviados al IFPS desde su envío hasta su aprobación o reproación (EUROCONTROL, IFPS Users Manual , 2018).

En caso de no se recibir un OMR, se mantiene la responsabilidad del creador del mensaje de comprobar la situación del mensaje. Esto se puede comprobar consultando el diario de vuelo operacional del vuelo en la pestaña *Filling* del *NOP Flight List*. El ORM debe ser enviado a los creadores de mensajes de acuerdo con la Tabla 51.

Tabla 51: Envío de ORM-s a los creadores de mensajes.

Dirección del creador	Respuestas operacionales recibidas desde IFPS
Todas las direcciones de creadores menos las de los que hayan dicho que no quieren recibir ORMs	ACK, MAN, REJ
El creador es el sistema RPL	ACK, REJ

9.5.3 Mensajes enviados por el operador

El plan de vuelo presentado por el operador puede contener distintos errores que el mismo operador ha de corregir, como se ha explicado previamente en la sección 9.5.2. Para ello, el operador puede modificar un plan de vuelo entregado mediante el envío de distintos mensajes asociados. Dichas modificaciones pueden darse en distintos subcampos, como puede ser la ruta, el nivel de crucero, la velocidad de crucero, etc. Pero nunca se han de cambiar los campos clave explicados en el apartado 9.5.1, para cambiar esos datos se debe cancelar el plan de vuelo y presentar uno nuevo, como se explica a continuación. Cabe destacar que también pueden hacerse cambios en planes de vuelo que ya han sido aprobados en casos donde se dé, por ejemplo, un cambio de planificación. Para todo ello, el operador ha de enviar al IFPS los siguientes mensajes asociados.

- Mensaje de Cancelación (CNL): se envía al IFPS para ser procesado cuando se desea cancelar un plan de vuelo previamente enviado al mismo IFPS. Se suele utilizar cuando se requiere el cambio de alguno de los campos clave de un plan de vuelo, debido a que cambiar estos requiere la presentación de un nuevo plan de vuelo.
- Mensaje de Demora (DLA): El creador del mensaje solo ha de considerar el envío de un DLA si se espera que el vuelo se retrase más de 30 minutos respecto al EOBT mandado en el plan de vuelo anterior. Si el creador no envía un DLA 30 minutos después del EOBT especificado en el plan de vuelo, entonces dicho plan de vuelo será automáticamente cancelado. Cualquier retraso entre 15 minutos y 20 horas para un vuelo IFR/GAT o parte de él operando dentro del IFPZ debe ser enviado al IFPS para ser procesado.
- Mensaje de Modificación (CHG): Se han de enviar cuando se desee realizar cambios relativos al tipo de aeronaves y categoría de la estela turbulenta, velocidad y/o nivel de crucero. Estos cambios deben ser notificados para cada vuelo individual tan pronto como sea posible y a más tardar 30 minutos antes del despegue a la oficina de notificación de los servicios de tránsito aéreo del aeródromo de salida. A su vez, si la responsabilidad de la transmisión directa del plan de vuelo ha sido delegada a los explotadores, el originador del plan de vuelo también debe enviar el mensaje CHG a las otras dependencias ATS que fueron consideradas en el plan de vuelo

inicial. Si el originador del FPL desea modificar la ruta ATS o el nivel de vuelo en-ruta, entonces el mensaje de modificación deberá contener toda la porción de la ruta y los diferentes FLs.

Por otro lado, el operador ha de enviar, cuando así se lo requiera la autoridad competente tanto un mensaje de *Departure* (DEP), como un mensaje de *Arrival* (ARR). Los mensajes DEP deben ser enviados para ser procesados al IFPS para cualquier vuelo (o parte de un vuelo) IFR/GAT operando dentro del IFZ cuando así lo requiera la autoridad competente responsable del despegue. Debe contener un título de mensaje, la identificación de la aeronave, el aeródromo de salida (código OACI) y la hora de despegue actual, el aeródromo de llegada y el contenido de la casilla 18 del plan de vuelo en su mismo formato. Por otro lado, el mensaje ARR ha de ser enviado al IFPS para cualquier vuelo (o parte de un vuelo) IFR/GAT cuando así se requiera.

En caso de que dicho vuelo operando dentro del IFZ se desvíe a un aeródromo diferente al indicado como aeródromo de llegada en el plan de vuelo procesado, ese vuelo ha de tener un mensaje de llegada enviado por los servicios de tráfico aéreo correspondientes al IFPS. El mensaje ARR debe contener un título, la identificación de la aeronave, el aeródromo de salida y el EOBT, el aeródromo de llegada y el tiempo de llegada estimado.

Por último, si un usuario externo desea recibir información de los planes de vuelo enviados al IFPS para llevar a cabo operaciones dentro del IFZ, dicho usuario ha de enviar un mensaje *Request Flight Plan* (RQP) al mismo IFPS. En caso de que el IFPS posea un plan de vuelo procesado que coincida con lo especificado por el usuario que manda el RQP, ese plan de vuelo se debe enviar al usuario que lo solicite, salvo que tenga el estatus de protegido.

Por lo tanto, el operador ha de enviar en primer lugar el mensaje FPL que contiene el plan de vuelo al IFPS. Éste último debe responder a dicho mensaje y en base a esa respuesta el creador del mensaje debe llevar a cabo las modificaciones pertinentes, ya sea mediante un mensaje CHG o DLA. En caso de que desee cancelar el plan de vuelo enviado, ya sea porque quiere presentar uno nuevo cambiando los campos clave o porque no desea llevar a cabo el vuelo, debe enviar un mensaje CNL. A su vez, en caso de que así lo requieran las autoridades competentes, el operador debe mandar tanto un mensaje DEP para despegar como un mensaje ARR para aterrizar. Por último, cabe destacar la posibilidad que tiene el operador de solicitar información acerca de planes de vuelo ya aceptados de cara a desarrollar el suyo propio, o por mero interés de informarse, mediante el envío de un mensaje RQP. Aparte de todo esto, también puede enviar un mensaje si desea suspender el vuelo, como se explica a continuación.

9.5.3.1 Procedimientos generales para los creadores del mensaje ante la suspensión del vuelo

Cuando el vuelo presentado en el mensaje FPL correspondiente haya sido suspendido por el IFPS, se envía un mensaje *Flight Suspension* (FLS) al operador. Los creadores del mensaje no deben reaccionar al mensaje FLS cuando sean suspendidos debido a la revalidación IFPS. Solo los mensajes CHG, CNL o DLA pueden actuar correctamente ante la suspensión de vuelo.

El mensaje FLS puede contener una ruta aceptada por el IFPS, la cual en caso de existir está escrita en el campo *New Route* (NEW RTE). Antes de rearchivar el plan con la ruta propuesta en NEW RTE, el creador del mensaje es responsable de evaluar si la ruta es operacionalmente aceptable, dado que no está garantizado que la ruta contenida en NEW RTE evite las limitaciones ATFCM. Es decir, el IFPS

propone una nueva ruta para llevar a cabo el vuelo que ha sido suspendido y el operador es el responsable de garantizar que sea operable en base a las restricciones del ATFCM.

9.5.4 Distribución de mensajes desde el IFPS

El IFPS debe generar un perfil 4D para todos los vuelos IFR o la parte de ellos que corresponda que hayan sido archivados para operar dentro del IFPZ, basado en una ruta, nivel de vuelo, velocidades, EOBT y desempeño de la aeronave.

El objetivo de este perfil es determinar por qué espacios aéreos circulará el vuelo de cara a definir qué servicios de tráfico aéreo necesitan una copia del plan de vuelo. Por otro lado, si el mensaje CHG tiene una nueva ruta ATS con FIR no consideradas en el plan de vuelo original, entonces el plan de vuelo deberá ser cancelado con un mensaje CNL y después se enviará otro plan de vuelo nuevo.

Cuando un plan de vuelo es archivado con suficiente antelación sobre el EOBT, el IFPS debe calcular una distribución temporal del mensaje hacia los ATCU-s sobre la trayectoria del vuelo, y debe distribuir el plan de vuelo a la hora especificada por cada unidad para cada vuelo. En caso de que no se archive con la suficiente antelación, el envío se realizará únicamente a los ATCU-s relevantes.

El IFPS también debe enviar una copia de cada mensaje procesado al EFMTS para que se le aplique al vuelo cualquier restricción relevante que tenga que ver con la gestión de flujo. El parámetro temporal especificado por EFMTS para la distribución de mensajes por el IFPS está establecido en 48h antes del EOBT.

Si un mensaje asociado hace que se cambie la trayectoria de un vuelo ya definido y ha sido distribuido a los ATCU-s relevantes en la ruta, si esto hace que deje de operar por ciertos espacios aéreos y pase a operar en otros, el IFPS debe enviar un mensaje CHG a esos espacios donde se altere la trayectoria del vuelo, y una copia del plan de vuelo a los espacios nuevos por los que operará. Además, todos los mensajes han de ser enviados por el IFPS al EFMTS para mantener un esquema real del vuelo de cara a aplicarle las restricciones presentes.

En el procesamiento de mensajes de aterrizaje, el IFPS debe distribuir dicho mensaje solo al control de torre del aeródromo, al control de aproximación y a la oficina de informes ATS del aeródromo de salida. También a los ATCU-s en ruta donde hayan especificado un requerimiento de recibir esos mensajes y esté localizado dentro el IFPZ. También se ha de mandar a todas las direcciones incluidas en la función de redirección.

Una vez definido el proceso de encaminamiento como tal, se explica a continuación los procedimientos de corrección manual, llevados a cabo cuando la reprobación inicial del plan de vuelo se da de manera automática. En estos casos, es el *staff* IFPS de manera manual quien se ha de encargar de analizar la lista de errores que va adjunta al plan de vuelo no aceptado.

9.6 Procedimientos de corrección manual del plan de vuelo

Aquellos mensajes enviados al IFPS para ser procesados que sean reprobados automáticamente, han de ser pasados al *staff* del IFPS para llevar a cabo el procesamiento manual. Todos estos mensajes han de llevar consigo una lista indicadora de los errores más relevantes que causen su reprobación automática. El *staff* debe comprobar la validez de dichos errores basándose en la documentación correspondiente, como el RAD. Si se comprueba que un error es incorrecto, los detalles y las condiciones que llevan a dicho error han de ser reportados. El indicador de error, sus condiciones y cualquier acción necesaria para el procesamiento manual han de ser publicadas para todo el *staff* IFPS mediante una instrucción operacional. Toda la información recogida en este apartado se ha obtenido del Manual IFPS (EUROCONTROL, IFPS Users Manual , 2018).

Las condiciones que regulan el procesamiento manual de los mensajes a manos del *staff* IFPS están contenidas en los Procedimientos de Corrección Estándar (SCP). A continuación, se describen los dos tipos de SCP que existen, el proceso que se ha de seguir en cada uno de ellos y el resultado final al que lleva dicho proceso.

9.6.1 Procedimiento de Corrección Estándar 1 (SCP1)

El procedimiento SCP1 se lleva a cabo cuando es necesario tomar decisiones acerca de mensajes para vuelos que salen, aterrizan o sobrevuelan el IFPZ. Cualquier error sujeto a SCP1 debe ser coordinado con el creador del mensaje antes de realizar ningún cambio. A su vez, los operadores que desean ser contactados mediante otro modo de contacto que no sea el indicado por la dirección AFTN/SITA deben indicar esto claramente en el subcampo *Originator* (ORGN).

Si no se puede contactar con el creador del mensaje y la acción necesaria para la corrección no está clara o es ambigua, el mensaje debe ser:

- Rechazado y enviado de vuelta al creador para que lo corrija;
- Borrado de la base de datos de mensajes no-válidos cuando un procedimiento específico determina esta acción; o
- En casos excepcionales (cuando se dispone de subcampo RMK), forzar el procedimiento con los correspondientes indicadores IFP adjuntos.

La Ilustración 55 describe el proceso de decisión para la corrección manual a cargo del *staff* IFPS para todos los mensajes; excepto los que contengan errores en el aeródromo de salida, de llegada o alternativo, o redirección. En ella, las líneas verdes indican un flujo de acciones correctas “Si” y las líneas rojas incorrectas “No”.

SCP1 TABLE for FPLs and Associated Messages

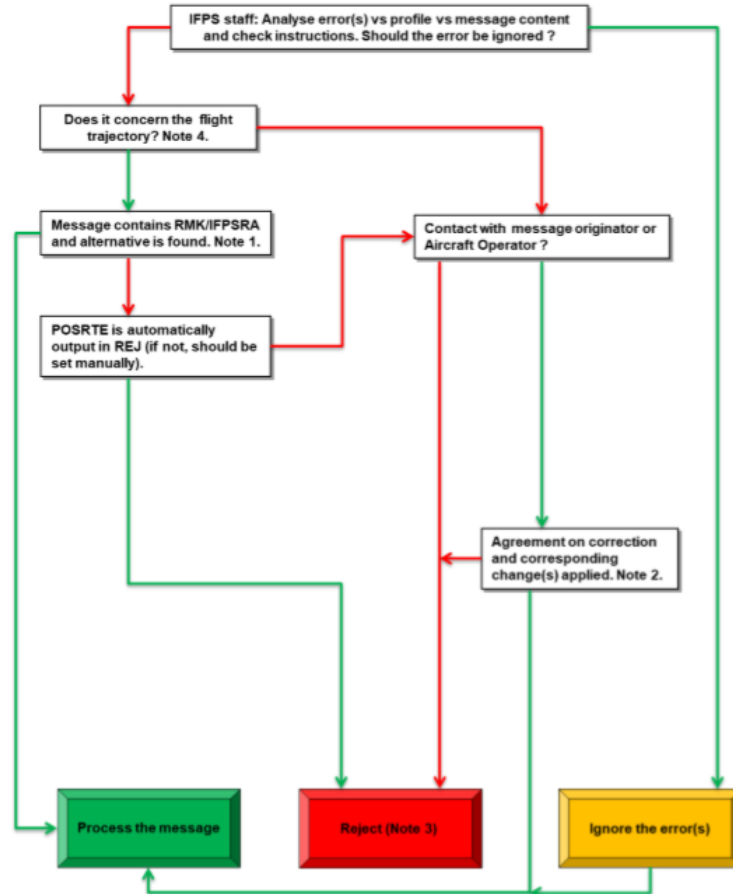


Ilustración 55: Diagrama de flujos del Proceso de Corrección Estándar 1. (EUROCONTROL, IFPS Users Manual , 2018)

El *staff* IFPS ha de valorar si los errores han de ser ignorados en base al perfil y al contenido del mensaje. En caso de que así sea, se ignoran dichos errores y el mensaje es procesado; en caso de que no, se comprueba si tienen que ver con la trayectoria del vuelo. En caso de que no tenga que ver se ha de intentar establecer contacto con el creador del mensaje, con el que se trata de llegar a un acuerdo para la corrección, que en caso de ser satisfactorio lleva al procesamiento del mensaje, y en caso de que no, al REJ. Si el error tiene que ver con la trayectoria, y el mensaje contiene una ruta alternativa en el campo RMK del plan de vuelo, éste se procesa; si no es así, se trata de establecer contacto con el creador del mensaje y se sigue el mismo proceso que si el error no es referido a la trayectoria.

9.6.2 Procedimiento de corrección estándar 2 (SCP2)

El proceso SCP2 es usado por el IFPS cuando se deben tomar decisiones acerca del tratamiento de mensajes cuando existe un error en la función de redireccionamiento. De este modo, cuando se dé un error en la sintaxis de la función de redirección del vuelo en el mensaje enviado, dicho error ha de ser corregido o ignorado por el *staff* IFPS en caso de que:

- El creador del mensaje haya sido contactado con éxito
- La acción necesaria para corregir el error sea clara e inequívoca
- Cuando haya un error en la(s) línea(s) de redirección:
 - Si el aeródromo de salida está fuera del IFPZ, y no es posible contactar con el creador del mensaje y/o el operador, la dirección incorrecta ha de ser borrada y se ha de informar de ello al creador del mensaje mediante un mensaje AFTN o SITA.
 - Si el aeródromo de salida está dentro del IFPZ y no es posible contactar con el creador del mensaje para coordinar la corrección, el mensaje debe ser reprobado.

En caso de que se dé una de esas 3 circunstancias descritas, es responsabilidad del creador del mensaje el confirmar la dirección correcta, y el llevar a cabo la acción apropiada basada en dicha confirmación. La Ilustración 56 define el procedimiento a seguir en este caso.

SCP2: Invalid value for ADEP, ADES or ALTN

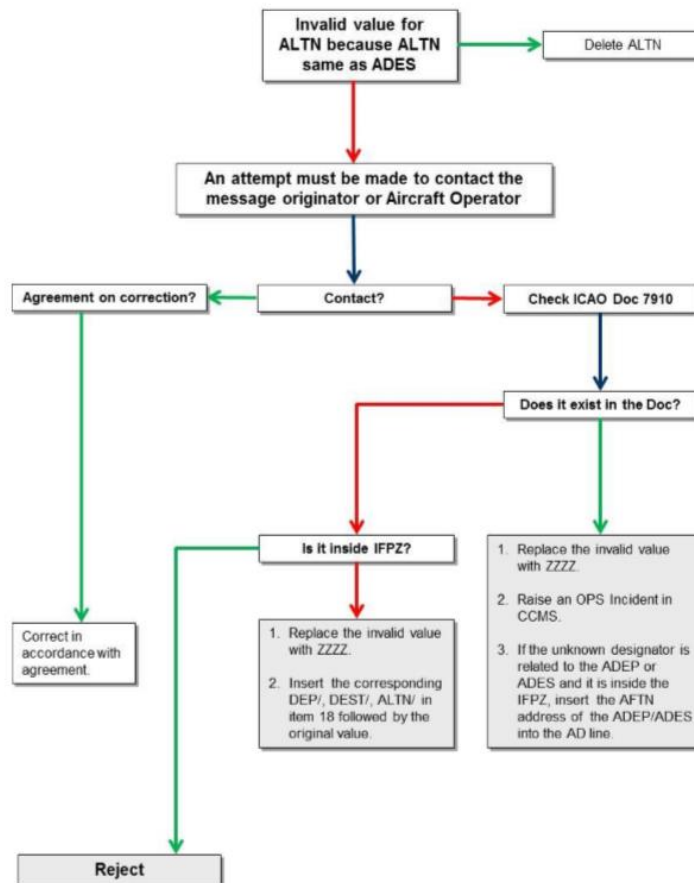


Ilustración 56: Diagrama de flujos del Proceso de Corrección Estándar 2. (EUROCONTROL, IFPS Users Manual , 2018)

Como se ve en el diagrama, en caso de que el aeródromo propuesto como alternativo sea igual al *Aerodrome of Destination* (ADES), se borra directamente el Aeródromo Alternativo (ALTN). En caso de que no sea así, pero el campo de ALTN del plan de vuelo no sea correcto, se ha de intentar contactar con el creador del mensaje o con el operador de la aeronave. Si se consigue, se debe llegar a un acuerdo para la corrección. Si no existe y se encuentra dentro del IFPZ, se ha de responder con un REJ. Si existe, se debe comunicar que hay un error que puede afectar a la *Operational Safety* (OPS) en el *Central Claim Management System* (CCMS).

Una vez explicados los dos procesos de corrección manual del plan de vuelo, se pasa a explicar la fase en la que el plan de vuelo ya ha sido aprobado por el IFPS tras completar las distintas modificaciones requeridas en cada caso. El plan de vuelo ha de ser reprocesado cada cierto tiempo en base a las condiciones ambientales que posea el *Network Manager*, como se explica a continuación en el siguiente apartado.

9.7 Reprocesamiento del plan de vuelo

Una vez el plan de vuelo ha sido procesado y aprobado, cada plan de vuelo en manos del IFPS contenido en la base de datos de los planes de vuelo válidos ha de ser reprocesado cada 30 minutos, en base al *Central Airspace and Capacity Database (CACD)* que posea el *Network Manager*, hasta el EOBT de ese vuelo. De esta manera, se certifica que el plan de vuelo es viable y se puede operar con él en caso de que las condiciones ambientales que posea el *Network Manager* cambien. Toda la información recogida en este apartado se ha obtenido del Manual IFPS (EUROCONTROL, IFPS Users Manual , 2018).

Esta herramienta de reprocesamiento, junto con la entrada online de las nuevas restricciones RAD y cierre de aerovías, está diseñado para obtener una mayor consistencia de la data del plan de vuelo entre operador, ATS y el *Network Manager* mediante el reprocesamiento de los planes de vuelo contra los cierres y aperturas y/o las correcciones de la restricción RAD en el CACD del *Network Manager*. En caso de que se determine que un plan de vuelo reprocesado es inconsistente con los datos del entorno que maneja el *Network Manager* se deben llevar a cabo 2 distintos procesos en base a si se da entre 12 y 1 hora antes del EOBT o después.

Es decir, tras aprobar el IFPS un plan de vuelo, este es reprocesado cada 30 minutos para comprobar si sigue siendo viable en base a las condiciones ambientales de las cuales disponga el *Network Manager*. En caso de que se determine que ese plan de vuelo ha dejado de ser viable debido a un cambio de dichas condiciones, existen dos procedimientos dependiendo de cuánto falte para el EOBT del vuelo. Ambos procedimientos se explican en los apartados 9.7.1 y 9.7.2.

9.7.1 Desde 12 horas antes del EOBT a 1 hora (incluida) antes del EOBT

Si entre 12 y 1 hora (incluida) antes del EOBT se encuentra alguna inconsistencia en el plan de vuelo respecto a los datos del *NM Environment* en ese periodo de tiempo, el IFPS debe actualizar el estado del plan de vuelo correspondiente a *REVAL_SUSPENDED*. A su vez, el IFPS ha de enviar un mensaje interno de modificación al EFTMS. Esta modificación no altera la información contenida en el plan de vuelo, pero provee al EFTMS con los datos necesarios para que el plan de vuelo sea suspendido mediante un mensaje FLS.

Dicho mensaje FLS ha de ser enviado, entre 2 y 12 horas antes del EOBT al creador del plan de vuelo, al creador de los mensajes asociados enviados posteriormente y al AOCC. De esta manera, el operador tiene la opción de responder con un mensaje CHG, CNL o DLA al regulador. La Ilustración 57 muestra el diagrama de flujos de este proceso.

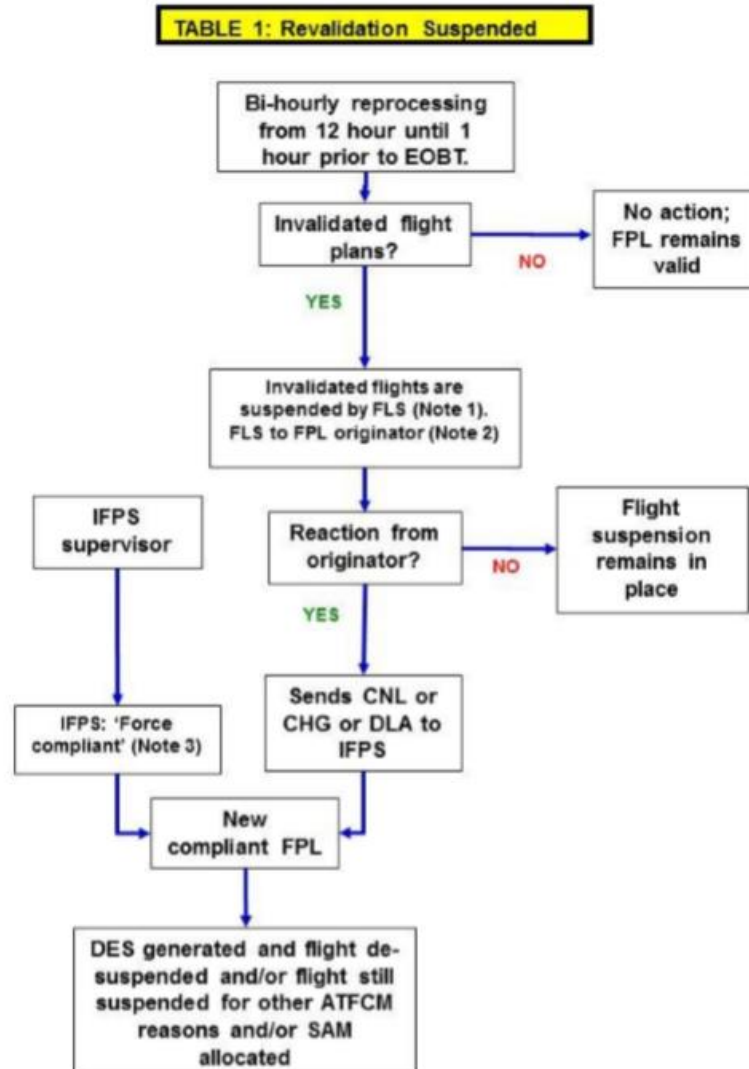


Ilustración 57: Reprocesamiento tipo Revalidation Suspended. (EUROCONTROL, IFPS Users Manual , 2018)

Como se ve en el diagrama, todo parte de que el plan de vuelo haya sido invalidado o no. Si no ha sido así, el plan se mantiene vigente y se mantiene todo como estaba; en caso contrario, si el plan de vuelo es suspendido mediante un mensaje FLS, el creador del mensaje puede dejarlo tal cual, manteniendo la suspensión del plan, o enviar un mensaje de los tres definidos en 9.5.3. Por el otro lado está el IFPS que, en caso de forzar la aprobación, junto con el envío del creador del mensaje de un CNL, DLA o CHG hace que se reapruebe el plan de vuelo, pasando este de estar suspendido a estar de nuevo aprobado, salvo que razones relacionadas con el ATFM no lo permitan.

9.7.2 Desde 1 hora (no incluida) hasta el EOBT

En este caso el IFPS debe actualizar el estado del plan de vuelo a *REVAL_ADVISORY* y se ha de enviar automáticamente un mensaje al creador del plan de vuelo que contenga: la identificación de la aeronave, el aeródromo de salida, el aeródromo de destino, la EOBT, la *Estimated Off-Block Date* (EOBD), y en la mayoría de los casos una propuesta de ruta alternativa precedida de una lista de errores detectados durante el reprocesamiento.

Se recomienda al creador del plan de vuelo que lleve a cabo dicha ruta alternativa. En caso de que se use ésta, es responsabilidad del propio creador del plan de vuelo evaluar si dicha ruta es operativamente aceptable en términos como longitud, países sobrevolados o meteorología, entre otros. Los vuelos originados desde fuera del IFPZ correspondiente o los vuelos que en la casilla 18 contengan un STS/HOSP, FFR, SAR o MEDEVAC no deben ser suspendidos, pero sí se les debe dar un estado de *REVAL_ADVISORY*.

La Ilustración 58 define el proceso a seguir en este caso en base, principalmente, a si se dispone de una dirección de destinatario. Lo normal es que no se disponga de dirección de destinatario únicamente en los casos en los que el plan de vuelo haya sido generado desde un RPL.

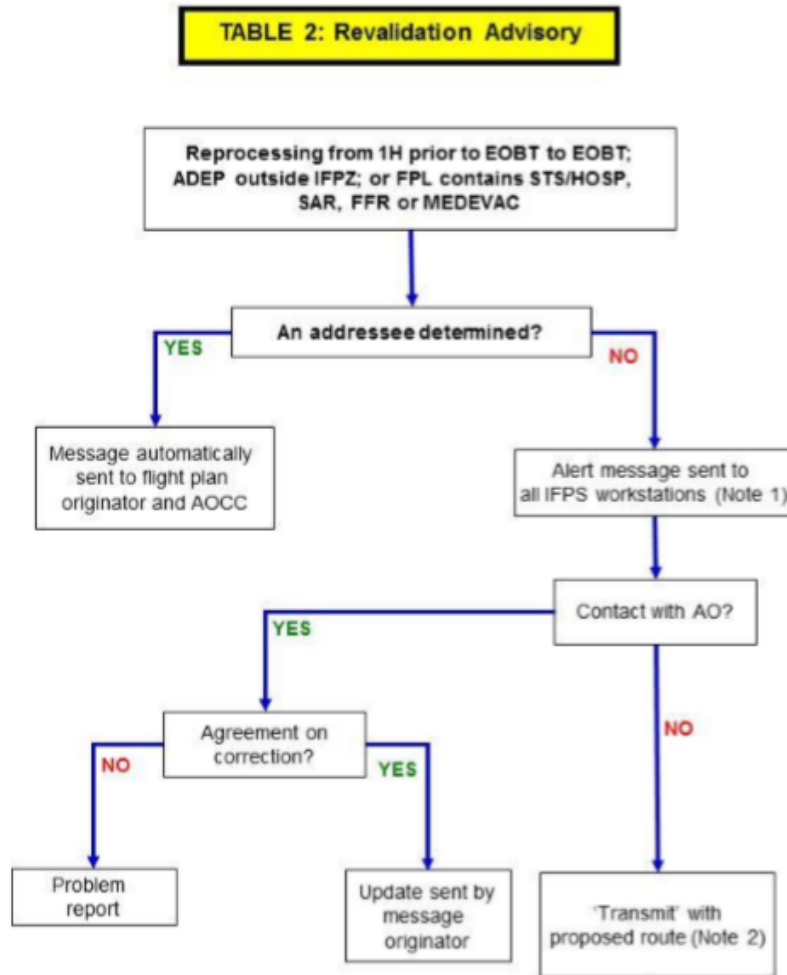


Ilustración 58: Reprocesamiento tipo Revalidation Advisory. (EUROCONTROL, IFPS Users Manual , 2018)

En caso de que el plan de vuelo sea reprocesado y se haya determinado una dirección de destinatario al que notificarle dicho reprocesamiento, el mensaje es directamente enviado a ese destinatario, que en este caso es tanto el creador del mensaje como el *Airline Operations Control Center* (AOCC). Si no se dispone de esa dirección, se envía un mensaje de alerta a todas las estaciones IFPS. Si se puede establecer contacto con el operador de la aeronave, se trata de llegar a un acuerdo para la corrección del plan de vuelo, que en caso de no conseguirse da lugar a que se reporte un problema. En cambio, si se llega al acuerdo, el creador del mensaje envía una actualización con los cambios.

Una vez definido el reprocesamiento de los planes de vuelo; a continuación, se explica el papel del ATCC en la metodología para la aprobación de planes de vuelo. En primer lugar, se define lo que hacen los ATCC en la fase de pre-vuelo, antes de que el avión despegue. Después, se describen las distintas medidas que toman una vez el vuelo ha despegado, enviando distintos tipos de mensajes al IFPS para la realización de modificaciones en el plan de vuelo aceptado previamente.

9.8 Modificación del FPL a manos del ATC antes de la salida (AMOD)

En la fase pre-vuelo, aparte del IFPS, los ATCC también pueden llevar a cabo cambios en el plan de vuelo en caso de que se den cuenta de que la ruta o nivel de vuelo crucero definido no sean el correcto y requieran ser modificados. Así se recoge en el EC No 1033/2006 (EASA, Commission Regulation EC 1033/2006, 2006): “Las unidades ATC deben, a través de IFPS, permitir cualquier cambio necesario referido a la ruta o nivel de vuelo dentro de un plan de vuelo debido a que éste pueda afectar a la seguridad de un vuelo, para planes de vuelo o mensajes de actualización asociados previamente recibidos por dichas unidades desde el IFPS.”

Ningún otro cambio ha de ser realizado por la ATCC en la fase pre-vuelo sin la coordinación con el operador. Las ATCC deben notificar al IFPS acerca de cualquier solución para dificultades relacionadas con la ruta o el nivel de vuelo de los planes de vuelo recibidos por el ATC en la fase pre-vuelo desde el IFPS bajo las siguientes circunstancias:

- 1) Cuando el punto de salida de su área de responsabilidad cambia respecto al indicado en la última información de ruta recibida desde el IFPS
- 2) Cuando se cambia el nivel de vuelo/crucero con respecto al indicado a la última información de ruta recibida desde IFPS.

Las unidades ATC no deben enviar mensajes de corrección pre-vuelo menos de 30 minutos antes del EOBT del vuelo. Aparte de estos mensajes, los ATCC pueden enviar distintos tipos de mensajes una vez el vuelo ha despegado y se encuentra en la fase vuelo. Todos ellos se explican en el siguiente apartado.

9.9 Mensajes enviados por la unidad ATS

En caso de que la unidad ATS disponga de información nueva o revisada referida a una aeronave que está volando con IFR/GAT dentro del IFPZ debe comunicárselo al ATCC correspondiente para que éste envíe un mensaje AFP al IFPS. El objetivo de los mensajes AFP es permitir al *Network Manager* proveer a las ATCC aguas abajo con información más precisa acerca del vuelo correspondiente. Es importante remarcar que solo se han de enviar para vuelos que ya han despegado. Normalmente se generan automáticamente por el sistema de la unidad ATS correspondiente, basándose en una entrada ATC. El IFPS debe responder a un mensaje AFP con un mensaje ORM, al igual que responde a un FPL. Toda la información recogida en este apartado se ha obtenido del Manual IFPS (EUROCONTROL, IFPS Users Manual, 2018).

Existen diferentes situaciones en las que se ha de enviar un AFP: ante la falta de un plan de vuelo; para un cambio de ruta, nivel de vuelo o tipo de aeronave; para un cambio de reglas de vuelo o de tipo de vuelo; para un desvío o para un cambio de equipamiento de la aeronave. Todos estos casos se explican más adelante, a partir del punto 9.9.1.

Tras el procesamiento de un mensaje AFP de manera satisfactoria por parte del IFPS, éste envía un *ATC Flight Plan* (APL) o un *ATC Change* (ACH). En caso del APL, es enviado por el IFPS a aquellos ATCC a los que no hubiese enviado información de vuelo para el vuelo que corresponda debido a que la ruta original no pasaba por su zona de responsabilidad. El ACH, en cambio, se envía a los ATCC que ya habían recibido información de vuelo. Cabe destacar que en caso de que el IFPS reciba un mensaje RQP para un vuelo que haya sido modificado por un AFP, debe transmitir un APL al remitente de dicho mensaje RQP, dejando claro en el subcampo *Remarks* (RMK) que se trata de una actualización mediante APL.

Por otro lado, si la dependencia ATS solicita un plan de vuelo suplementario de un vuelo no afectado por el IFPS, el mensaje RQS ha de ser transmitido a la ARO del aeródromo de salida; o si se trata de un *Air-Filed Flight Plan* (AFIL), a la dependencia de los servicios de tránsito aéreo especificada en dicho mensaje de plan de vuelo.

A continuación, se explica cuáles son los distintos tipos de AFP que son enviados por los ATCC al IFPS en función del tipo de modificación que se lleve a cabo. Se define el formato en el que han de ser escritos y qué información han de contener cada uno de ellos.

9.9.1 AFP cuando falta un plan de vuelo

Un mensaje AFP ha de ser enviado al IFPS de manera automática en formato OACI o *ATS Data Exchange Presentation* (ADEXP), que es el formato definido por EUROCONTROL, por un ATCC cuando se descubra que falta un plan de vuelo. Se considera que falta un plan de vuelo cuando se dan las tres siguientes condiciones a la vez:

- Una estimación del vuelo es recibida por un ATCC.
- Dicho centro no ha recibido ninguna información de vuelo desde el IFPS.
- El IFPS no posee un plan de vuelo para dicho vuelo.

Se requiere un AFP para la falta de un plan de vuelo cuando, con objetivo de comprobar si un plan de vuelo está disponible en el IFPS, el ATCC envíe un RQP y el propio IFPS no contenga un plan de vuelo acorde a los detalles del RQP enviado. En ese momento se ha de enviar un mensaje REJ al remitente del RQP.

El AFP ha de contener toda la información disponible acerca del vuelo que corresponda y ha de ser enviado al IFPS para su correcto procesamiento. La información mínima contenida en el mensaje ha de ser la siguiente:

- Título del mensaje.
- Identificación de la aeronave.
- Tipo de aeronave.
- Información de equipamiento y capacidades.
- Aeródromo de salida.
- Datos de estimación de vuelo.
- Ruta.
- Aeródromo de destino.
- *Performance Based Navigation* (PBN).

Después de recibir el AFP, el IFPS debe crear un mensaje APL, y debe ignorar automáticamente cualquier error relacionado con la ruta definida en el AFP, como por ejemplo errores relacionados con el *Route Availability Document* (RAD) o el *Conditional Route* (CDR).

9.9.2 AFP para cambio de ruta

El ATCC correspondiente ha de enviar un AFP para cambio de ruta en formato ADEXP automáticamente siempre que:

- 1) Cuando el punto de salida de su área de responsabilidad cambia respecto al publicado en el apartado de ruta del último plan de vuelo recibido desde el IFPS.
- 2) En el contexto de cruce de frontera en *Free Route*, cuando el punto de salida de su área de responsabilidad cambia de manera que afecta al siguiente ATCC aguas abajo.

Un AFP para cambio de ruta enviado al IFPS para su procesamiento ha de contener, como mínimo, la siguiente información:

- Título del mensaje.
- Identificación de la aeronave.
- Aeródromo de salida.
- Datos de estimación de vuelo.
- Ruta.
- Aeródromo de destino.

9.9.3 AFP para el cambio del nivel de vuelo solicitado en fase crucero

El ATCC debe enviar de manera automática un mensaje AFP al IFPS en formato ADEXP cuando el nivel de vuelo solicitado en fase crucero a la salida de su área de responsabilidad cambie con respecto al estipulado en la última actualización del plan de vuelo recibido desde el IFPS. Este mensaje solo ha de ser enviado para cambios de nivel de vuelo en fase crucero, como dice su nombre, y no para cambios de nivel de vuelo intermedios o para niveles de vuelo asignados por el ATCC con base táctica, y solo para cambios que sean aplicables desde un punto previo al *top of descent*. El mensaje en sí ha de contener, como mínimo, la siguiente información:

- Título del mensaje.
- Identificación de la aeronave.
- Aeródromo de salida.
- Datos de estimación de vuelo.
- Ruta.
- Aeródromo de destino.

El nuevo nivel de vuelo solicitado ha de estar especificado en la información de ruta en el punto en el que se haya planeado que se realice el cambio cuando el cambio se dé dentro del espacio aéreo del ATCC creador del mensaje. En cambio, en caso de que el cambio de nivel de vuelo esté previsto en un área de responsabilidad de un ATCC previo, o en el punto inicial de la ruta propuesta en el AFP, el nivel de vuelo nuevo ha de estar indicado como el nivel de vuelo en fase crucero solicitado inicial en la ruta.

Cuando el IFPS recibe un mensaje de este tipo, ha de calcular un nuevo perfil de vuelo basado en ese nuevo nivel de vuelo crucero. A su vez, ha de confirmar que es viable en cuanto a disponibilidad de ruta, *Reduced Vertical Separation Minimum* (RVSM) y requerimientos 8.33 kHz. En caso de que no sea así, el AFP será reprobado.

9.9.4 AFP para un cambio de tipo de aeronave

El ATCC debe enviar de manera automática un mensaje AFP al IFPS en formato ADEXP cuando compruebe que un vuelo está siendo llevado a cabo con un tipo de aeronave distinto al que se recoge en el último plan de vuelo recibido desde el IFPS. En este caso, el mensaje AFP enviado al IFPS debe contener la siguiente información por lo menos:

- Título del mensaje.
- Identificación de la aeronave.
- Tipo de aeronave.
- Aeródromo de salida.
- Datos de estimación de vuelo.
- Aeródromo de destino.

Normalmente el equipamiento cambia al cambiar el tipo de aeronave. Es necesario confirmar el equipamiento de la aeronave por parte del ATCC creador del mensaje AFP, incluyendo esta información en el propio mensaje, cuando se lleve a cabo un cambio de tipo de aeronave. Deben confirmarse, como

mínimo, el siguiente equipamiento:

- Estado del equipamiento 8.33 kHz.
- Estado del equipamiento *Ultra High Frequency* (UHF).
- Aprobación del RVSM.
- El PBN en caso de que el *Radio Communication Equipment* (CEQPT) contenga la letra 'R'.

Cuando el IFPS reciba este tipo de AFP, debe recalcular el perfil del vuelo correspondiente usando las características de actuación del nuevo tipo de aeronave. El IFPS ha de encargarse de que ese nuevo perfil se procese de manera manual y se adjunten los indicadores *Instrumental Flight Procedure* (IFP) pertinentes.

9.9.5 AFP para cambio de reglas de vuelo (IFR/VFR)

Se debe enviar automáticamente este tipo de AFP al IFPS en formato ADEXP cuando las reglas de vuelo sean distintas para un vuelo, o parte de él, respecto a los datos disponibles en el último plan de vuelo recibido desde el IFP. El mensaje AFP debe contener las nuevas reglas de vuelo para dicho vuelo. El mensaje enviado ha de contener, como mínimo, la siguiente información:

- Título del mensaje.
- Identificación de la aeronave.
- Reglas de vuelo.
- Aeródromo de salida.
- Datos de estimación de vuelo.
- Ruta.
- Aeródromo de destino.

La información de ruta debe contener indicadores de reglas de vuelo (IFR/VFR) correctos y cualquier información asociada sobre velocidad o nivel de vuelo que sea necesaria en el punto donde se vaya a realizar el cambio de reglas.

9.9.6 AFP para cambio de tipo de vuelo

El ATCC ha de enviar un mensaje AFP en formato ADEXP de manera automática cuando el tipo de vuelo para un vuelo, o parte de él, difiera en comparación con el recogido en el último plan de vuelo recibido desde el IFPS. Este requerimiento se refiere a un cambio de GAT a OAT o viceversa, indicado en la casilla de Ruta del plan de vuelo. El mensaje debe contener, como mínimo, la siguiente información.

- Título del mensaje.
- Identificación de la aeronave.
- Aeródromo de salida.
- Datos de estimación de vuelo.
- Ruta.
- Aeródromo de destino.

La información de ruta debe contener indicadores de tipo de vuelo (OAT/GAT) correctos y cualquier información asociada sobre velocidad o nivel de vuelo que sea necesaria en el punto donde se vaya a realizar el cambio de tipo de vuelo.

9.9.7 AFP para un desvío

El ATCC debe enviar este tipo de mensaje AFP en formato ADEXP de manera automática cuando haya un cambio en el aeródromo de llegada respecto al indicado en el último plan de vuelo recibido desde el IFPS. Dicho mensaje debe contener, como mínimo, la siguiente información.

- Título del mensaje.
- Identificación de la aeronave.
- Aeródromo de salida.
- Datos de estimación de vuelo.
- Ruta.
- Aeródromo de destino original.
- Aeródromo de destino nuevo.

El nuevo aeródromo de destino ha de estar incluido en el campo primario ADES, mientras que el original ha de estar incluido en el campo primario *Original Aerodrome of Destination* (ADESOLD). Por otro lado, el campo de ruta debe contener el segmento de la ruta previsto de ser volado hacia el nuevo aeródromo de destino dentro del espacio aéreo que sea responsabilidad del ATCC creador del mensaje.

Cuando la ruta definida hacia el nuevo aeródromo de destino esté incompleta, el *staff* IFPS se ha de asegurar de conectar correctamente el punto previo al desvío con el nuevo aeródromo de llegada. En caso de que esté completa, el IFPS no ha de cambiar nada. A su vez, en caso de que un vuelo IFR/GAT operando dentro del IFPZ se desvíe a un aeródromo diferente al indicado como aeródromo de llegada en el plan de vuelo definido, el servicio de tráfico aéreo correspondiente ha de enviar un mensaje ARR al IFPS para su procesamiento.

9.9.8 AFP para el cambio de equipamiento de aeronave

El ATCC debe enviar este tipo de mensaje AFP de manera automática al IFPS en formato ADEXP cuando el equipamiento de la aeronave sea distinto comparado al descrito en el último plan de vuelo recibido desde el IFPS. Solo se ha de enviar en caso de que cambien las casillas 10a y/o 10b. El mensaje ha de contener, como mínimo, la siguiente información.

- Título del mensaje.
- Identificación de la aeronave.
- Tipo de aeronave.
- Equipamiento revisado de la aeronave.
- Aeródromo de salida.
- Datos de estimación de vuelo.
- Aeródromo de destino.

9.10 Futuros proyectos de aplicación

Eurocontrol en su faceta estratégica y de desarrollo propone una serie de proyectos que presentan las principales evoluciones operativas y técnicas lideradas por el NM. Los proyectos planificados hasta el momento se dividen en siete áreas: sistemas de información, espacio aéreo, capacidad, ATFM, aeropuertos, seguridad y optimización de CNS (Communication, Navigation and Surveillance).

Entre los proyectos propuestos por Eurocontrol, se presenta el llamado Initial Trajectory Information Sharing en el que la herramienta RIT podría ser aplicada.

El concepto FF-ICE (Información de vuelo y flujo para un entorno colaborativo) cubre el proceso para el envío, difusión y uso de datos de vuelo dentro del futuro sistema ATM y, por lo tanto, actúa como facilitador para muchos de los requisitos identificados por el ATM global.

El objetivo del proyecto es implementar mejoras en la planificación de vuelo de acuerdo con los requisitos de la OACI y en base a los hallazgos de SESAR. Como tal, determinará los requisitos europeos y el despliegue detallado resultante con respecto a la implementación en los sistemas y servicios de NM de los procedimientos y procesos relacionados con la FF-ICE Fase 1, el plan de vuelo extendido y la integración y distribución del plan de vuelo OAT (Operational Air Traffic).

Los objetivos y beneficios se presentan a continuación:

- Nuevos conceptos de operación y nuevas funcionalidades a ser introducidas, tales como, PBN, que pueden no estar soportadas por el formato del plan de vuelo actual.
- Ahorros significativos para los ANSP al poder planificar su migración sobre la base del apoyo de NM.
- Oportunidades importantes para que NM amplíe sus servicios a los estados y usuarios del espacio aéreo más allá de la Unión Europea.
- Se espera que la integración de OAT mejore los procesos asociados con la determinación de la demanda, lo que lleva a una mejor asignación de recursos en apoyo del uso flexible del espacio aéreo avanzado.

En base al objetivo principal de este proyecto que es mejorar la planificación del plan de vuelo y la introducción de nuevas funcionalidades, la herramienta RIT sería de gran utilidad para la introducción de RPAS en espacio aéreo superior.

10 VALIDACIÓN DEL PROCESO DE ENCAMINAMIENTO DEL PLAN DE VUELO: CASOS DE ESTUDIO

Para finalizar, en esta sección se ha seleccionado un caso de estudio real realizado por una aeronave con el fin de analizar un posible plan de vuelo para RPAS en un espacio aéreo controlado. El objetivo del estudio es validar la metodología desarrollada en apartados anteriores para determinar las restricciones geográficas y temporales al plan de vuelo con RPAS. Se analiza un vuelo para un día elegido y las diferentes posibilidades para la introducción de RPAS estudiando las fases, estratégica, pre-táctica y táctica.

10.1 Vuelo convencional de referencia

Para la elección del primer caso de estudio se ha utilizado la herramienta de (EUROCONTROL, NEST Modelling Tool, 2017) y a partir del ciclo AIRAC 1608 se ha escogido el siguiente vuelo realizado el 17 de agosto de 2016 procedente de Bilbao con destino Barcelona.

Se ha elegido este vuelo debido a su paso por dos sectores para el estudio que se desea realizar, siendo éstos LECMZGZ y LECMPAU, ya que la herramienta RIT se encuentra modelizada para ambos. De esta forma, podrá realizarse la simulación de vuelos con RPAS a través de dichos sectores. Se presenta el vuelo realizado por la aeronave convencional, con su paso por ambos sectores y los diferentes puntos de notificación en la Ilustración 59 y Ilustración 60.

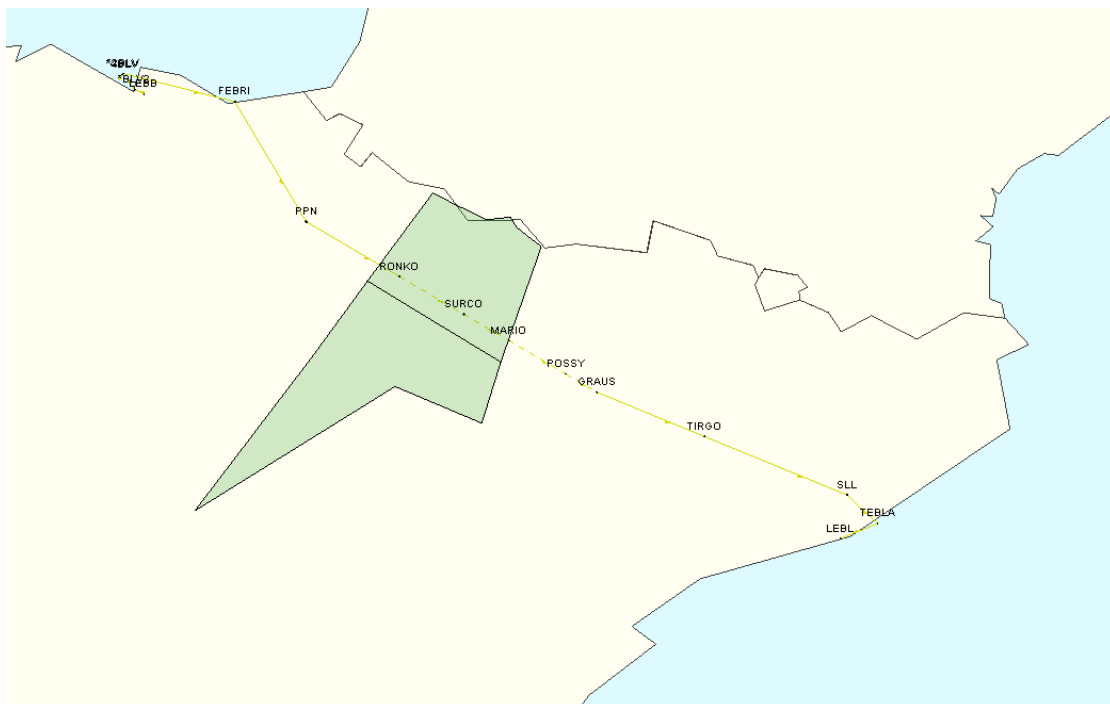


Ilustración 59: Vuelo realizado desde LEBB a LEBL pasando por el sector LECMZGZ. Fuente: NEST.

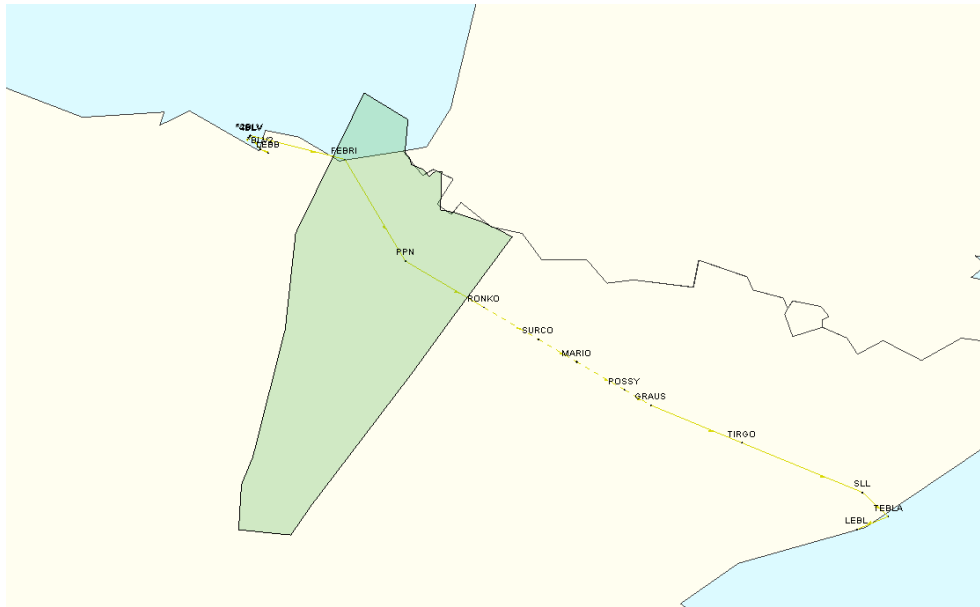


Ilustración 60: Vuelo realizado desde LEBB a LEBL pasando por el sector LECMPAU. Fuente: NEST.

Como se puede comprobar en las imágenes los puntos de notificación por los que pasa la aeronave son LEBB, BLV2, 4BLV, 2BLV, FEBRI, PPN, RONKO, SURCO, MARIO, POSSY, GRAUS, TIRGO, SLL, TEBLA, LEBL desde Bilbao hasta Barcelona.

El vuelo realizado utiliza la aerovía UM601 durante todo el trayecto y el nivel de vuelo 280 en la fase de ruta. A partir de la herramienta NEST es posible obtener las características principales del vuelo recogidas en la siguiente Tabla 52.

Tabla 52: Características del vuelo elegido desde LEBB a LEBL.

FLIGHT ID	AA55638368
CALL SIGN	IBK6783
ORIGIN	LEBB
DESTINATION	LEBL
EOBT	9:15
ETOT	9:20
ETOT DATE	17/08/2016
ARRIVAL TIME	10:11
RFL	280
AIRLINE	IBK
AIRCRAFT TYPE	B738
WVC	M
ROUTE LENGHT (MN)	297,34
DELAY (min)	0

La Ilustración 61 muestra la ruta que ha seguido la aeronave en el vuelo de Bilbao a Barcelona. Como se puede comprobar la aeronave se estabiliza una vez alcanza el FL280 al pasar por el punto de notificación PPN pasando de un FL268 a FL 280 en el que comienza la fase de ruta. La fase de ruta termina cuando pasa por el punto de notificación POSSY descendiendo al FL 268 en el punto GRAUS. Se muestran en la imagen las horas a las que se produce cada cambio de altitud, los niveles de vuelo, las latitudes correspondientes y los puntos de notificación por los que pasa la aeronave.

Dentro del sector LEBBTA la aeronave pasa por los puntos de notificación BLV2, 4BLV, 2BLV y FEBRI. Dentro del sector LECMPAU pasa por el punto PPN y dentro del sector LECMZGZ por RONKO y SURCO. Más adelante, en el sector LEBLDDN recorre los puntos de notificación MARIO, POSSY y GRAUS. Dentro de LEBLNW4 pasa por TIRGO y dentro de LEBLSABA por SLL. Por último, dentro del sector LEBLFWR pasa por el punto de notificación TEBLA y posteriormente aterriza en LEBL.

Flight: AA55638368 Initial. Delay sum : 0 min

Flight Information

Departure: LEBB Dep time: 17/08/2016 09:20
 Arrival: LEBL Arr time: 17/08/2016 10:11
 CallSign: IBK6783 RFL: 280
 Airline: IBK Aircraft: B738 (M)

Date Time	Airport	Navigation Point	Elementary Sector	Flight Level	Latitude
17/08/2016 09:20:00	LEBB	-	-	0	43°18'04" -2°54'38"
17/08/2016 09:20:00	-	-	LEBBTA	0	43°18'04" -2°54'38"
17/08/2016 09:21:06	-	*BLV2	-	30	43°19'09" -2°58'37"
17/08/2016 09:22:41	-	*4BLV	-	77	43°23'24" -3°04'33"
17/08/2016 09:22:48	-	*2BLV	-	80	43°23'43" -3°04'10"
17/08/2016 09:29:00	-	FEBRI	-	140	43°18'35" -2°16'26"
17/08/2016 09:29:12	-	-	LECMPAL	145	43°17'40" -2°15'31"
17/08/2016 09:35:29	-	PPN	-	264	42°44'02" -1°42'07"
17/08/2016 09:38:58	-	-	LECMZGZ	280	42°32'47" -1°10'25"
17/08/2016 09:39:54	-	RONKO	-	280	42°29'45" -1°01'50"
17/08/2016 09:42:55	-	SURCO	-	280	42°19'44" -0°34'05"
17/08/2016 09:45:00	-	-	LEBLDDN	280	42°12'50" -0°15'15"
17/08/2016 09:45:04	-	MARIO	-	280	42°12'37" -0°14'39"
17/08/2016 09:47:50	-	POSSY	-	280	42°03'41" 0°09'26"
17/08/2016 09:49:21	-	GRAUS	-	268	41°58'45" 0°22'35"
17/08/2016 09:52:47	-	-	LEBLNW4	195	41°51'29" 0°50'31"
17/08/2016 09:54:56	-	TIRGO	-	150	41°47'04" 1°07'34"
17/08/2016 10:01:31	-	-	LEBLSABA	95	41°34'30" 1°54'16"
17/08/2016 10:03:41	-	SLL	-	66	41°31'12" 2°06'35"
17/08/2016 10:04:11	-	-	LEBLFWR	59	41°29'49" 2°08'42"
17/08/2016 10:07:03	-	TEBLA	-	30	41°22'52" 2°19'30"
17/08/2016 10:11:30	LEBL	-	-	0	41°17'49" 2°04'42"

Ilustración 61: Horas, niveles de vuelo y latitudes de paso por cada punto de notificación y sectores.

Fuente: NEST.

Se adjunta además el perfil vertical en la Ilustración 62 donde se observa la progresión de la aeronave a lo largo de los diferentes puntos de notificación según el nivel de vuelo.

FLIGHT ROUTE

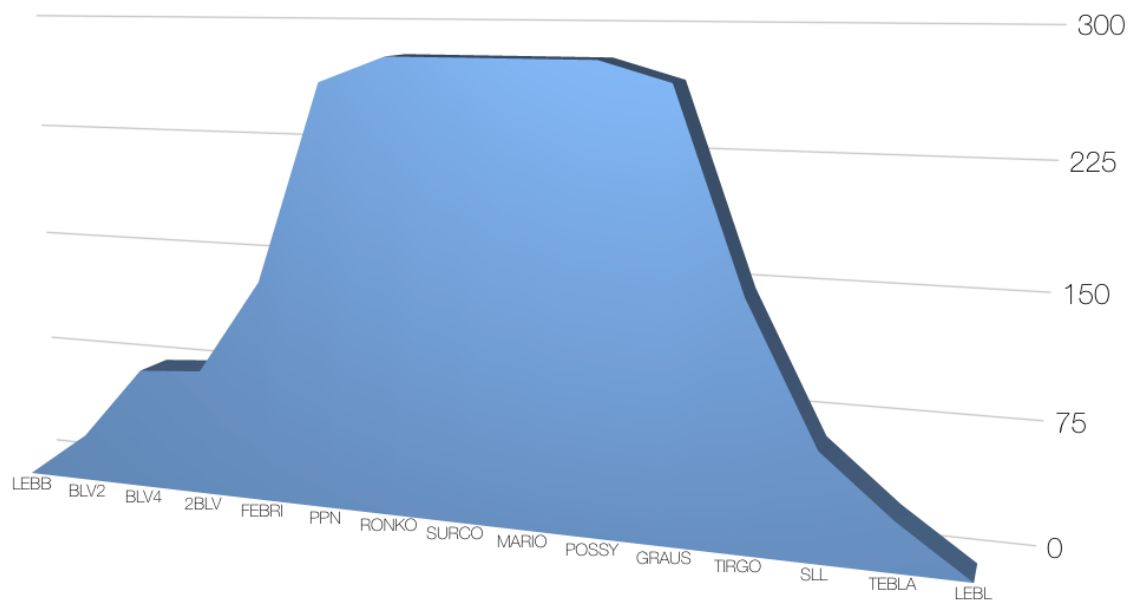


Ilustración 62: Perfil vertical del vuelo de la aeronave en función de los puntos de notificación. Fuente: NEST.

10.2 Introducción de un RPAS en UM601

En este apartado se va a analizar la viabilidad del plan de vuelo de un RPAS introducido en la aerovía con tráfico convencional UM601 que recorre tanto LECMPAU como LECMZGZ.

10.2.1 Fase estratégica

A partir de la fase estratégica se determinan una serie de corredores aéreos segregables. En el caso que se está planteando en este apartado, la aerovía UM601 no se puede segregar, en principio, en ningún corredor aéreo. Hace falta un estudio pre-táctico y táctico de ésta para determinar su disponibilidad. Aun así, se han determinado otros corredores aéreos para vuelo horizontal en los que sí podrían introducirse RPAS según la fase estratégica. Estos son la aerovía UN725, para el nivel de vuelo 270 y las aerovías UQ400 y UQ88, para los niveles 260, 280 y 300.

10.2.2 Fase pre-táctica

Dada la ruta elegida desde LEBB hasta LEBL cuya hora de entrada en el sector de Pamplona es de 9:00 a 10:00 se propone la realización de un vuelo RPAS en este margen horario.

Como se ha visto anteriormente el nivel de vuelo utilizado en la fase de ruta es el 280 y se utiliza la aerovía UM601 tanto para el sector LECMPAU como para LECMZGZ. Se estudiará la fase pre-táctica para evaluar la posibilidad del vuelo de un RPAS con dichas condiciones horarias y geográficas.

Observando las tablas referidas al indicador dinámico de conflicto de aerovía $\zeta_{AWYj}(t)$ en la Tabla 53, se comprueba que para la hora de 9:00 a 10:00 y el nivel de vuelo 280, la aerovía UM601 no se encuentra disponible para la segregación. De esta manera es necesario un análisis táctico posterior mediante la información que proporcionarían los proveedores de servicios de la navegación aérea.

Tabla 53: Valores del indicador de conflicto $\zeta_{AWYj}(t)$ para la fase pretáctica de LECMPAU.

FL280	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00
UN858	0	0	0,012	0	0	0	0	0	0	0,012	0	0,029	0	0	0
UM190	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00014	0	0,017	0	0	0
UP181	0	0	0,012	0	0	0	0,012	0,012	0	0,024	0	0,059	0	0	0
UL176	0	0	0,012	0	0	0	0	0	0,00014	0	0,0008	0	0	0	0
UQ262	0,012	0	0,012	0	0	0	0,024	0,024	0	0,096	0	0,0008	0	0	0
UQ148	0,012	0	0,012	0	0	0	0,012	0,012	0	0,024	0	0,059	0	0	0
UN10	0,014	0	0	0	0	0	0	0	0,00014	0	0,0010	0	0	0	0
UN857	0,014	0	0	0	0	0	0	0	0,00014	0	0,0010	0	0	0	0
UL866	0,014	0	0	0	0	0	0	0	0,00014	0	0,0010	0	0	0	0
UN995	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00014	0	0,0010	0	0	0	0
UN976	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00014	0	0,013	0	0	0	0
UM601	0	0	0	0	0	0	0,012	0,012	0	0,00014	0	0,0003	0	0	0
UM176	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00014	0	0,0010	0	0	0	0
UQ57	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00014	0	0,0010	0	0	0	0
UQ73	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00014	0	0,0010	0	0	0	0
UT430	0,012	0	0,012	0	0	0	0	0	0	0,012	0	0,029	0	0	0
UP152	0	0	0	0	0	0	0,012	0,012	0	0,012	0	0,0004	0	0	0
UN725	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00014	0	0,0010	0	0	0	0
UQ400	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00014	0	0,0010	0	0	0	0
UQ88	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00014	0	0,0010	0	0	0	0
UL184	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00014	0	0,0010	0	0	0	0
UQ424	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00014	0	0,0010	0	0	0	0
UQ300	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00014	0	0,0010	0	0	0	0
UQ268	0,012	0	0,012	0	0	0	0,012	0,012	0	0,024	0	0,059	0	0	0

Analizando la imposibilidad de introducción de RPAS en la hora requerida se desprenden tres posibles soluciones para el operador que desee realizar dicho vuelo.

1. La primera está relacionada con un cambio de ruta,
2. La segunda variante propone un cambio de nivel de vuelo y, por último,
3. La tercera opción está basada en un cambio en la franja horaria del vuelo.

A continuación, se presentan las soluciones esquematizadas en la Ilustración 63 de forma detallada realizando un análisis de cada una en función de las condiciones operativas y los sectores utilizados LECMPAU y LECMZGZ.

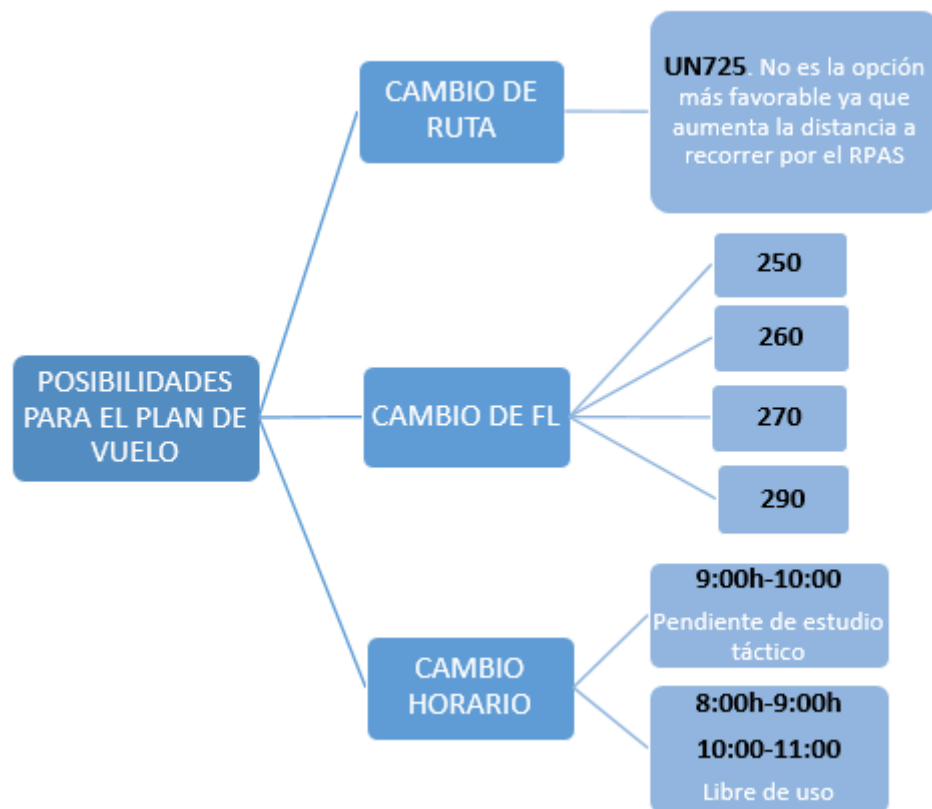


Ilustración 63: Diagrama con las posibles soluciones para el plan de vuelo de RPAS.

10.2.2.1 Primera solución: Elección aerovía alternativa

El primer cambio está relacionado con la elección de una aerovía alternativa ya que la imposibilidad de segregación se debe a la aerovía elegida UM601 en el periodo de tiempo planificado originalmente. De esta manera, se analizan las diferentes opciones de la fase pre-táctica para ambos sectores y se llega a una posible opción de cambio de aerovía.

La aerovía UN725 se encuentra libre para las condiciones operacionales elegidas, es decir, para el nivel 280 y la franja horaria de 9:00h a 10:00h en ambos sectores LECMPAU y LECMZGZ. Se trata de una opción válida debido a que pasa por ambos sectores de forma directa hasta LEBL. Esta solución presenta un inconveniente y es que aumenta la distancia a recorrer debido a que desde LEBB hasta la aerovía UN725 debería hacerse un cambio de SID (Standard Instrument Departure) Route.

Se presentan otras opciones horarias válidas en las cuales se encuentre el espacio aéreo necesario libre para su uso. En concreto, el sector LECMPAU, de 8:00 a 9:00 y de 10:00 a 11:00 se encuentra libre para la introducción de RPAS como se puede comprobar en la Tabla 53. En cuanto al sector LECMZGZ se ha comprobado su disponibilidad durante esas horas para la aerovía UM601 en la Tabla 54.

Tabla 54: Valores del indicador de conflicto $\zeta(t)$ para la fase pre-táctica de LECMZGZ.

FL 280	UM601	UN725	UQ400	UQ88	UN976	UL184	UQ258	UL27	UN871	UQ98	UQ126	UQ53	UN669	UM176
5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0116	0,0116	0,0116	0,0116	0,0116	0
10:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0125	0,0125	0,0125	0	0	0
11:00	0,0109	0,0217	0,0217	0,0217	0,0109	0,0217	0,0217	0,0002	0,0002	0,0324	0,0109	0,0002	0,0002	0,0217
12:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0116	0,0116	0,0116	0,0116	0,0116	0
15:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0125	0,0125	0,0125	0	0	0
16:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0116	0,0116	0,0116	0,0116	0,0116	0
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Por lo tanto, es posible el cambio de hora para el caso de estudio y es una solución válida para el vuelo de LEBB a LEBL por la misma aerovía, UM601, y el mismo nivel de vuelo, 280.

Plan de vuelo válido para RPAS 1 con el cambio de franja horaria a las 8-9 o 10-11 en ambos sectores.

10.2.3 Fase táctica

En este caso, se considera que el operador desea volar en la franja horaria original de 9:00 a 10:00 por lo tanto es necesario un estudio táctico que analice de manera más detallada cuando no podría volar. De esta forma, la realización del plan de vuelo queda pendiente de la autorización por parte del ANSP.

Concretamente la aeronave que realiza el vuelo desde LEBB hasta LEBL entra en el sector LECMPAU a las 9:29:30h y sale a las 9:39:38h tardando 608 segundos en recorrer el sector sin ninguna demora. A las 9:39:38 entra en el sector LECMZGZ y sale a las 9:46:02 en un tiempo de 384 segundos en condiciones ideales según la información proporcionada por el NEST.

A partir de la información contenida en el documento (SATAA, Entregable 8: Análisis dinámico sobre la disponibilidad del espacio aéreo y aplicación de la fase táctica para la integración de RPAS en un

escenario de ruta, 2019) para el que se realizó el estudio táctico del sector LECMZGZ, se estudia el caso de introducción de un RPAS en la aerovía UM601 por la que ya se encuentra una aeronave convencional tanto en LECMPAU como en LECMZGZ.

En la siguiente Tabla 55 se presentan las características principales del escenario a analizar considerando que la longitud de la aerovía UM601 es la total de ambos sectores $L_{aerovía} = 112.8 \text{ NM}$. En cuanto a la hora de entrada y salida del RPAS se explicarán a continuación en función de los distintos casos que se den.

Tabla 55: Características escenario elegido para el vuelo desde LEBB a LEBL

<i>FL280</i>	<i>Aerovía</i>	<i>Hora de entrada</i> <i>LECMPAU</i>	<i>Hora de salida</i> <i>LECMZGZ</i>	<i>FL</i>	<i>V(kts)</i>
Aeronave	UM601	09:29:30	09:46:02	280	411.32
RPAS 1	UM601	CASOS	CASOS	280	250

- **La aeronave accede antes que el RPAS al sector LECMPAU**

La separación mínima que se debe cumplir son 5 MN. De esta forma, el RPAS nunca alcanzará a la aeronave en el vuelo por ambos sectores, siendo el tiempo mínimo de bloqueo el siguiente:

$$Ventana \ de \ bloqueo_{aeronave \ antecede} = \frac{5 \text{ NM}}{V_{aeronave \ convencional}} = 45 \text{ seg} \quad (11)$$

Por lo tanto, el valor de la ventana de bloqueo en el caso de acceder la aeronave antes que el RPAS es de 45 segundos. Esto significa que mientras el RPAS acceda a partir de los 45 segundos después de la aeronave no se creará conflicto. En la Tabla 56 se presentan las horas de entrada y salida por ambos sectores del RPAS 1 respetando la ventana de bloqueo generada por la aeronave.

Tabla 56: Horas de entrada y salida a los distintos sectores para el Caso 1.

<i>FL280</i>	<i>Hora de entrada</i> <i>LECMPAU</i>	<i>Hora de entrada</i> <i>LECMZGZ</i>	<i>Hora de salida</i> <i>LECMZGZ</i>
Aeronave	09:29:30	09:39:38	09:46:02
RPAS 1	09:30:15	09:46:31	09:57:24

Plan de vuelo válido para RPAS 1 cumpliendo las horas de la Tabla 28 para ambos sectores.

En la siguiente Tabla 57 se muestran las características principales que tendría el vuelo del RPAS 1 para el primer caso.

Tabla 57: Características vuelo RPAS desde LEBB hasta LEBL para el Caso 1

ORIGIN	LEBB
DESTINATION	LEBL
ETOT	9:14
ETOT DATE	17/08/2016
ARRIVAL TIME	10:38
RFL	280
ROUTE LENGHT (MN)	297.34
DELAY (min)	0

- **El RPAS accede antes que la aeronave al sector LECMPAU**

En este caso pueden darse dos posibilidades. En primer lugar, puede ocurrir que el RPAS abandone LECMZGZ manteniendo como mínimo la separación de 5 MN debido a que la aeronave convencional no le alcance en todo el recorrido.

En segundo lugar, puede suceder que los tiempos de entrada sean muy cercanos o la velocidad de la aeronave sea muy alta y por tanto se infrinja la mínima de separación. En este segundo caso es necesario definir una ventana de bloqueo a la aeronave convencional calculada a partir de la Ecuación 12.

$$Ventana\ de\ bloqueo_{RPAS\ antecede} = \frac{(L_{aerovia} - 5)}{V_{RPAS}} - \frac{L_{aerovia}}{V_{aeronave\ convencional}} \quad (12)$$

La ventana de bloqueo generada por el RPAS a la aeronave es de 566 segundos por lo tanto mientras no infrinja ese tiempo no existirá conflicto entre ambas y el RPAS saldrá del sector LECMZGZ con una separación de 5 MN con respecto de la aeronave.

En la Tabla 58 se presentan las horas de entrada y salida para el RPAS 1 cumpliendo con la ventana de bloqueo generada para la aeronave.

Tabla 58: Horas de entrada y salida a los distintos sectores para la Caso 2

FL280	Hora de entrada LECMPAU	Hora de entrada LECMZGZ	Hora de salida LECMZGZ
Aeronave	09:29:30	09:39:38	09:46:02
RPAS 1	09:09:27	09:25:43	09:36:36

Plan de vuelo válido para RPAS 1 cumpliendo las horas de la Tabla 29 para ambos sectores.

En la siguiente **Tabla 59** se muestran las características principales del vuelo del RPAS 1 atendiendo al segundo caso.



ORIGIN	LEBB
DESTINATION	LEBL
ETOT	8:53
ETOT DATE	17/08/2016
ARRIVAL TIME	10:17
RFL	280
ROUTE LENGHT (MN)	297,34
DELAY (min)	0

Tabla 59: Características vuelo RPAS desde LEBB hasta LEBL para el Caso 2

Por lo tanto, si se respetan las ventanas de bloqueo y con ello la separación mínima entre el RPAS y la aeronave será posible su introducción en la aerovía UM601 sin conflicto y manteniéndose la seguridad necesaria.

Debido al horario elegido el escenario ha sido una única aeronave interaccionando con el RPAS, pero se debe tener en cuenta que el estudio tiene que contemplar todas las aeronaves que se encuentren en ese nivel de vuelo por el sector seleccionado. De esta forma, puede ocurrir que en otra franja horaria sí existan más aeronaves convencionales por distintas aerovías y como consecuencia el estudio táctico sea más extenso.

10.3 Introducción de dos RPAS por UM601

En este apartado se va a analizar la viabilidad del plan de vuelo de dos RPAS introducidos en la misma aerovía con tráfico convencional, UM601, para el nivel de vuelo 280 y la franja horaria de 9:00 a 10:00. De esta forma, recorrerá ambos sectores LECMPAU y LECMZGZ.

10.3.1 Fase estratégica

Al igual que en el apartado anterior la fase estratégica muestra que la aerovía UM601 no es segregable para ningún corredor aéreo por lo tanto en un principio no se encuentra disponible para la introducción de RPAS. Es necesario analizar, por lo tanto, la fase pre-táctica y táctica para este caso.

Como se ha explicado es posible utilizar para vuelo horizontal los corredores aéreos correspondientes a la aerovía UN725 en el nivel de vuelo 270 y las aerovías UQ400 y UQ88 para los niveles de vuelo 260, 280 y 300.

10.3.2 Fase pre-táctica

En esta fase se van a analizar las distintas soluciones a las que pueden optar los RPAS teniendo en cuenta que la aerovía UM601 dispone de tráfico convencional de 9:00 a 10:00 por lo tanto es necesario un estudio táctico para estudiar su disponibilidad.

10.3.2.1 Primera solución: Elección aerovía alternativa

La primera solución tiene en cuenta la elección de una aerovía alternativa, sin embargo, no se va a considerar válida debido a que la única opción viable aumenta la distancia a recorrer teniendo que modificar la SID. En cualquier caso, se debería estudiar la viabilidad de esta teniendo en cuenta otros sectores adyacentes a LECMPAU.

Plan de vuelo no válido para RPAS 1 y RPAS 2 con cambio de aerovía para ambos sectores.

10.3.2.2 Segunda solución: Modificación del nivel de vuelo

La segunda solución plantea el cambio de nivel de vuelo para el RPAS 2 de manera que pueda utilizar la aerovía UM601 de 9:00h a 10:00h sin ningún conflicto. Se concluye que es válido el cambio de nivel a 250, 260, 270 y 290 en un principio. En el caso de que el RPAS 1 haya optado por la solución de cambio de nivel de vuelo al 270, quedarían disponibles los niveles 250, 260 y 290 para la introducción del RPAS 2. En la fase táctica se analiza el caso en el que coincidan ambos RPAS en el mismo nivel de vuelo y por tanto se han de determinar las ventanas de bloqueo correspondientes a cada uno.

Plan de vuelo válido para RPAS 1 y RPAS 2 en el caso de cambiar a niveles de vuelo distintos para ambos sectores.

10.3.2.3 Tercera solución: Modificación horaria

En cuanto a la última solución el RPAS 2 tendría la posibilidad de cambio de hora de operación a las franjas de 8:00 a 9:00 y de 10:00 a 11:00. En el caso de que el RPAS 1 haya optado por alguna de ambas franjas como solución, quedaría la otra franja disponible para el vuelo del RPAS 2 siendo válida esta solución.

En el caso de que ambos RPAS coincidan en la misma franja horaria se realiza un estudio táctico en el cual se determinan las ventanas de bloqueo aplicables a ambos RPAS.

Plan de vuelo válido para RPAS 1 y RPAS 2 en el caso de cambiar a franjas horarias distintas para ambos sectores.

10.3.3 Fase táctica

En el caso en que ambos RPAS opten a la misma solución, tanto cambio de nivel de vuelo como cambio en la franja horaria se tiene un escenario en el cual participan el RPAS 1 y el RPAS 2, ambos con velocidades 250 kts genéricas. Por lo tanto, es necesario mantener la distancia mínima de seguridad de 5 MN, teniendo así una ventana de bloqueo dada por la Ecuación 14.

$$Ventana\ de\ bloqueo = \frac{5\ NM}{V_{RPAS}} = 73\ seg \quad (14)$$

Tanto si el RPAS 1 accede antes al sector LECMPAU que el RPAS 2 como el caso contrario ambos deberán generar una ventana de bloqueo de 73 segundos para evitar cualquier tipo de conflicto y asegurar la separación mínima de 5 MN.

En el caso de preferir la franja horaria inicial, sin elegir ninguna solución posible, es preciso realizar un estudio táctico en el que se tiene en cuenta la aeronave, el RPAS 1 y el RPAS 2 para el cálculo de las ventanas de bloqueo correspondientes.

- **La aeronave accede antes al sector LECMPAU que RPAS 1 y RPAS 2.**

En este caso la aeronave genera una ventana de bloqueo de 45 segundos al siguiente RPAS 1 generando éste una ventana de bloqueo de 73 segundos al RPAS 2. En la Tabla 60 se presentan las horas de entrada y salida por ambos sectores cumpliendo con las ventanas determinadas para la primera configuración.

Tabla 60: Horas de entrada y salida a los distintos sectores para el Caso 1.

<i>FL280</i>	<i>Hora de entrada LECMPAU</i>	<i>Hora de entrada LECMZGZ</i>	<i>Hora de salida LECMZGZ</i>
Aeronave (UM601)	09:29:30	09:39:38	09:46:02
RPAS 1 (UM601)	09:30:15	09:46:31	09:57:24
RPAS 2 (UM601)	09:31:28	09:47:44	09:58:37

Planes de vuelo válidos para RPAS 1 y RPAS 2 cumpliendo las horas de la Tabla 33 para ambos sectores.

- **El RPAS 1 accede antes al sector seguido de la aeronave y del RPAS 2**

En el caso de que acceda antes al sector el RPAS 1 seguido de la aeronave y del RPAS 2, el primer RPAS generará una ventana de bloqueo sobre la aeronave de 566 segundos mientras que la aeronave generará una de 45 segundos sobre el siguiente RPAS. En la Tabla 61 se muestran las horas de entrada y salida por los sectores LEMCPAU y LECMZGZ para la segunda configuración.

Tabla 61: Horas de entrada y salida a los distintos sectores para el Caso 2.

<i>FL280</i>	<i>Hora de entrada LECMPAU</i>	<i>Hora de entrada LECMZGZ</i>	<i>Hora de salida LECMZGZ</i>
Aeronave	09:29:30	09:39:38	09:46:02
RPAS 1	09:09:27	09:25:43	09:36:36
RPAS 2	09:30:15	09:46:31	09:57:24

Planes de vuelo válidos para RPAS 1 y RPAS 2 cumpliendo las horas de la Tabla 34 para ambos sectores.

- *El RPAS 1 accede antes al sector seguido del RPAS 2 y de la aeronave*

Por último, si acceden al sector ambos RPAS antes que la aeronave, un RPAS sobre el otro generará una ventana de bloqueo de 73 segundos mientras que sobre la aeronave será de 566 segundos. En la Tabla 62 se presentan las horas de entrada y salida en ambos sectores para esta última configuración.

Como se puede comprobar la tercera configuración en la que ambos RPAS acceden al sector antes que la aeronave, es decir, antes de las 09:29:30, es la que proporciona un tiempo de bloqueo mayor. Esto se debe a las velocidades de los RPAS menores que la de la aeronave y a la problemática que supone si les alcanzase, de esta forma para mantener las 5 MN de separación entre los tres se han de cumplir tiempos de bloqueo muy altos.

Tabla 62: Horas de entrada y salida a los distintos sectores para el Caso 3.

<i>FL280</i>	<i>Hora de entrada LECMPAU</i>	<i>Hora de entrada LECMZGZ</i>	<i>Hora de salida LECMZGZ</i>
Aeronave	09:29:30	09:39:38	09:46:02
RPAS 1	09:08:14	09:24:30	09:35:23
RPAS 2	09:09:27	09:25:43	09:36:36

Planes de vuelo válidos para RPAS 1 y RPAS 2 cumpliendo las horas de la Tabla 35 para ambos sectores.

10.4 Introducción de un RPAS por UM601 y otro por UN869

En este caso concreto el sector LECMPAU no se va a ver afectado por la introducción de un RPAS en la aerovía UN869 ya que ésta pertenece al sector LECMZGZ. Por lo tanto, para éste la configuración será la misma que en el primer caso en el que se tendrán un RPAS y una aeronave por la misma aerovía, UM601. No obstante, el sector LECMZGZ cambiarán las distintas opciones para la posible introducción de RPAS. De acuerdo con la información disponible, la hora de entrada de la aeronave en LECMZGZ siendo las 09:39:38.

Plan de vuelo no válido para RPAS 2 con cambio de aerovía a UQ53 o UN869 para el sector LECMZGZ.

10.4.2.2 Segunda solución: Modificación del nivel de vuelo

La solución de cambio de nivel de vuelo es válida en LECMZGZ para los niveles 250, 260, 270 o 290 los cuales se encuentran libres para el vuelo a lo largo de esa hora. En el caso de que el RPAS 1 también haya optado por un cambio de nivel de vuelo y ambos coincidan se debe analizar en la fase táctica.

Plan de vuelo válido para RPAS 2 en el caso de cambiar a nivel de vuelo distintos que el RPAS 1 para el sector LECMZGZ.

10.4.2.3 Tercera solución: Modificación horaria

La solución de cambio de hora de operación se encuentra disponible en el sector LECMZGZ para el cambio de hora de 8:00h a 9:00h o de 10:00h a 11:00h. En el caso de que coincida en alguno de los cambios con el RPAS 1 se debe analizar la fase táctica.

Plan de vuelo válido para RPAS 2 en el caso de cambiar a franja horaria distinta que el RPAS 1 para el sector LECMZGZ.

10.4.3 Fase táctica

En el caso de coincidir con el cambio realizado por el RPAS 1 se deberían tener en cuenta el estudio táctico que involucre a ambos RPAS. A continuación, en la Tabla 63 se presentan las ventanas de bloqueo que generan ambos RPAS a lo largo de su vuelo por el sector LECMZGZ.

Tabla 63: Ventanas de bloqueo (seg) para dos RPAS en un mismo nivel de vuelo en el sector LECMZGZ

<i>Aerovía</i>	<i>RPAS 1</i>	<i>RPAS 2</i>
RPAS 1 (UM601)	-	288
RPAS 2 (UN869)	288	-

A modo de ejemplo, se supone que ambos RPAS han elegido la opción de cambio de nivel de vuelo al 270. A lo largo del sector LECMPAU el RPAS 1 no tendrá ningún conflicto en este nivel, sabiendo que su velocidad es de 250 kts y la distancia recorrida será de 67.1 MN por la aerovía UM601 tardará 976 segundos en recorrer LECMPAU.

En cambio, en el sector LECMZGZ sí deberán tenerse en cuenta las ventanas de bloqueo calculadas en la Tabla 35. Introduciendo las variables en la herramienta RIT de Matlab®, se obtienen las ventanas reales en la Tabla 64 que muestran si se vulneran éstas en función de la hora de entrada.

Tabla 64: Ventanas de bloqueo para las horas de entrada a LECMZGZ elegidas

<i>FL270</i>	<i>RPAS 1</i>	<i>RPAS 2</i>
RPAS 1 (UM601)	-	[09:17:25, 09:22:13]
RPAS 2 (UN869)	[09:21:07, 09:26:55]	-
Hora de entrada	09:20:00	09:23:20

Suponiendo que la hora de entrada del RPAS 1 es las 09:20:00h y del RPAS 2 es las 09:23:20h en LECMZGZ en el nivel 270 ninguno de los dos vulnera las ventanas de bloqueo reales. Por lo tanto, el RPAS 1 entra en el sector LECMPAU a las 09:03:44 ya que tarda en recorrerlo 976 segundos.

De esta forma en la Tabla 65 se presentan las horas de entrada y salida de ambos RPAS en los sectores LECMPAU y LECMZGZ en el caso de cambio de nivel de vuelo al 270.

Tabla 65: Horas de entrada de ambos RPAS para posibles planes de vuelo válidos

<i>FL270</i>	<i>Hora de entrada LECMPAU</i>	<i>Hora de entrada LECMZGZ</i>	<i>Hora de salida LECMZGZ</i>
RPAS 1 (UM601)	09:03:44	09:20:00	09:30:53
RPAS 2 (UN869)		09:23:20	09:37:46

Planes de vuelo válidos para RPAS 1 y RPAS 2 cumpliendo las horas en la Tabla 37 con cambio de nivel de vuelo.

En el caso de no aceptar el cambio de franja horaria ni de nivel de vuelo, es necesario realizar un estudio táctico en el que se tenga en cuenta la aeronave convencional que pasa a lo largo de la franja de 9:00 a 10:00 por el nivel 280 y por la aerovía UM601. Se tiene el RPAS 1 por la misma aerovía que la aeronave y se quiere introducir el RPAS 2 por la aerovía UN869 en el sector LECMZGZ.

En la Tabla 66 se obtienen las ventanas de tiempo que se generan con los respectivos indicadores de disponibilidad de aerovía.

Tabla 66: Ventanas de bloqueo (seg) para dos RPAS y una aeronave para el nivel de vuelo 280 en el sector LECMZGZ

<i>FL280</i>	<i>Aeronave</i>	<i>RPAS 1</i>	<i>RPAS 2</i>
Aeronave (UM601)	-	45	232
RPAS 1 (UM601)	566	-	288
RPAS 2 (UN869)	232	288	-

A continuación, mediante la herramienta RIT de Matlab®, se obtienen las ventanas de bloqueo reales según las horas de entrada. Se distinguen dos casos diferentes, si la aeronave accede antes al sector LECMPAU y por tanto a LECMZGZ o si por el contrario lo hace el RPAS 1.

- **La aeronave accede al sector LECMPAU antes que el RPAS 1**

En este caso la aeronave genera una ventana de bloqueo sobre el RPAS 1 de 45 segundos para asegurar la separación de 5 MN en todo momento. Por lo tanto, se respetarán las horas de entrada respectivamente para que se cumpla esta condición. En cuanto al RPAS 2 en el caso de entrar en el sector LECMZGZ a las 09:43:20h respeta las ventanas de bloqueo generadas sobre él.

Como se comprueba en la Tabla 67 cumpliendo las ventanas de bloqueo, las horas de entrada escogidas son válidas por lo tanto se puede considerar que los planes de vuelo de ambos RPAS serían válidos.

Tabla 67: Ventanas de bloqueo para las horas de entrada a LECMZGZ para ambos RPAS y la aeronave en el Caso 1

<i>FL280</i>	<i>Aeronave</i>	<i>RPAS 1</i>	<i>RPAS 2</i>
Aeronave (UM601)	-	-	[09:34:42, 09:38:34]
RPAS 1 (UM601)	-	-	[09:44:06,09:48:54]
RPAS 2 (UN869)	[09:44:24,09:48:19]	[09:41:07, 09:45:55]	-
Hora de entrada	09:39:38	09:46:31	09:43:20

En la Tabla 68 se presentan las horas de entrada y salida de ambos RPAS en los sectores LECMPAU y LECMZGZ para el caso tratado.

Tabla 68: Horas de entrada de ambos RPAS y aeronave para posibles planes de vuelo válidos de RPAS en el Caso 1

<i>FL280</i>	<i>Hora de entrada LECMPAU</i>	<i>Hora de entrada LECMZGZ</i>	<i>Hora de salida LECMZGZ</i>
Aeronave (UM601)	09:29:30	09:39:38	09:46:02
RPAS 1 (UM601)	09:30:15	09:46:31	09:57:24
RPAS 2 (UN869)		09:43:20	09:57:46

Planes de vuelo válidos para RPAS 1 y RPAS 2 cumpliendo las horas de la Tabla 40 en el Caso 1.

- **El RPAS 1 accede antes al sector LECMPAU que la aeronave**

En este caso el RPAS 1 genera una ventana de bloqueo sobre la aeronave de tamaño mucho mayor al caso anterior, siendo ésta de 566 segundos. Esta ventana asegura la separación de 5 MN entre ambos a lo largo de su recorrido por la aerovía UM601.

Para asegurar que el RPAS 2 cumpla con las ventanas de bloqueo se calculan éstas para la hora de entrada de las 09:33:20h. Las horas escogidas para ambos RPAS son válidas ya que no vulneran las ventanas de bloqueo reales calculadas como se comprueba en la Tabla 69.

Tabla 69: Tiempos de bloqueo respecto a las horas de estudio para ambos RPAS y la aeronave en el Caso 2

<i>FL280</i>	<i>Aeronave</i>	<i>RPAS 1</i>	<i>RPAS 2</i>
Aeronave (UM601)	-	-	[09:34:42, 09:38:34]
RPAS 1 (UM601)	-	-	[09:23:08, 09:27:56]
RPAS 2 (UN869)	[09:34:24, 09:38:16]	[09:31:07, 09:35:55]	-
Hora de entrada	09:39:38	09:25:43	09:33:20

Por último, en la Tabla 70 se presentan las horas de entrada y salida en ambos sectores para este último caso.

Tabla 70: Horas de entrada de ambos RPAS y aeronave para posibles planes de vuelo válidos de RPAS en el Caso 2

<i>FL280</i>	<i>Hora de entrada LECMPAU</i>	<i>Hora de entrada LECMZGZ</i>	<i>Hora de salida LECMZGZ</i>
Aeronave (UM601)	09:29:30	09:39:38	09:46:02
RPAS 1 (UM601)	09:09:27	09:25:43	09:36:36
RPAS 2 (UN869)		09:33:20	09:47:46

Planes de vuelo válidos para RPAS 1 y RPAS 2 cumpliendo las horas de la Tabla 42 en el Caso 2.



HOJA DEJADA INTENCIONADAMENTE EN BLANCO

11 CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

Este documento recoge la línea de investigación realizada durante el año 2019 dentro del proyecto de investigación “Análisis del riesgo entre RPAS y aeronaves convencionales en un espacio aéreo no segregado” bajo el OIATM (Observatorio para el fomento del I+D en ATM) desarrollado por la UPM y promovido por ISDEFE.

En el año 2019 la línea de investigación se ha centrado en realizar dos estudios complementarios. El primero de ellos ha sido cuantificar el número de RPAS que pueden operar en un volumen del espacio aéreo junto a aeronaves convencionales sin exceder un TLS. El segundo estudio ha evaluado el actual proceso de encaminamiento de planes de vuelo para desarrollar una metodología aplicable a los planes de vuelo de RPAS. De este modo, mediante la combinación de ambas técnicas se puede determinar las relaciones funcionales entre el NM y el operador de RPAS que permite integrar a los RPAS de una manera segura sin exceder los actuales niveles de seguridad.

Por lo tanto, ha sido desarrollada una metodología que permite determinar un TLS en función de características físicas y operativas con el cual limitar la libre introducción de RPAS. Se ha precisado de manera cuantitativa el número de aeronaves, convencionales o RPAS, que pueden desarrollar con seguridad sus operaciones en el espacio aéreo. Para ello ha sido necesaria la optimización de la herramienta RIT a través de la programación de nuevos módulos con los cuales obtener los indicadores de seguridad. La cuantificación del número de RPAS que pueden introducirse de manera segura ha sido realizada mediante la técnica de simulaciones de Monte Carlo. Esta técnica permite introducir distribuciones probabilísticas a las variables de control para analizar el impacto de su incertidumbre. De esta forma se ha podido comparar distintos escenarios variando el número de RPAS y el número de aeronaves convencionales para determinar si el nivel de riesgo asociado a cada caso excede o no el TLS. Los principales resultados obtenidos han sido:

- El indicador del número de conflictos alcanza sus valores más altos cuantas más aeronaves convencionales o RPAS integren una programación de aeronaves, siendo común para todos los indicadores. La representación gráfica de su evolución es exponencial para todas las series con número de aeronaves constante (igualmente, común). El número de conflictos detectados es un 25% inferior en las simulaciones de Monte Carlo reales frente a las simulaciones aleatorias en LECMZGZ.
- El indicador de tiempo de exposición es un 40% inferior en las simulaciones de Monte Carlo reales respecto a sus homólogas aleatorias. Esto es consecuencia de la utilización de un grupo más reducido de aerovías por parte de las aeronaves convencionales según las distribuciones de tráfico real.
- El indicador de tiempo medio de duración de conflictos disminuye un 20% en las simulaciones de Monte Carlo reales frente a los casos aleatorios. En cualquiera de las configuraciones de aeronaves convencionales y RPAS aleatorios nunca se superan los cuatro minutos de duración de conflicto, de media. En las simulaciones reales, este tiempo se reduce hasta menos de tres minutos.
- La relación entre los indicadores de tiempo expresa el porcentaje de tiempo en el cual una aeronave se encuentra sufriendo un conflicto de su posible tiempo de exposición. En ambos grupos de simulaciones se ha identificado un valor de alrededor del 3% al respecto de esta relación. Su evolución presenta, en contra del resto de tendencias, una apariencia convergente hacia este valor. En las simulaciones de Monte Carlo reales, cuando no se involucran RPAS en

la programación, la relación llega hasta un valor de 0,1 al seguir las aeronaves convencionales distribuciones de tráfico reales. Esto disminuye su exposición en los puntos de cruce, aumentando la relación τ_{con} / τ_{exp} .

- En el caso de considerar simulaciones aleatorias de aeronaves convencionales y RPAS el número máximo de RPAS sin aeronaves convencionales es de 2 (siendo el máximo de aeronaves convencionales 4) y aquellas combinaciones de RPAS y aeronaves convencionales en las que el número total de aeronaves es 3. En cambio, en el caso de considerar distribuciones de tráfico reales, el número máximo de RPAS es de 1 (disminuye un 50%) y únicamente se permite la combinación de una aeronave convencional y un RPAS. Esto implica que la introducción de RPAS no se puede permitir de una manera libre a los operadores, sino que requiere la definición de aerovías y corredores aéreos que minimicen el impacto sobre la seguridad operacional.

Pese a que este análisis posibilita conocer cuántos RPAS introducir en el espacio aéreo, sus operaciones se desarrollan estabilizadas en el mismo nivel de vuelo. No se han considerado, de esta manera, ascensos o descensos propios o bien del tráfico circundante. Igualmente, tampoco han sido tenidas en cuenta trayectorias 4D en la segregación de RPAS por las aerovías.

Por otro lado, se ha desarrollado una metodología que permite conectar al operador aéreo con el proveedor de servicios de navegación aérea o el gestor del servicio ATFCM de tal forma que sea posible informar y determinar las restricciones operativas geográficas y temporales a la integración segura de RPAS en espacios aéreos no segregados. De esta forma, se han definido las relaciones funcionales y las comunicaciones necesarias entre el operador RPAS y el NM para validar los planes de vuelo en función de los horizontes temporales: estratégico, pre-táctico y táctico. Se han desarrollado tres casos de estudio prácticos en los que se ha considerado la integración de uno o dos RPAS en los espacios aéreos LECMPAU y LECMZGZ afectados por un plan de vuelo de RPAS entre los aeropuertos de Bilbao y Barcelona. Los principales resultados que se han obtenido para el proceso de encaminamiento de planes de vuelo son:

- Se ha aplicado la metodología a tres casos de estudio en los que se ha introducido hasta dos RPAS por las aerovías UM601 y UN869 de los sectores LECMPAU y LECMZGZ. En este apartado se ha elegido un vuelo convencional de referencia y el tráfico de ambos sectores en un día tipo.
- Se han propuesto en la fase pre-táctica distintas soluciones que el proveedor de servicios de navegación aérea ofrecería al operador de manera que pudiese realizar el vuelo de RPAS sin riesgo alguno. Estas medidas han sido modificar la ruta, modificar la hora de entrada en los sectores o bien cambiar el nivel de vuelo de crucero propuesto para que no tenga interacciones con otras aeronaves convencionales.
- Por último, en el caso de que el operador no quisiera cambiar su plan de vuelo, sería necesario determinar las restricciones temporales aplicables durante la fase táctica. Este proceso consiste en determinar las ventanas temporales en las que no debería entrar el RPAS en el espacio aéreo puesto que existiría riesgo de sufrir un conflicto con las aeronaves convencionales programadas.

El objetivo en el futuro es la aplicación de la metodología a otros sectores del espacio aéreo. Analizar casos de aeronaves en evolución estudiando ascensos y descensos de éstas. Crear un software para la herramienta RIT que permita al operador visualizar las distintas posibilidades para el vuelo de RPAS. Además, todo el trabajo realizado se ha centrado en la fase de ruta, por lo que el estudio de la integración



de RPAS en el espacio aéreo terminal puede requerir de un análisis y desarrollo diferente debido a las características operativas propias del mismo.



HOJA DEJADA INTENCIONADAMENTE EN BLANCO

12 PUBLICACIONES

Este proyecto ha permitido la publicación de distintas partes del mismo tanto en revistas indexadas como en congresos nacionales e internacionales.

Los artículos publicados en revistas a partir del trabajo realizado en el año 2019 son los siguientes:

- Pérez-Castán et al. Safe RPAS integration in non-segregated airspace. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, online published, 2020. DOI: 10.1108/AEAT-11-2019-0224.
- Pérez-Castán et al. How many RPAS can be safely integrated in non-segregated airspace? MATEC Web of Conferences, Vol. 54, 2019. DOI: 10.1051/mateconf/201930405003.
- Pérez-Castán et al. RPAS integration in non-segregated airspace: Safety metrics for tactical planning. Proceedings of the institution of mechanical engineers part G-Journal of aerospace engineering, Vol. 223, pp. 6063-6075. 2019. DOI: 10.1177/0954410019831198.

Las conferencias que han tenido lugar en función de su orden de publicación son las siguientes:

- Pérez-Castán et al. How many RPAS can be safely integrated in non-segregated airspace? 9th EASN International Conference on Innovation in Aviation & Space. Athens (Greece) 2019.

En los Anexos D, E, F y G se muestran los textos publicados para las anteriores publicaciones.



HOJA DEJADA INTENCIONADAMENTE EN BLANCO

13 BIBLIOGRAFÍA

- Brooker, P. (2002). Future air traffic management: Quantitative en route safety assessment part 2 - New approaches. *Journal of Navigation*.
- Brooker, P. (2011). Air traffic control separation minima: Part 1 - The current stasis. *Journal of Navigation*.
- Brooker, P. (2011). Air traffic control separation minima: Part 2 - Transition to a trajectory-based system. *Journal of Navigation*.
- Cabral, T., Duarte, D., Caetano, J., Place, S., & Mcharthy, P. (2019). Unmanned Aircraft Systems Risk Assessment: Review of Existing Tools and New Results. *STO Specialists Meeting IST 166*.
- EASA. (2006). *Comission Regulation EC 1033/2006*.
- Enaire. (2017). *Circular aeronáutica nacional*.
- Enaire. (2017). *ENR 1.10-1*.
- ENAIRES. (2019). *AIP AMDT 311/19*.
- Endoh, S. (1982). *Aircraft collision models*. MIT.
- EUROCONTROL. (2017). *NEST Modelling Tool*.
- EUROCONTROL. (2018). *IFPS Users Manual*.
- Ferreira, R., Baum, D., Neto, E., Martins, M., Almeida, J., & Cugnasca, P. (2018). A Risk Analysis of Unmanned Aircraft Systems (UAS) Integration into non-Segregate Airspace. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS*.
- Fulton, N., Westcott, M., & Emery, S. (2009). Decision support for risk assessment of mid-air collisions via population-based measures. *Transportation Research Part A: Policy Practices*.
- <https://www.public.nm.eurocontrol.int/PUBPORTAL/gateway/spec/>. (s.f.).
- ICAO. (1998). *Manual on Airspace Planning Methodology for the Determination of Separation Minima*.
- Jenie, Y., Van Kampen, E., Ellerbroek, J., & Hoekstra, J. (2018). Safety assessment of a UAV CDR system in high density airspace using monte carlo simulations. *IEEE Trans Intelligent Transportation Systems*.
- Jenie, Y., Van Kampen, E.-J., Ellerbroek, J., & Hoekstra, J. (2016). Safety Assessment of Unmanned Aerial Vehicle Operations in an Integrated Airspace. *AIAA Infotech @ Aerospace*.
- Ministerio de Fomento, A. (2018). *PROCEDIMIENTO DE SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN PARA REALIZAR OPERACIONES AÉREAS*.
- Ministerio de Fomento, A. (2018). *Guía de coordinación con terceros en función del lugar de operación para operaciones aéreas especializadas o vuelos experimentales*.
- Netjasov, F. (2012). Framework for airspace planning and design based on conflict risk assessment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 24, 190-212.
- Netjasov, F., & Janic, M. (2008). A review of research on risk and safety modelling in civil aviation. *Journal of Air Transport Management*, 14(4), 213-220.

- Pérez-Castán, J. A., Gómez Comendador, F., Rodríguez-Sanz, A., Arnaldo Valdés, R., & Torrecilla, J. (2018). Conflict-resolution algorithms for RPAS in non-segregated airspace. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*.
- Pérez-Castán, J., Gómez Comenador, F., Rodríguez-Sanz, A., Armas Cabrera, I., & Torrecilla, J. (2019). RPAS conflict-risk assessment in non-segregated airspace. (ELSEVIER, Ed.) *Safety Science*, 111(Marzo), 7-16.
- Presidencia, M. d. (2014). *Real Decreto 552*.
- Presidencia, M. d. (2017). *Real Decreto 1036*.
- Rubio-Hervas, J., Gupta, A., & Ong, Y. (2018). Data-driven risk assessment and multicriteria optimization of UAV operations. *Aerospace Science Technology*.
- SATAA. (2018). *Entregable 5: Desarrollo de un marco metodológico de evaluación de riesgo para la integración de RPAS*.
- SATAA. (2018). *Entregable 6: Integración de RPAS en fase de Diseño del espacio aéreo: Desarrollo de una Herramienta para la integración de RPAS (RIT) en un escenario de ruta*.
- SATAA. (2019). *Entregable 8: Análisis dinámico sobre la disponibilidad del espacio aéreo y aplicación de la fase táctica para la integración de RPAS en un escenario de ruta*.
- Sunil, E., Ellerbroek, J., Hoekstra, J., & Maas, J. (2018). Three-dimensional conflict count models for unstructured and layered airspace designs. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*.

ANEXO A. HISTOGRAMAS DE CONFLICTOS EN LAS SIMULACIONES DE MONTE CARLO ALEATORIAS

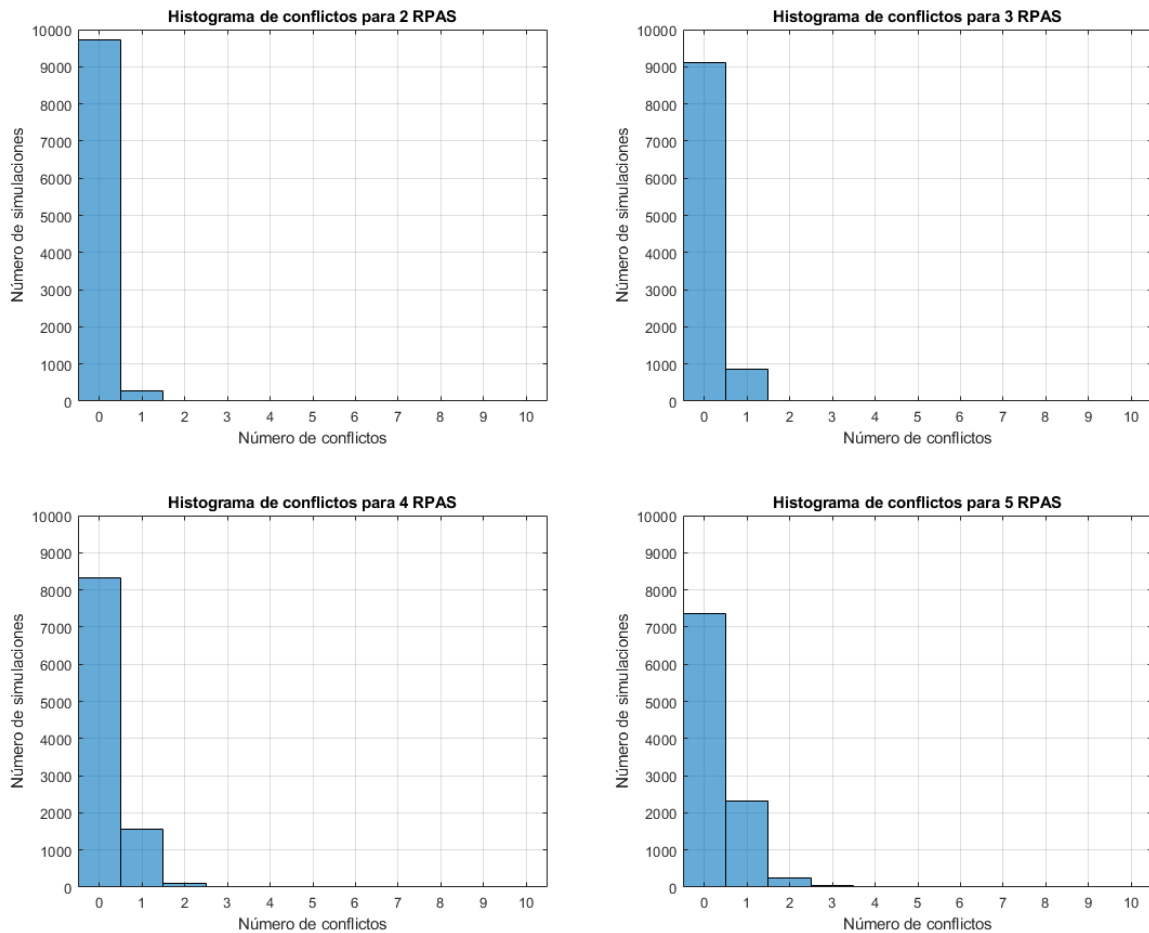


Ilustración 66. Histogramas de conflictos para 0 aeronaves convencionales aleatorias.

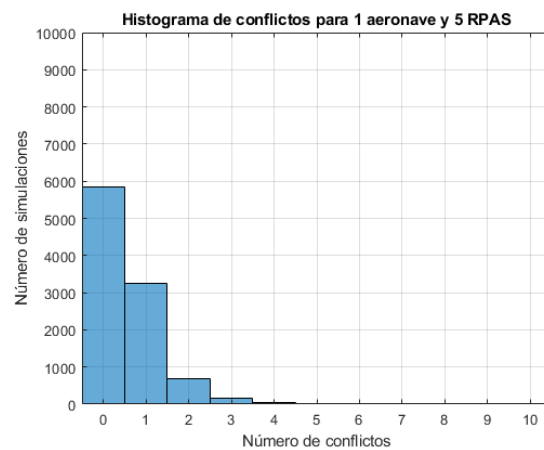
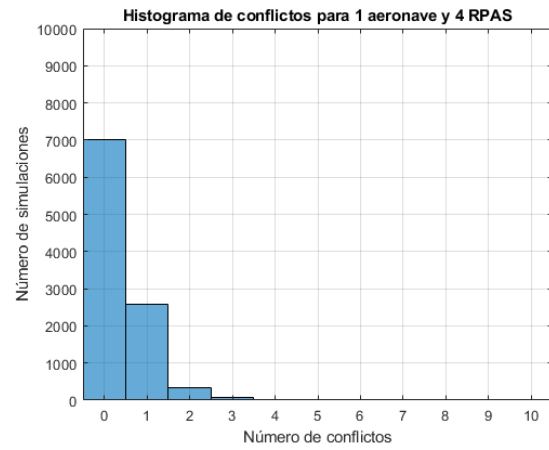
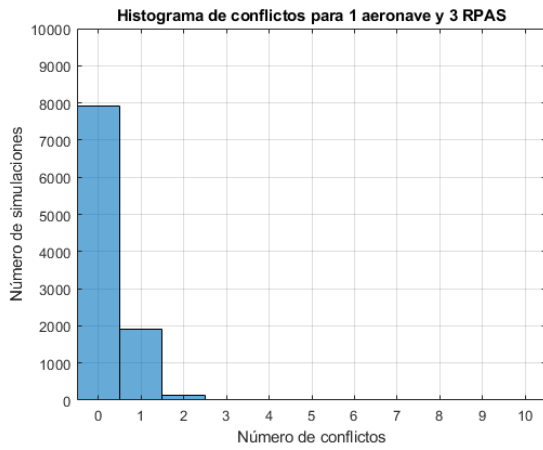
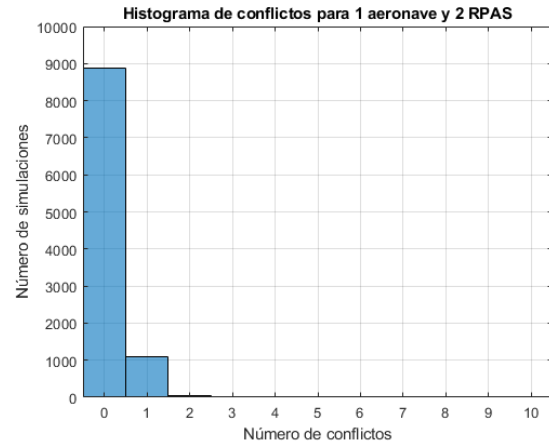
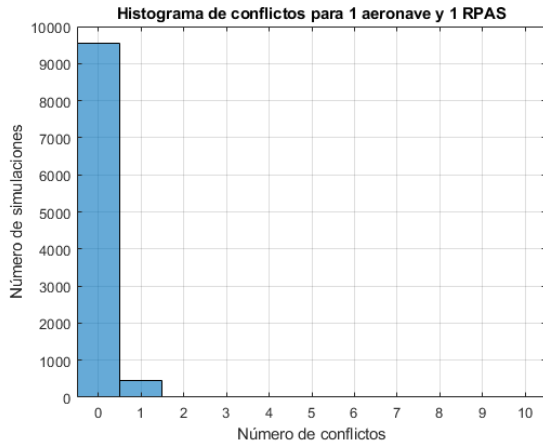


Ilustración 67. Histogramas de conflictos para 1 aeronave convencional aleatoria.

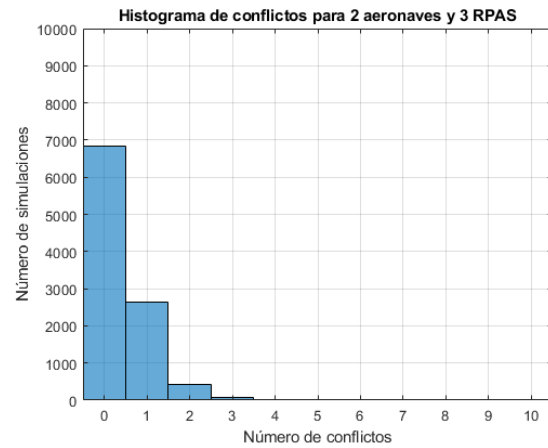
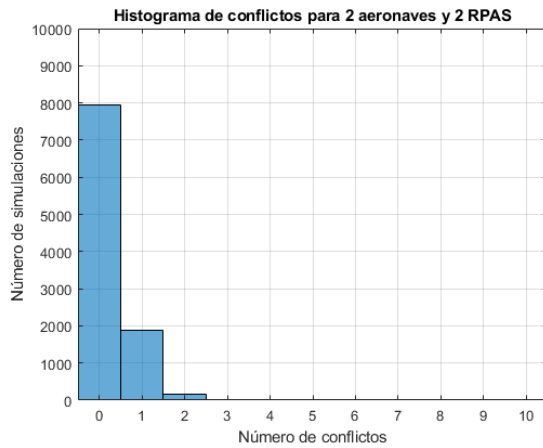
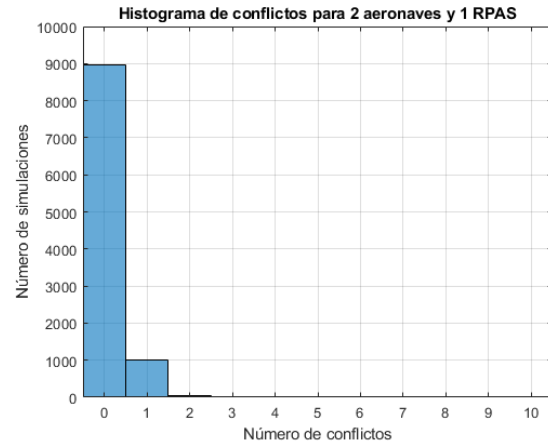
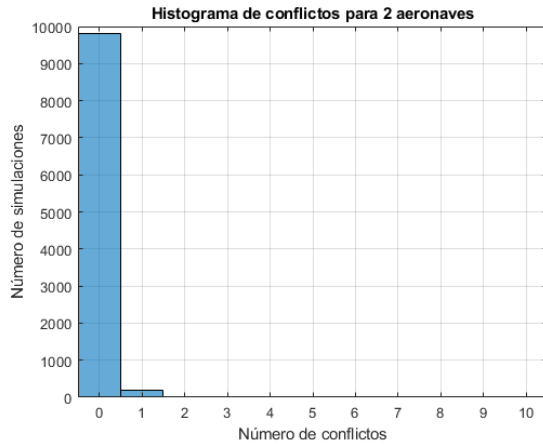


Ilustración 68. Histogramas de conflictos para 2 aeronaves convencionales aleatorias.

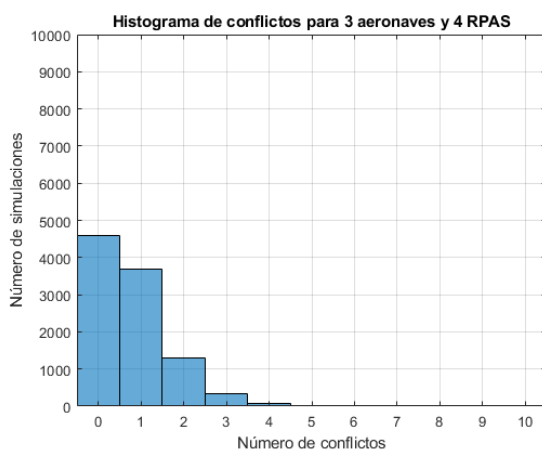
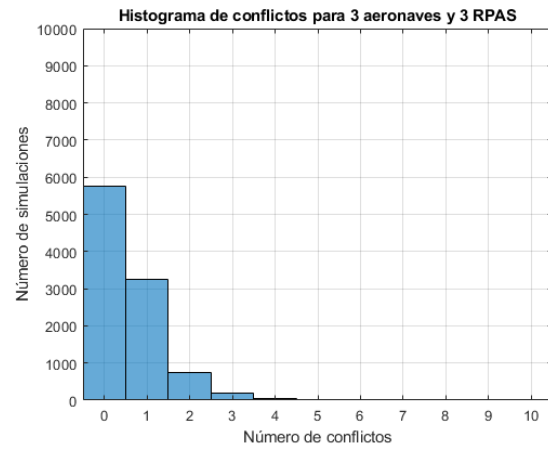
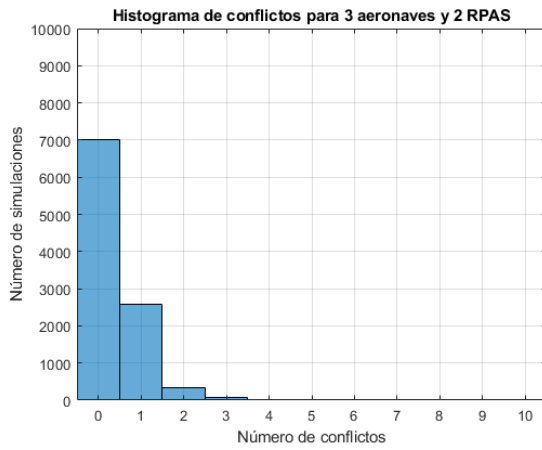
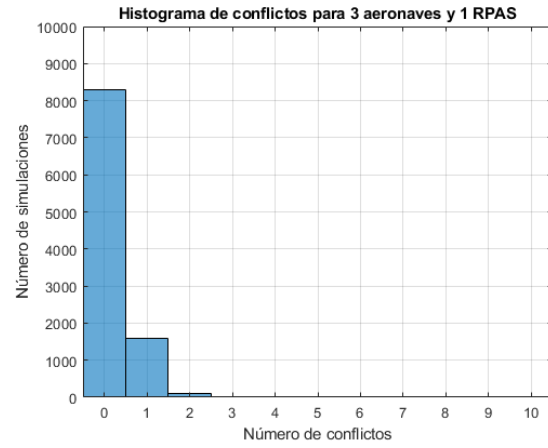
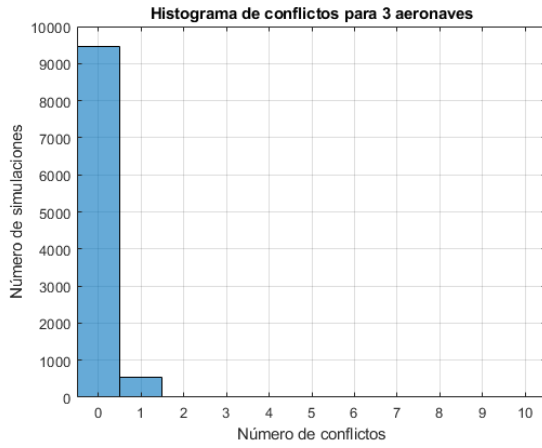


Ilustración 69. Histogramas de conflictos para 3 aeronaves convencionales aleatorias.

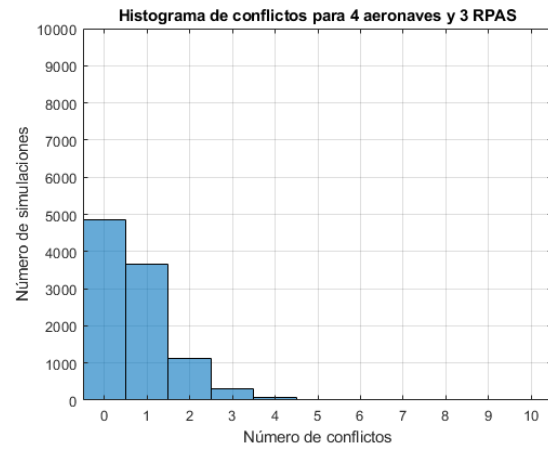
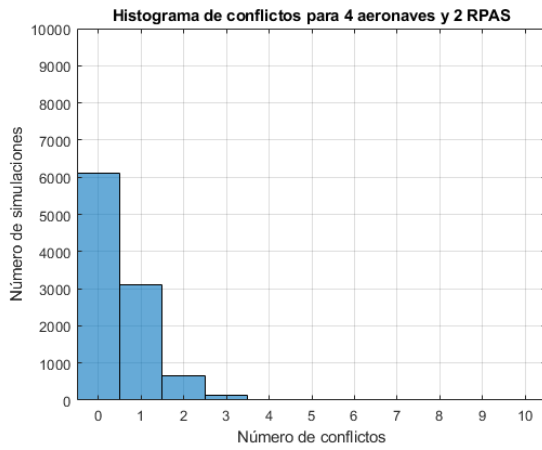
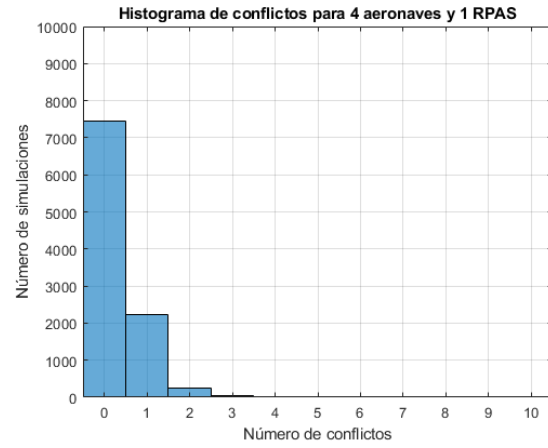
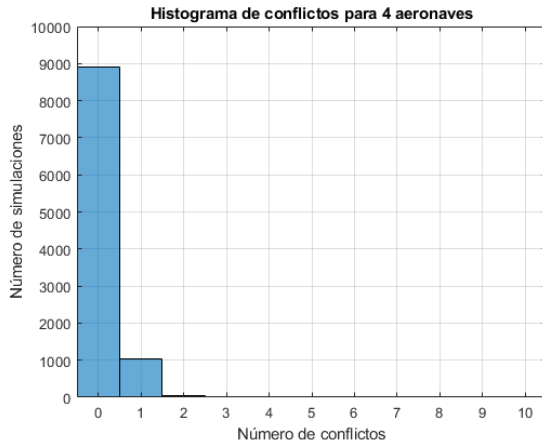


Ilustración 70. Histogramas de conflictos para 4 aeronaves convencionales aleatorias.

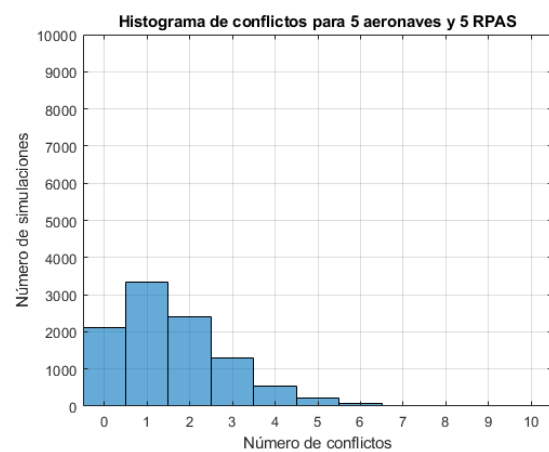
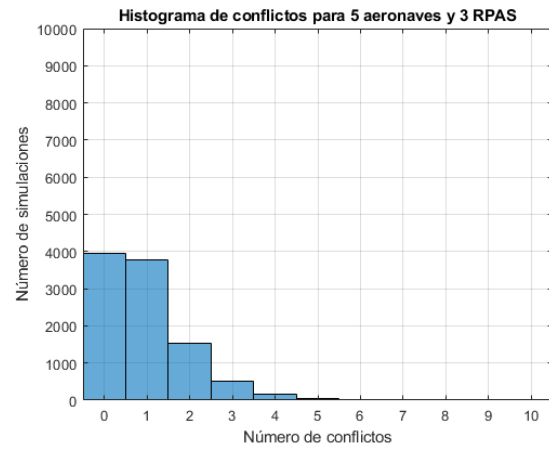
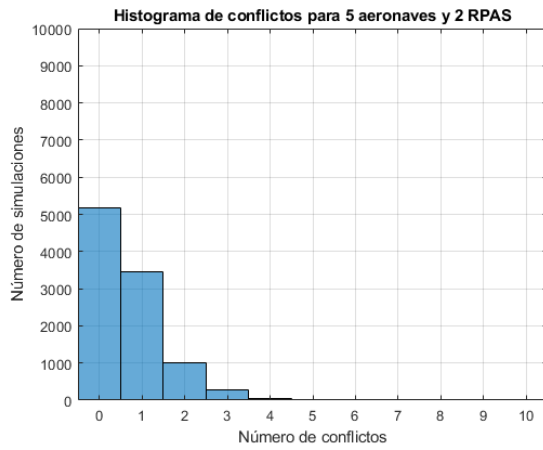
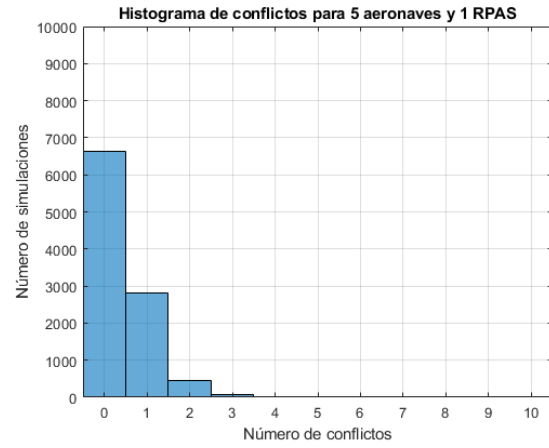
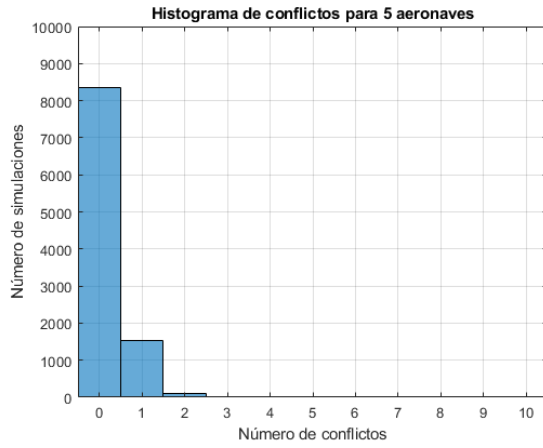


Ilustración 71. Histogramas de conflictos para 5 aeronaves convencionales aleatorias.

ANEXO B. CÁLCULO DE $\overline{\tau_{con}}$ EN LAS SIMULACIONES DE MONTE CARLO ALEATORIAS

Es posible comparar, en un supuesto ideal donde la programación estuviese conformada exclusivamente por RPAS, la afición de introducir una aeronave convencional sobre esa configuración. Este supone el caso inverso a lo mostrado en la última tabla donde la referencia eran las aeronaves convencionales. De este modo, desde un número inicial de dos RPAS se va a introducir una aeronave convencional y comparar la relación entre resultados hasta llegar a cinco RPAS (más la consiguiente aeronave convencional). Los datos hallados en la relación entre tiempos medios de duración al introducir una aeronave convencional sobre programaciones íntegramente configuradas por RPAS se muestran a continuación en la Tabla 71.

Tabla 71. Relación entre $\overline{\tau_{con}}$ cuando se introduce una aeronave convencional en programaciones exclusivamente conformadas por RPAS.

Nº Conv.	Nº RPAS	$\overline{\tau_{con}}$ (s)	Relación entre tiempos de duración
0	2	7,6599	2,272
1	2	17,4002	
0	3	25,7778	1,629
1	3	41,9930	
0	4	51,5670	1,348
1	4	69,5251	
0	5	84,7879	1,259
1	5	106,7457	

El aumento en los tiempos de conflicto es, relativamente, mucho menor cuando se añade una aeronave convencional que cuando lo hace un RPAS. De esta manera, introducir sobre un tráfico de dos RPAS una aeronave convencional implica una relación algo superior a duplicar el tiempo de duración total de los conflictos. Comparativamente, este valor es inferior al aumento producido por añadir una aeronave convencional sobre otras dos aeronaves convencionales. De igual manera, también resulta más inferior incluso al aumento producido por incluir un RPAS sobre una programación de dos aeronaves convencionales. Conforme más se aleja la paridad entre el número de RPAS y aeronaves convencionales, menor resulta el aumento en los tiempos de conflicto. En último término, si se añadiese una aeronave convencional sobre una programación original de cinco RPAS, ello implicaría sólo un 25%

más de tiempo de conflicto en contraste con el casi 90% del caso inverso (ver las dos últimas filas de la Tabla 25).

Continuando con este caso de estudio, puede evaluarse la influencia de añadir nuevos RPAS sobre programaciones originales integradas sólo por RPAS. Este análisis supone el complemento al realizado anteriormente y por el cual se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 24, aunque efectuado para configuraciones exclusivas de aeronaves convencionales. Así pues, la relación entre $\overline{\tau_{con}}$ cuando se añade un RPAS a una programación libre de aeronaves convencionales es el recogido en la Tabla 72.

Tabla 72. Relación entre $\overline{\tau_{con}}$ cuando se introduce sucesivamente un RPAS frente a 0 aeronaves convencionales.

Nº Conv.	Nº RPAS	$\overline{\tau_{con}}$ (s)	Relación entre tiempos de duración
0	2	7,6599	3,365
0	3	25,7778	
0	3	25,7778	2,000
0	4	51,5670	
0	4	51,5670	1,644
0	5	84,7879	

Introducir un RPAS en una programación inicialmente ya constituida por otros RPAS supone una afección menor a hacerlo en una programación de aeronaves convencionales. Ello puede ser justificado por la diferencia de velocidades de operación de los distintos tipos de aeronaves dentro del espacio aéreo. Sin embargo, añadir RPAS sobre otros RPAS sí implica un aumento en la relación entre tiempos de conflicto frente a si se añadiesen aeronaves convencionales sobre aeronaves convencionales.

De aquí en adelante, el estudio se realiza para configuraciones mixtas de aeronaves convencionales y RPAS. En la actualidad, todavía no se ha producido la integración en espacios aéreos no segregados de estos últimos. Por tanto, aquello que se busca es contrastar la coherencia de los datos obtenidos hasta el momento para programaciones con exclusivamente un tipo concreto de aeronaves (bien convencionales, o bien RPAS). De este modo, si en el espacio aéreo existiese tráfico conjunto de aeronaves convencionales y un RPAS, las relaciones entre tiempos de duración de conflicto al introducir sucesivamente aeronaves convencionales sería la expresada en la Tabla 73.

Tabla 73. Relación entre $\overline{\tau}_{con}$ cuando se introduce sucesivamente una aeronave convencional frente a 1 RPAS.

Nº Conv.	Nº RPAS	$\overline{\tau}_{con}$ (s)	Relación entre tiempos de duración
1	1	4,7779	2,691
2	1	12,5124	
2	1	12,5124	1,719
3	1	21,5077	
3	1	21,5077	1,657
4	1	35,6487	
4	1	35,6487	1,441
5	1	51,3561	

En un nivel comparativo, resulta más ventajoso introducir una aeronave convencional cuando ya existen RPAS en el espacio aéreo que añadir más aeronaves convencionales sobre programaciones con aeronaves convencionales. Al respecto de la introducción progresiva de aeronaves convencionales en distintas programaciones, pueden utilizarse tres configuraciones base distintas. Todas ellas involucran dos aeronaves pudiendo ser éstas bien RPAS, bien convencionales o bien una de cada tipo. Los resultados de añadir sucesivamente una aeronave convencional sobre dichas configuraciones son los que se acompañan, a continuación, en la Tabla 74.

Tabla 74. Relación entre $\overline{\tau_{con}}$ cuando se introduce sucesivamente una aeronave convencional en las configuraciones de aeronaves descritas.

Nº Conv.	Nº RPAS	2 aeronaves	3 aeronaves	4 aeronaves	5 aeronaves	6 aeronaves
2	0	3,475	2,097	1,568	-	-
1	1	2,691	1,719	1,657	1,441	-
0	2	2,272	1,732	1,463	1,379	1,385

En la tabla anterior se almacenan los resultados para un número inicial de sólo dos aeronaves. Estos datos pueden ampliarse en función de las simulaciones realizadas para generar un número mayor de casos de estudio y evaluar la evolución de las distintas configuraciones. De esta manera, el dato inicial va a consistir en un número fijo de aeronaves convencionales o, exclusivamente, RPAS. Sobre dicha programación se añade una aeronave en cada caso que puede ser bien una aeronave convencional o un RPAS. El resultado son las relaciones entre los tiempos medios de conflicto ordenadas por filas para cada configuración de aeronaves según la Tabla 75.

Tabla 75. Relación entre $\overline{\tau_{con}}$ cuando se introduce una aeronave en programaciones exclusivamente conformadas por dos o más aeronaves del mismo tipo.

Tipo original de aeronave	Tipo de aeronave introducida	2 aeronaves	3 aeronaves	4 aeronaves	5 aeronaves
Convencional	Convencional	3,475	2,097	1,568	-
Convencional	RPAS	5,283	2,613	2,066	1,898
RPAS	Convencional	2,272	1,629	1,348	1,259
RPAS	RPAS	3,365	2,000	1,644	-

ANEXO C. HISTOGRAMAS DE CONFLICTOS EN LAS SIMULACIONES DE MONTE CARLO REALES

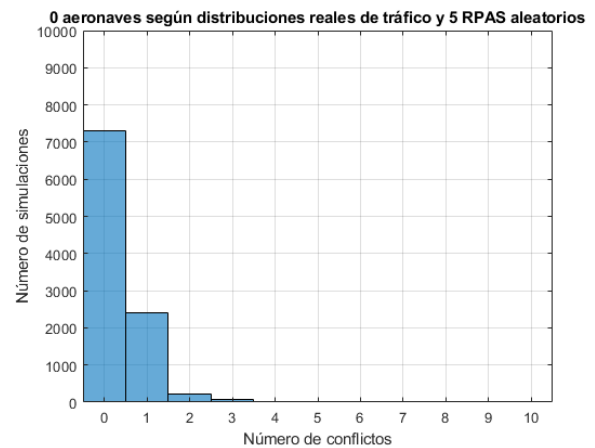
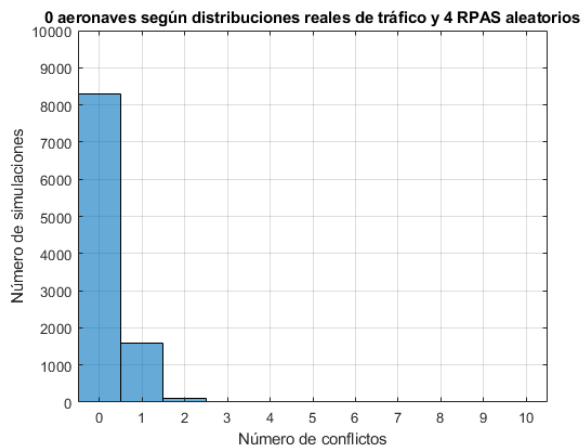
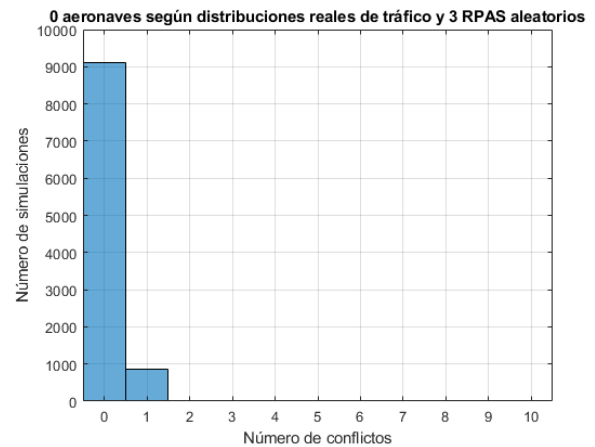
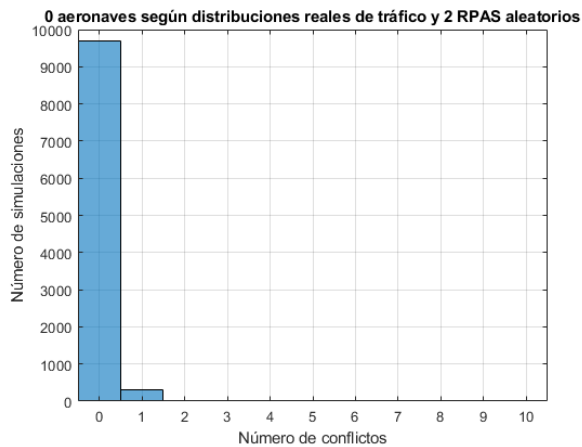


Ilustración 72. Histogramas de conflictos para 0 aeronaves convencionales reales.

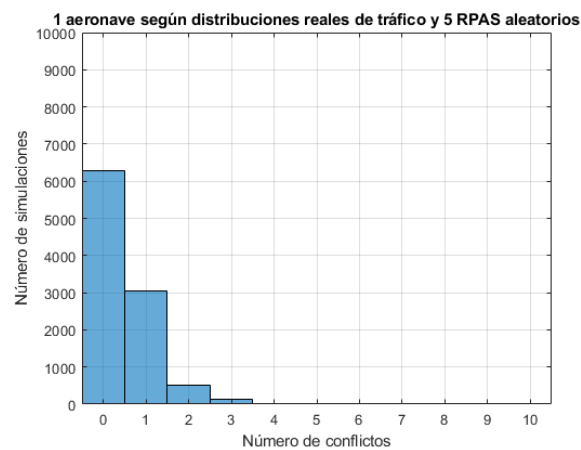
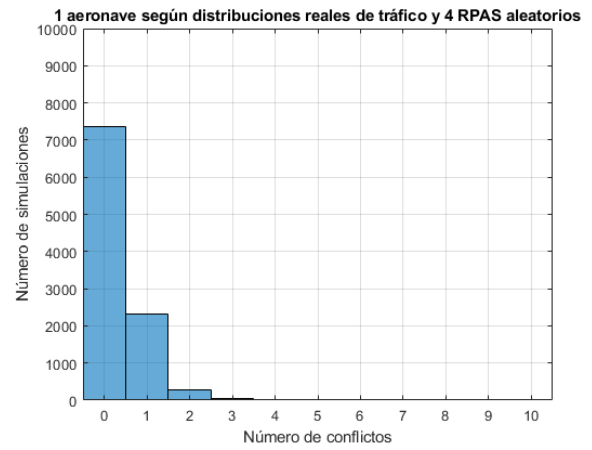
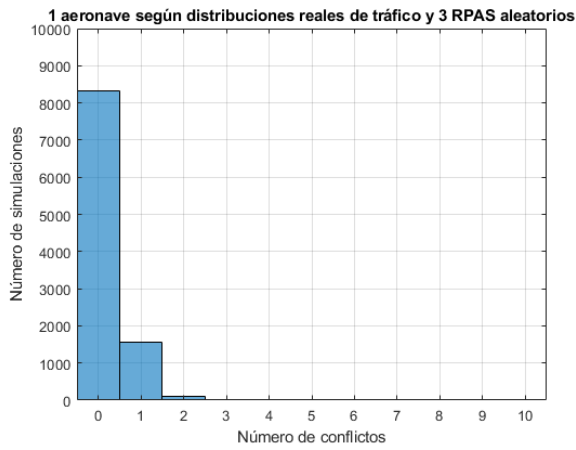
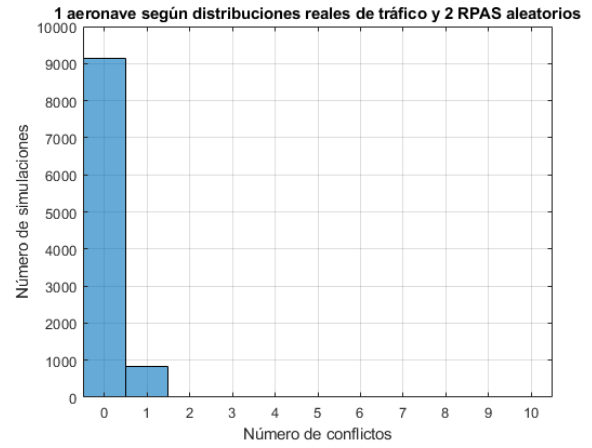
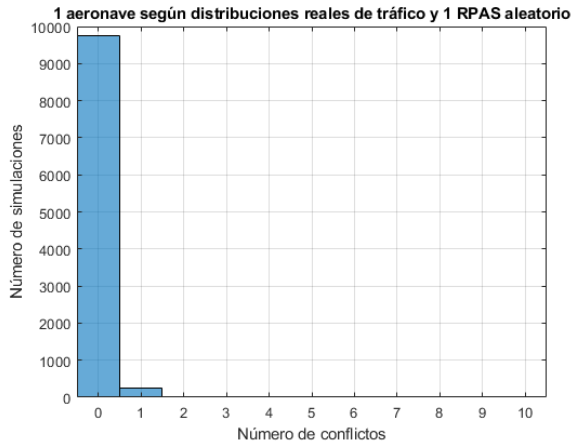


Ilustración 73. Histogramas de conflictos para 1 aeronave convencional real.

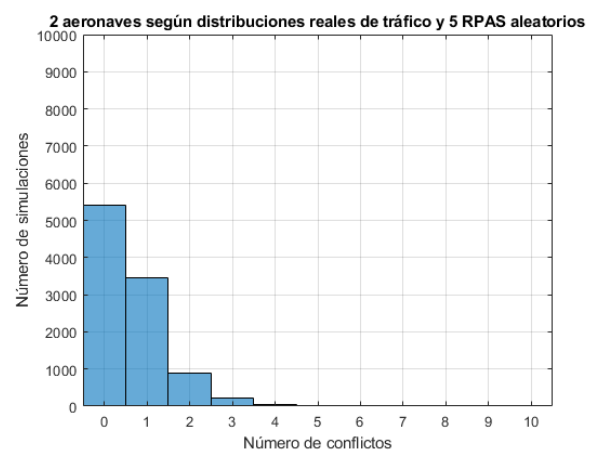
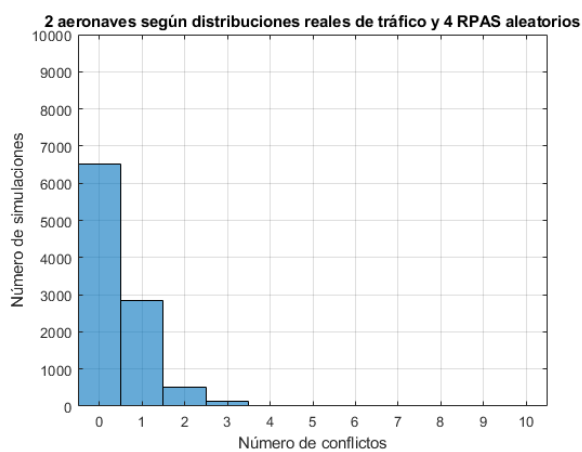
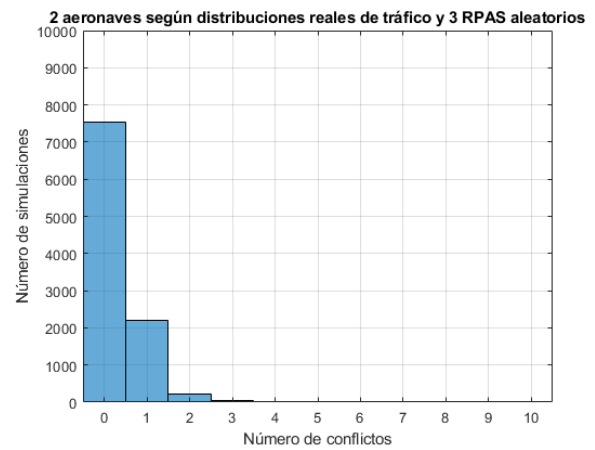
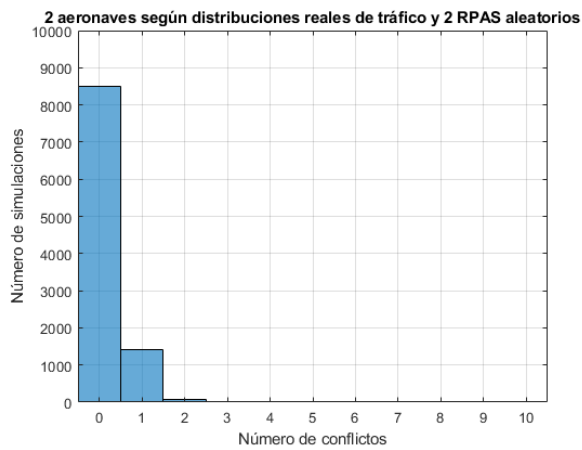
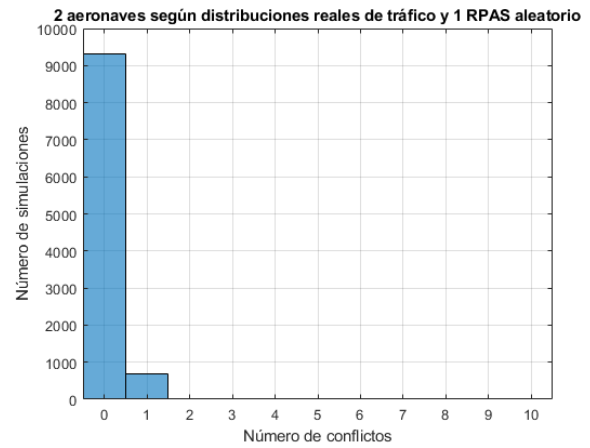
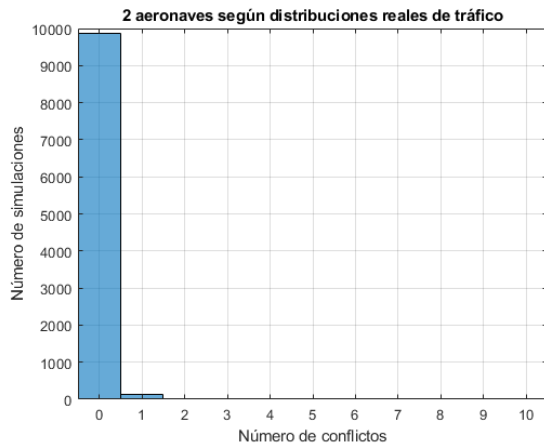


Ilustración 74. Histogramas de conflictos para 2 aeronaves convencionales reales.

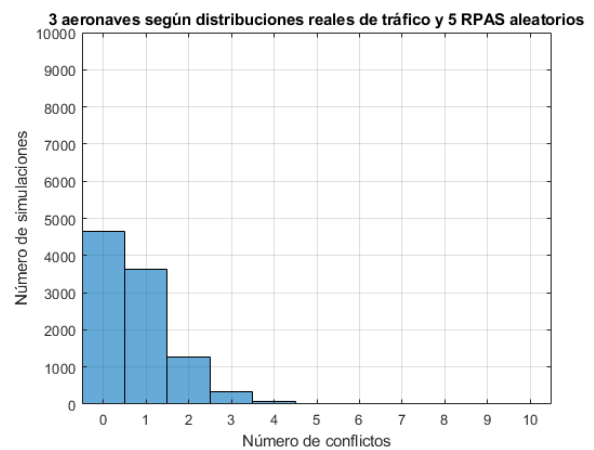
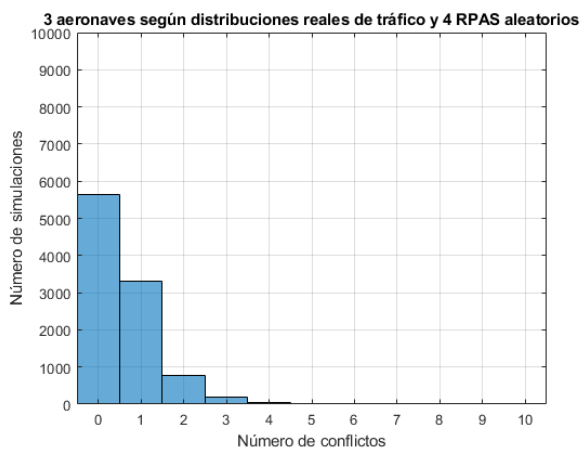
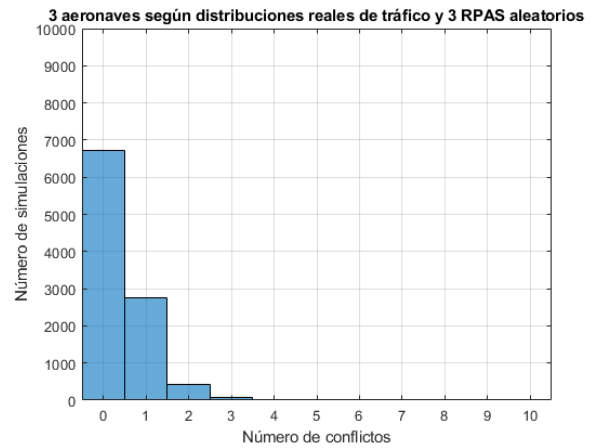
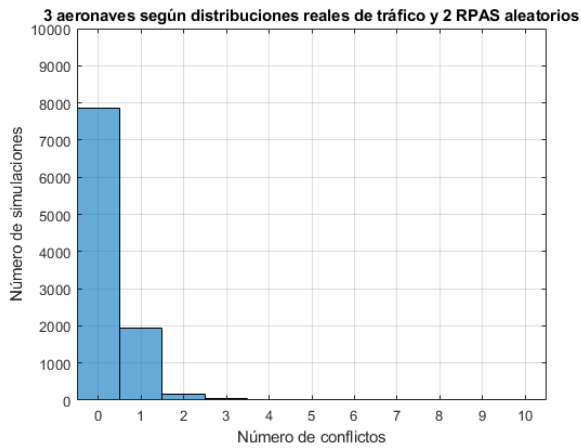
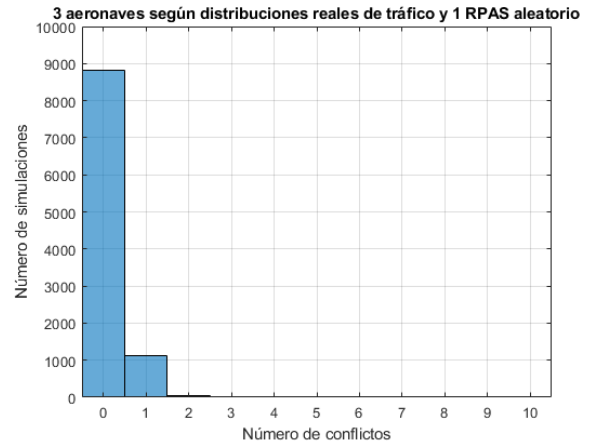
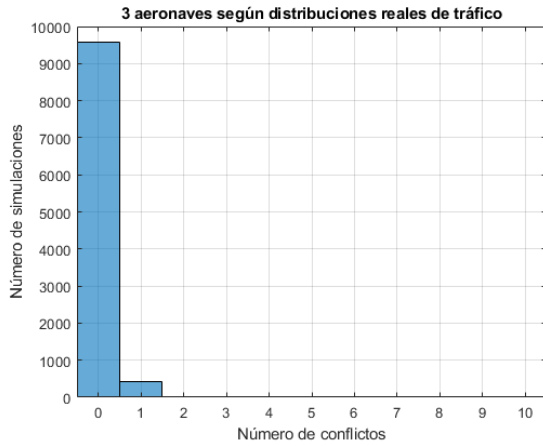


Ilustración 75. Histogramas de conflictos para 3 aeronaves convencionales reales.

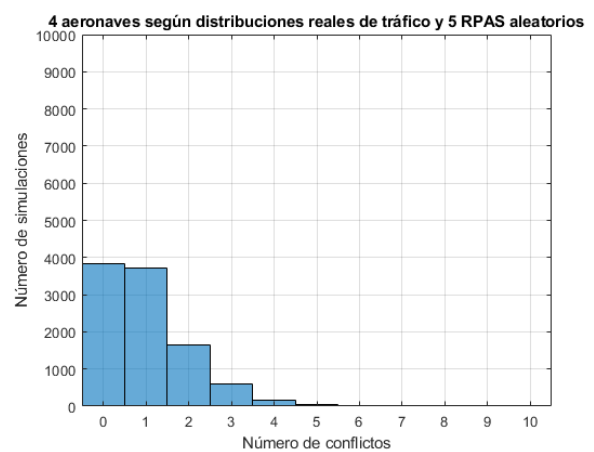
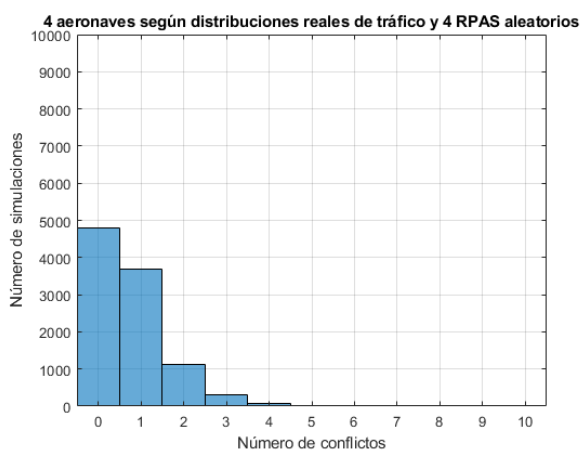
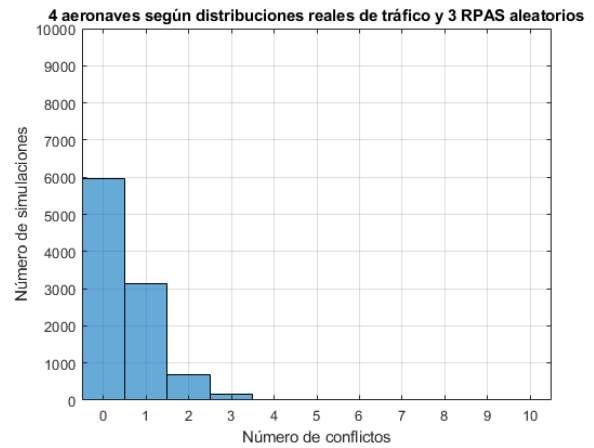
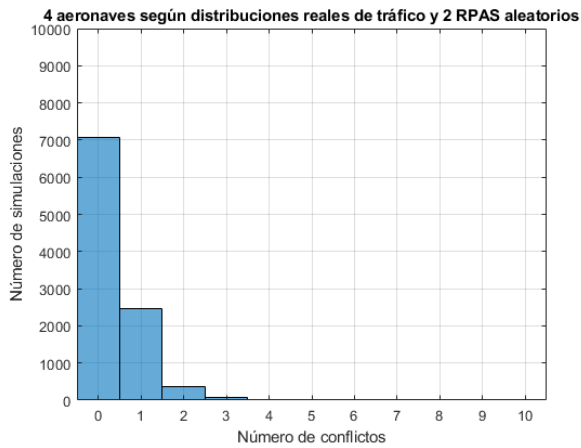
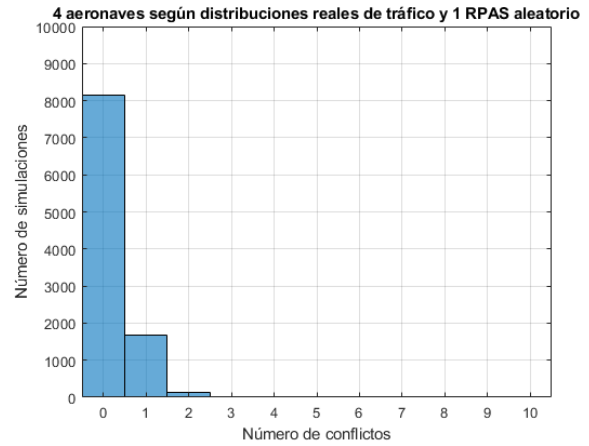
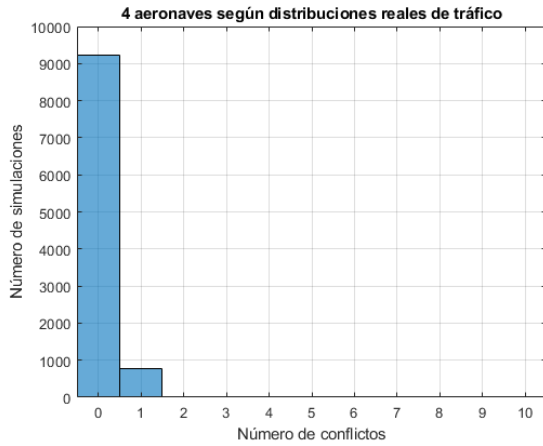


Ilustración 76. Histogramas de conflictos para 4 aeronaves convencionales reales.

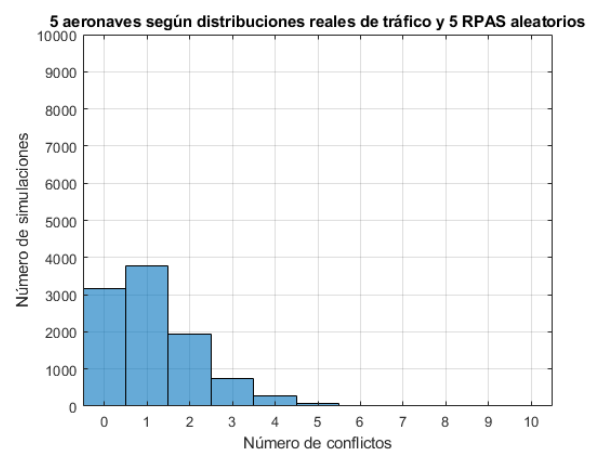
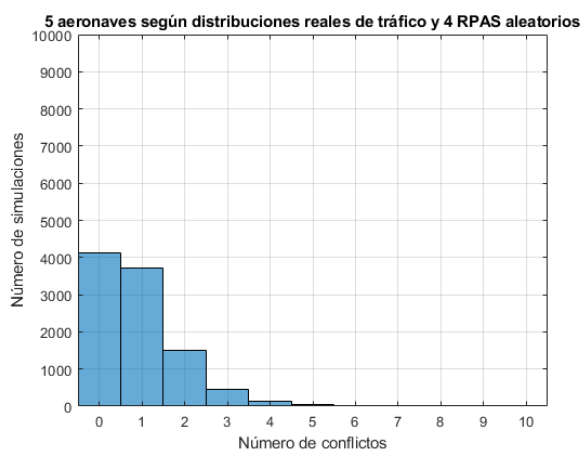
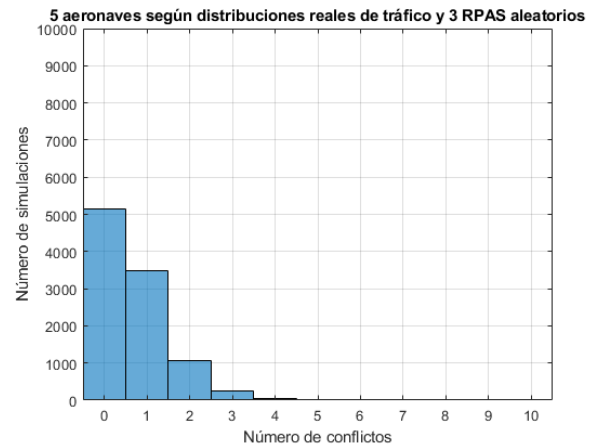
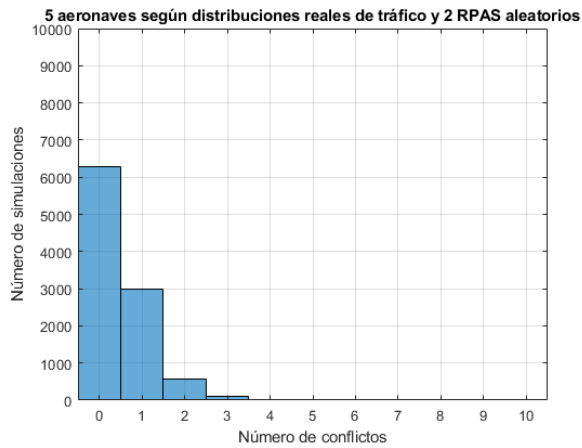
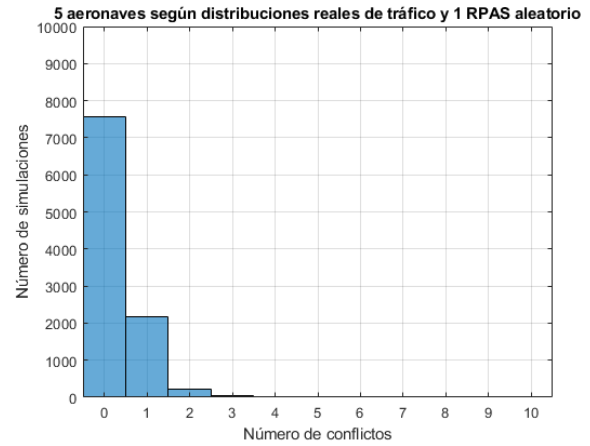
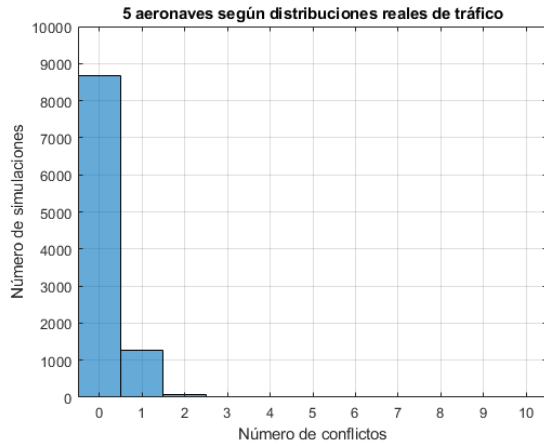


Ilustración 77. Histogramas de conflictos para 5 aeronaves convencionales reales.



ANEXO D. SAFE RPAS INTEGRATION IN NON-SEGREGATED AIRSPACE

Safe RPAS integration in non-segregated airspace

Javier A. Pérez-Castán

Department of Aerospace Systems, Air Transport and Airports, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain

Fernando Gómez Comendador

Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain

Álvaro Rodríguez-Sanz

Department of Aerospace Systems, Air Transport and Airports, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain

Rosa M. Arnaldo Valdés

Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain, and

Jose Félix Alonso-Alarcón

Department of Aerospace Systems, Air Transport and Airports, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain

Abstract

Purpose – This paper aims to assess the implications in safety levels by the integration of remotely piloted aircraft system (RPAS). The goal is to calculate the number of RPAS that can jointly operate with conventional aircraft regarding conflict risk, without exceeding current safety levels.

Design/methodology/approach – This approach benchmarks a calculated level of safety (CLS) with a target level of safety (TLS). Monte Carlo (MC) simulations quantify the TLS based on the current operation of conventional aircraft. Then, different experiments calculate the CLS associated with combinations of conventional aircraft and RPAS. MC simulations are performed based on probabilistic distributions of aircraft performances, entry times and geographical distribution. The safety levels are based on a conflict risk model because the safety metrics are the average number of conflicts and average conflict duration.

Findings – The results provide restrictions to the number of RPAS that can jointly operate with conventional aircraft. The TLS is quantified for four conventional aircraft. MC simulations confirm that the integration of RPAS demands a reduction in the total number of aircraft. The same number of RPAS than conventional aircraft shows an increase over 90% average number of conflicts and 300% average conflict time.

Research limitations/implications – The methodology is applied to one flight level of en-route airspace without considering climbing or descending aircraft.

Originality/value – This paper is one of the most advanced investigations performed to quantify the number of RPAS that can be safely integrated into non-segregated airspace, which is one of the challenges for the forthcoming integration of RPAS. Particularly, Europe draws to allow operating RPAS and conventional aircraft in non-segregated airspace by 2025, but this demanding perspective entails a thorough analysis of operational and safety aspects involved.

Keywords Air transport, Monte Carlo simulations, Safety assessment, RPAS, Conflict risk, RPAS integration

Paper type Research paper

1. Introduction

The integration of remotely piloted aircraft system (RPAS) in non-segregated airspace is one of the most complex and demanding challenges for the aviation community in the years ahead. The beginning of RPAS integration in non-segregated airspace is expected to be reached to the time frame 2025, according to European RPAS Steering Group (2013). This aim requires broad and structured analysis of the current situation as well as the potential solutions to be implemented. In this way, the development of a risk-based framework to ensure the safe integration of RPAS is crucial for its achievement.

RPAS operation in upper airspace does not require higher technological developments, but it demands detailed analysis about the safety of their integration with conventional aircraft. European Aviation Safety Agency and Federal Aviation Administration demand that the integration of RPAS must not imply a diminish on current safety levels (EASA, 2015; FAA, 2017). "Integration" refers to a future when RPAS may be expected to enter the airspace routinely without requiring special provisions (SESAR, 2015). A new framework will be

The current issue and full text archive of this journal is available on Emerald Insight at: <https://www.emerald.com/insight/1748-8842.htm>



Emerald Engineering and Aerospace Technology
© Emerald Publishing Limited (ISSN 1748-8842)
(DOI 10.1108/AEAT-11-2019-0234)

This project has been developed under the Observatory for the Advancement of Air Traffic Management (OIAATM) promoted by ISDEFE. Particularly, the authors would like to acknowledge Gonzalo Águeda and Celsina Alentir from UPM and Miguel A. Martín Blanco, Jaime Torrecilla, María Ana García and Susana Duran Vizcarra from ISDEFE.

Conflicts of interest The authors declare no conflict of interest.

Received 20 November 2019

Revised 14 January 2020

Accepted 23 January 2020

ANEXO E. HOW MANY RPAS CAN BE SAFELY INTEGRATED IN NON-SEGREGATED AIRSPACE

MATEC Web of Conferences **304**, 05003 (2019)
EASN 2019

<https://doi.org/10.1051/mateconf/201930405003>

How many RPAS can be safely integrated in non-segregated airspace?

Javier A. Pérez-Castán¹, Fernando Gómez Comendador¹, Álvaro Rodríguez-Sanz¹, Rosa M. Arnaldo¹ and Jaime Torrecilla²

¹Universidad Politécnica de Madrid, 28040, Plaza Cardenal Cisneros s/n, Madrid, Spain
²ISDEFE, Calle Beatriz de Boddilla, 28040, Madrid, Spain.

Abstract. The forthcoming integration of Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) is one of the most complex challenges for aviation. Europe draws to allow operating RPAS and conventional aircraft in non-segregated airspace by 2025, but this demanding perspective entails a thorough analysis of the different aspects involved. The RPAS integration in non-segregated airspace cannot imply an increase in the safety levels. This paper assesses how the RPAS integration affects safety levels. The goal is to regulate the number of RPAS that can jointly operate with conventional aircraft regarding conflict risk. This approach benchmarks a Calculated Level of Safety (CLS) with a Target Level of Safety (TLS). Monte Carlo (MC) simulations quantify the TLS based on schedules of conventional aircraft. Then, different combinations of conventional aircraft and RPAS provide different CLS. MC simulations are performed based on probabilistic distributions of aircraft performances, entry times and geographical distribution of aircraft. The safety levels are based on a conflict-risk model because the primary metrics are average number of conflicts and average conflict duration. The methodology is applied to one flight level of en-route airspace. The results provide restrictions to the number of RPAS that can jointly operate with conventional aircraft. Particularly, the TLS is quantified for four conventional aircraft and MC simulations provide the combinations of conventional aircraft and RPAS that fulfil the CLS. The same number of RPAS than conventional aircraft shows an increase over 90% average number of conflicts and 300% average conflict time.

1 Introduction

The integration of Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) in non-segregated airspace is one of the most complex and demanding challenges for the aviation community in the years ahead. The beginning of RPAS integration in non-segregated airspace is expected to be reached to the time frame 2025, according to European RPAS Steering Group [1]. This aim requires a broad and structured analysis of the current situation as well as the potential solutions to be implemented. In this way, the development of a risk-based framework to ensure the safe integration of RPAS is crucial for its achievement.

RPAS operation in upper airspace does not require higher technological developments, but it demands detailed analysis about the safety of their integration with conventional aircraft. European Aviation Safety Agency (EASA) and Federal Aviation Administration (FAA) demand that the integration of RPAS must not imply a diminish on current safety levels [2,3]. "Integration" refers to a future when RPAS may be expected to enter the airspace routinely without requiring special provisions [4]. A new framework will be compulsory in the future to take the operational features of RPAS into account. One of the goals of this



ANEXO F. RPAS INTEGRATION IN NON-SEGREGATED AIRSPACE: SAFETY METRICS FOR TACTICAL PLANNING



Original Article



RPAS integration in non-segregated airspace: Safety metrics for tactical planning

Proc. IMechE Part G:
J. Aerospace Engineering
2019, Vol. 233(16) 6563–6575
© IMechE 2019
Article reuse guidelines:
sagepub.com/journals-permissions
DOI: 10.1177/0954410019861263
journals.sagepub.com/home/ptg

Javier A Pérez-Castán , Fernando G Comendador,
Álvaro Rodríguez-Sanz , Rosa M Arnaldo Valdés and
Gonzalo Agueda

Abstract

The integration of remotely piloted aircraft system in non-segregated airspace requires a significant effort and new methodologies to underwrite this challenge. This paper develops a methodology to assess the impact of remotely piloted aircraft system integration by applying safety metrics in tactical planning. This methodology builds five modules to simulate remotely piloted aircraft system introduction in a conventional-aircraft schedule: Base scenario, path modelling, conflict detection, temporary-blocking window and safety metrics. The safety metrics quantify the safety state of the operation by the number of conflicts, the conflict severity and the airway availability. This last safety metric represents a step forward in the decision-making process because it provides the airway risk-suitability to integrate remotely piloted aircraft system. Moreover, the temporary-blocking window underlies the airway availability metric. This concept provides temporary restrictions to the integration of remotely piloted aircraft system depending on the entry times of the conventional aircraft. Finally, this methodology is applied in an air traffic volume of the Spanish upper airspace. Different simulations were performed by introducing remotely piloted aircraft system covering every airway of the airspace. Results provided the temporary-blocking windows that specified the temporary restrictions to remotely piloted aircraft system introduction as a function of the airway flown by the conventional aircraft. Furthermore, the methodology appraised the airway availability characterising the airways depending on the risk impact by the remotely piloted aircraft system.

Keywords

Air transport, RPAS, safety metrics, tactical planning, temporary-blocking window

Date received: 21 February 2019; accepted: 11 June 2019

Introduction

The integration of remotely piloted aircraft systems (RPASs) into non-segregated airspace jointly with conventional aircraft is extremely relevant to the aviation community. The European Steering group plans to integrate RPAS in non-segregated airspace in 2025 horizon.¹ Major efforts focused on developing regulation related to requisites and performances that must comply with these aircraft.^{2,3} Nonetheless, the vast majority of this regulation aims to RPAS for specific missions that do not respond to the necessities of systematic integration in airspace jointly with conventional aircraft.^{4,5} The scale of the problem is completely different because one assesses the integration of one specific RPAS in the air traffic management (ATM) system and the other analyses how the integration of RPAS affects the ATM system.

Therefore, it is required to analyse and plan a methodical RPAS integration with conventional aircraft in

the ATM system. The major issue underlies that few works are evaluating the safety impact imposed by the RPAS integration jointly with conventional aircraft. A thorough literature review of the main works developed so far indicates that research is mainly focused on four areas: Conflict Detection and Resolution (CD&R), third-party risk models, safety risk management and safety impact in non-segregated airspace. Notably, the authors highlight the literature research of Netjasov and Janić⁶ because they performed a thorough review of the different risk models.

Universidad Politécnica de Madrid, Pza. Cardenal Cisneros, Madrid, Spain

Corresponding author:
Javier A Pérez-Castán, Universidad Politécnica de Madrid, 3 Madrid 28040, Spain.
Email: javier.perez.castan@upm.es



ANEXO G. HOW MANY RPAS CAN BE SAFELY INTEGRATED IN NON-SEGREGATED AIRSPACE?

How many RPAS can be safely integrated in non-segregated airspace?

Javier A. Pérez-Castán^{1*}, Fernando Gómez Comendador¹, Alvaro Rodríguez-Sanz¹, Rosa M. Arnaldo¹ and Jaime Torrecilla²

¹Universidad Politécnica de Madrid, 28040, Plaza Cardenal Cisneros s/n, Madrid, Spain
²ISDEFE, Calle Beatriz de Boadilla, 28040, Madrid, Spain.

Abstract. The forthcoming integration of Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) is one of the most complex challenges for aviation. Europe draws to allow operating RPAS and conventional aircraft in non-segregated airspace by 2025, but this demanding perspective entails a thorough analysis of the different aspects involved. The RPAS integration in non-segregated airspace cannot imply an increase in the safety levels. This paper assesses how the RPAS integration affects safety levels. The goal is to regulate the number of RPAS that can jointly operate with conventional aircraft regarding conflict risk. This approach benchmarks a Calculated Level of Safety (CLS) with a Target Level of Safety (TLS). Monte Carlo (MC) simulations quantify the TLS based on schedules of conventional aircraft. Then, different combinations of conventional aircraft and RPAS provide different CLS. MC simulations are performed based on probabilistic distributions of aircraft performances, entry times and geographical distribution of aircraft. The safety levels are based on a conflict-risk model because the primary metrics are average number of conflicts and average conflict duration. The methodology is applied to one flight level of en-route airspace. The results provide restrictions to the number of RPAS that can jointly operate with conventional aircraft. Particularly, the TLS is quantified for four conventional aircraft and MC simulations provide the combinations of conventional aircraft and RPAS that fulfil the CLS. The same number of RPAS than conventional aircraft shows an increase over 90% average number of conflicts and 300% average conflict time.

1 Introduction

The integration of Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) in non-segregated airspace is one of the most complex and demanding challenges for the aviation community in the years ahead. The beginning of RPAS integration in non-segregated airspace is expected to be reached to the time frame 2025, according to European RPAS Steering Group [1]. This aim requires a broad and structured analysis of the current situation as well as the potential solutions to be implemented. In this way, the development of a risk-based framework to ensure the safe integration of RPAS is crucial for its achievement.

RPAS operation in upper airspace does not require higher technological developments, but it demands detailed analysis about the safety of their integration with conventional aircraft. European Aviation Safety Agency (EASA) and Federal Aviation Administration (FAA) demand that the integration of RPAS must not imply a diminish on current safety levels [2,3]. "Integration" refers to a future when RPAS may be expected to enter the airspace routinely without requiring special provisions [4]. A new framework will be compulsory in the future to take the operational features of RPAS into account. One of the goals of this framework is to allow for setting out the safety of the RPAS operation jointly with conventional aircraft [5–7].

Could RPAS fly safely in non-segregated airspace? The complexity of the answer does not fall in, whether yes or not, because it must be yes, but the issue is about how. Currently, conventional aircraft fly according to prefixed routes that are modelled according to air traffic flow patterns, although there are several airspaces based on free-route [8]. Then, RPAS must adapt to the current airway network and current air traffic patterns. One of the main concerns is that the operational patterns of RPAS can differ from conventional aircraft ones [9,10]. Although RPAS could be assumed to be modelled as slow conventional aircraft, there are uncertainties about communications, navigation and surveillance issues that must be analysed in advance [11]. Due to this lack of operational and technical knowledge about RPAS, regulators and Airspace Navigation Service Providers (ANSPs) seek to introduce RPAS based on a minimum interaction with conventional aircraft [12,13]. The problem arises when both airspace users operate jointly in the same scenario where the interaction between them cannot be avoided.

The most complex assessments about RPAS integration have tackled three research lines. The first deals with the global problem of risk management. Clothier et al. [14] developed a framework for structuring the safety case of the RPAS operation. Moreover, various regulators assessed the main difficulties that must be solved before RPAS operation

* Javier A. Pérez-Castán: javier.perez.castan@upm.es