

UAB

Universitat Autònoma de Barcelona

Anàlisi quantitativa del consum de combustible de parelles
d'aeronaus volant en formació tenint en compte el nivell
de vol, la velocitat i la configuració de l'aeronau.

Memòria del Treball de Fi de Grau en Gestió Aeronàutica

Realitzat per: Marc Aguilera i Mondéjar

Dirigit per: Miquel Àngel Piera Eroles

Sabadell, Juny de 2024

El sotasignat, **Miquel Àngel Piera Eroles** director/a del Treball de Fi de Grau, professor de l'Escola d'Enginyeria de la UAB,

CERTIFICA:

Que el treball al que correspon la present memòria ha estat realitzat sota la seva direcció per

Marc Aguilera Mondéjar

I per a que consti firma la present. Sabadell, **juny de 2024**

Signat:

Índex

Resum.....	5
Índex de taules.....	7
Índex d' il·lustracions.....	8
Glossari i acrònims.....	10
1. INTRODUCCIÓ.....	15
1.1 Context i rellevància del tema.....	15
1.2. Objectius del Treball.....	16
1.3. Metodologia General.....	17
1.4. Estructura del document.....	18
2. MARC TEÒRIC.....	19
2.1 Obstacles de l'aviació moderna.....	19
2.1.1 L'espai aeri com a recurs limitat.....	19
2.1.2 Pressió social i gubernamental per a la transició ecològica.....	20
2.2 Organització de l'espai aeri, concepte i marc regulatori.....	20
2.3 Aerovies i Rutes Aèries Superiors.....	21
2.4 Assignació de nivells de vol, Separació vertical i aplicació RVSM:.....	22
2.5 Filosofia PBN per a la separació horitzontal.....	24
2.6 Rutes Oceàniques NAT-HLA.....	27
2.6.1 Separació Lateral.....	27
2.6.2 Separació Longitudinal.....	29
2.7 Polítiques de combustible per a la planificació d'un vol.....	30
2.8 Conceptes teòrics clau.....	31
2.8.1 Biomimètica aplicada a l'aeronàutica.....	31
2.8.3 Vol en formació.....	33
2.8.4 Els vòrtex.....	34
2.8.5 Densitat de l'aire i l'efecte en el vol en formació.....	35
2.9. Estudi de cas: Projecte Fello' Fly.....	35
2.9.1 Descripció del projecte.....	35
2.9.2 Aportacions.....	37
2.9.3 Implicacions i barreres del projecte.....	38
3. Anàlisi quantitativa de l'estalvi de combustible del vol en formació.....	47
3.1 Procediment de la investigació.....	47
3.1.1 Tipus d'investigació.....	47
3.1.2 Hipòtesis inicial.....	47
3.1.3 Eines.....	47
3.1.4 Procediment.....	48
3.1.5 Escenari , avions i configuració.....	48
3.1.5.1 Escenari de Mig Radi.....	49
3.1.5.2 Escenari de Llarg radi.....	51
3.1.6 Càlcul Teòric - Escenari d'un vol de mig radi.....	53
3.1.6.1 Densitat de l'aire, el seu efecte hipotètic en els vòrtex i l'estalvi segons el nivell de vol.....	53
3.1.6.2 Consums d'un avió segons el nivell de vol.....	54

3.1.6.3 Consums teòrics de l'avió seguidor en un vol en formació.....	59
3.1.7 Experimentació i resultats obtinguts.....	61
3.1.7.1 Resultats.....	62
3.1.7.2 Comparativa i anàlisi de resultats.....	63
4. Discussió.....	66
4.1 Implicacions pràctiques i operacionals.....	66
5. Conclusions i noves línies d'investigació.....	69
5.1 Conclusions.....	69
5.2 Propostes per a investigacions futures.....	70
6. Referències.....	72
7. Annexos.....	74

Resum

<u>Títol</u>	Anàlisi quantitativa del consum de combustible de parelles d'aeronaus volant en formació tenint en compte el nivell de vol, la velocitat i la configuració de l'aeronau.
<u>Data</u>	Juny 2024
<u>Autor</u>	Marc Aguilera Mondéjar
<u>Tutor</u>	Miquel Àngel Piera Eroles
<u>Titulació</u>	Gestió Aeronàutica

Resum

Aquest Treball de Fi de Grau (TFG) explora l'estalvi de combustible en l'aviació comercial a través del vol en formació, inspirat en les estratègies de les aus migratòries. Aquest estudi investiga els beneficis aerodinàmics i quantifica l'estalvi de combustible mitjançant models de simulació avançats, tenint en compte les diverses configuracions de formació i paràmetres de vol com la velocitat, l'altitud i la configuració de l'aeronau. Es discuteixen les implicacions pràctiques i operacionals, incloent desafiaments en comunicació, navegació i vigilància (CNS), així com l'adherència a regulacions aeronàutiques. El projecte Fello'Fly d'Airbus serveix com a estudi de cas principal, il·lustrant l'aplicació real d'aquestes tècniques i els seus resultats preliminars. Finalment, es presenten conclusions i recomanacions per a la implementació efectiva del vol en formació, destacant el seu potencial per millorar la sostenibilitat, reduir els costos operatius en l'aviació i augmentar la capacitat de l'espai aeri.

Paraules clau: vol en formació, estalvi de combustible, estela turbulenta, vòrtex, beneficis aerodinàmics, simulació, projecte Fello'fly, sostenibilitat, regulacions aeronàutiques.

Resumen

Este Trabajo de Fin de Grado (TFG) explora el ahorro de combustible en la aviación comercial a través del vuelo en formación, inspirado en las estrategias de las aves migratorias. Este estudio investiga los beneficios aerodinámicos y cuantifica el ahorro de combustible mediante modelos de simulación avanzados, teniendo en cuenta diferentes configuraciones de formación y parámetros de vuelo como la velocidad, la altitud y la configuración de la aeronave. Se discuten las implicaciones prácticas y operacionales, incluyendo los desafíos en la comunicación, navegación y vigilancia (CNS), así como la adherencia a las regulaciones aeronáuticas. El proyecto Fello'Fly de Airbus sirve como estudio de caso principal, ilustrando la aplicación real de estas técnicas y sus resultados preliminares. Finalmente, se presentan conclusiones y recomendaciones para la implementación efectiva del vuelo en formación, destacando su potencial para mejorar la sostenibilidad, reducir los costos operativos en la aviación y aumentar la capacidad del espacio aéreo.

Palabras clave: vuelo en formación, ahorro de combustible, estela turbulenta, vórtice, beneficios aerodinámicos. simulación, proyecto Fello'Fly, sostenibilidad, regulaciones aeronáuticas.

Abstract

The present dissertation explores potential fuel savings in commercial aviation through formation flights, based on strategies observed in migrating birds. It investigates the aerodynamic benefits and quantifies fuel savings using advanced simulation models, taking into account various formation configurations and flight parameters, including speed, altitude and aircraft's configuration. Additionally, practical and operational implications are discussed, including aspects such as communication, navigation and flight monitoring (CNS), as well as compliance with air regulations. The Fello'Fly project serves as the main case study, illustrating the real-life application of such techniques and its preliminary results. Lastly, conclusions highlighting its potential to improve sustainability, reduce operating costs within aviation, and increase airspace capacity are presented, and recommendations for an effective application of formation flights are suggested.

Key Words: Formation flight, fuel savings, wake turbulence, vortex, aerodynamic benefits, simulation, Fello'Fly project, sustainability, air regulations.

Índex de taules

Taula 1: Taula de l'error màxim requerit segons la fase en espai aeri RNP.....	26
Taula 2: Lògica de la classificació d'amenaques i resposta del sistema TCAS.....	42
Taula 3: Configuració de l'escenari del vol de mig radi.....	50
Taula 4: Configuració de l'escenari del vol de llarg radi.....	53
Taula 5: Relació entre el nivell de vol i la densitat de l'aire, efecte en el percentatge d'estalvi de combustible hipotètic a nivell de vol 280 on s'assumeix el màxim estalvi de la investigació.....	53
Taula 6: Dades del rendiment de l'avió a diferents FL amb Cost Index 5 i condicions del pla de vol.....	55
Taula 7: Dades del rendiment de l'avió a diferents FL amb Cost Index 5 i condicions ISA.....	56
Taula 8: Dades del rendiment de l'avió a mach number constant : 0,78 i estandardització de les condicions a l'atmosfera ISA per a la homogeneïtzació dels resultats amb la investigació.....	56
Taula 9: Dades dels consums segons nivell de vol i relacionats directament amb la taula de la variació de densitat en el cas d'un estalvi màxim hipotètic del 10%.....	60
Taula 10: Dades dels consums segons nivell de vol i relacionats directament amb la taula de la variació de densitat en el cas d'un estalvi màxim hipotètic del 5%.....	60
Taula 11: Dades recopilades de la simulació de l'avió seguidor i líder, condicions ISA i Mach .78.....	62
Taula 12: Comparativa en unitats i percentatge dels paràmetres del Seguidor respecte el Líder.....	64
Taula 13: Increment de combustible total consum en volar en allunyar-se del FL òptim.....	65
Taula 14: Comparativa global del combustible requerit i estalvi entre el conjunt de les dues aeronaus.....	65

Índex d' il·lustracions

Figura 1. Captura del mapa mostrant 17.991 vols volant a les 10:35 UTC un 1 de març de 2024.....	19
Figura 2. Mapa divisor de les diferents regions de l'espai aeri.....	22
Figura 3. Extracte d'un pla de vol amb les dades principals de la ruta Madrid - Dusseldorf.....	23
Figura 4. Captura de la ruta Madrid - Dusseldorf, punts de ruta, divisió de l'espai aeri i canvi de nivell de vol.....	23
Figura 5. Il·lustració de la filosofia PBN, error estimat i posició actual.....	25
Figura 6. Captura de la MCDU mostrant l'aplicació real de l'error requerit PBN i l'estimat en espai aeri RNP 2. Font: Pròpia.....	26
Figura 7. Divisió de l'espai aeri Atlàntic Nord.....	28
Figura 8. Extracte d'un pla de vol amb les dades del combustible total requerit desglossat d'un vol.....	31
Figura 9. Imatge de la tècnica aterratge d'un cigne.....	31
Figura 9.1. Imatge de la tècnica d'aterratge d'un A330-200.....	31
Figura 10. Vol en formació de les oques aprofitant els beneficis aerodinàmics.....	32
Figura 11. Il·lustració de les forces i pressió en l'ala en el pla vertical.....	32
Figura 12. Il·lustració de l'efecte de la sustentació i el vòrtex generats per les aeronaus.....	34
Figura 13. Captura del radar mostra activitat convectiva i de tempestes a l'est del Mar Carib.....	39
Figura 14. Il·lustració del sistema de comunicació entre els TCAS de diferents aeronaus.....	40
Figura 15. Il·lustració representativa del marge del sistema TCAS.....	40
Figura 16. Il·lustració representativa de l'àrea divisòria per a la classificació de l'intrús.....	41
Figura 17. Imatge de la pantalla de Navegació mostrant la proximitat d'un altre avió, 2000 peus de separació, cas A.....	43
Figura 18. Imatge de la pantalla de Navegació mostrant la proximitat d'un altre avió, 300 peus de separació, TCAS desactivat.....	43
Figura 19. Imatge de la pantalla de Navegació mostrant la proximitat d'un altre avió, 2000 peus de separació, cas B.....	44
Figura 20. Imatge de la pantalla de Navegació mostrant la proximitat d'un altre avió, 900 peus de separació i alerta de proximitat TCAS.....	44
Figura 21. Imatge de la pantalla de Navegació mostrant la proximitat d'un altre avió, 1 NM i 100 peus de separació i alerta de proximitat TCAS.....	45
Figura 22. Imatge de la "Primary Flight Display" mostrant l'alerta resolutiva del TCAS ordenant descendre.....	45
Figura 23. Captura de la ruta entre Estocolm i Madrid.....	49
Figura 24. Extracte de la capçalera del pla de vol amb les dades principals de la ruta Estocolm - Madrid.....	50
Figura 25. Captura de la ruta entre Barcelona i San Francisco i els diferents espais aeris a creuar.....	51
Figura 26. Extracte de la capçalera del pla de vol amb les dades principals	

de la ruta Barcelona - San Francisco.....	52
Figura 27: Gràfic de la variació de la densitat i la correlació amb l'efecte en l'estalvi de combustible.....	54
Figura 28. Gràfic de la variació de la temperatura amb l'altitud.....	55
Figura 29. Gràfic del consum i temps per a cada nivell de vol, CI 5 i condicions ISA.....	57
Figura 30. Gràfic del consum total de combustible requerit i durada del trajecte de 1489NM segons cada FL MACH 0.78 i condicions ISA.....	57
Figura 31. Taula Relació Nivell de vol-Rendiment del motor-Consum-velocitat sobre la terra amb Cost Index 5 Condicions ISA...	58
Figura 32. Gràfica de la relació entre la velocitat sobre la terra i el consum de Combustible-Rendiment N1 a Mach 0.78, condicions ISA.....	59
Figura 33. Gràfic comparatiu de les taules de consums Vol individual- Vol en formació 5% estalvi màxim - Vol en formació 10% estalvi màxim.....	61
Figura 34. Gràfic dels resultats simulació Líder-Seguidor, consum total, consum per hora i temps de vol.....	63
Figura 35. Imatge de la MCDU rebutjant requisits RNP10 en estar sobrevolant un espai aeri RNP 2.....	74
Figura 36. Captura de la simulació del cas pràctic on s'observa l'avió líder desde la perspectiva de l'avió seguidor i els vòrtex generats sintèticament per a la visualització i posicionament òptim.....	75
Figura 37. Imatge capturada que representa visualment el rendez-vous del Fello'Fly darrere d'un A330.....	75
Figura 38. Imatge capturada que representa visualment desde la perspectiva del líder el rendez-vous del Fello'Fly davant d'un A330.....	76
Figura 39. Imatge capturada que representa visualment desde la perspectiva del seguidor el rendez-vous del Fello'Fly darrere d'un A350....	76
Figura 40. Gràfica comparativa de les dues hipòtesis inicials i la corba de resultats de la simulació.....	77

Glossari i acrònims

CNS	Comunicacions, Navegació i Vigilància, (Surveillance). Pilars clau sobre els que giren les regulacions i elaboració de procediments de les autoritats aeronàutiques.
EASA	European Aviation Safety Agency, autoritat que regula, supervisa i certifica el compliment de les regulacions aeronàutiques per garantir la seguretat de l'espai aeri europeu.
OACI	Organització Internacional d'Aviació Civil, agència especialitzada de les Nacions Unides per unir els interessos i estàndards de seguretat aeronàutica.
Slot	Horari assignat per les autoritats aeroportuàries per a l'aterratge o enlairament de les aeronaus.
SETI / SETO	Single Engine Taxi In / Out, procediment de rodatge fins a la pista d'enlairament o estacionament amb un sol motor per tal d'estalviar combustible i emissions.
Espera / holding	Procediment d'un avió que consisteix en donar voltes en forma d'hipòdrom per esperar a l'autorització d'aproximació a un aeroport.
Angle d'atac- AoA	Angle entre el flux d'aire i l'eix de referència de l'aeronau, concepte fonamental en l'aerodinàmica que fa variar el valor de la sustentació.
Perfil alar	Forma i característiques aerodinàmiques de l'ala.
ATC	Air Traffic Control, òrgan que s'encarrega de vigilar, dirigir i autoritzar a les aeronaus dins del seu espai aeri designat.
ATM	Air Traffic Management, conjunt de sistemes i procediments per a la gestió del trànsit aeri.
IFR	Instrumental Flight Rules, regles que estableixen els procediments del vol instrumental, tècnica de vol basada en la navegació pels instruments de l'aeronau i guiada les radioajudes de terra sense guiar-se per les referències visuals de l'exterior.
VFR	Visual Flight Rules, regles que estableixen els procediments de vol guiat únicament per referències visuals de l'exterior, només possible en condicions meteorològiques favorables en termes de visibilitat.

Nivell de transició	Altitud en la qual la referència de pressió de totes les aeronaus que comparteixen l'espai aeri s'estableix en l'estàndard de 1013,25 Hectopascals, garantint una lectura d'altitud basada en la mateixa referència per garantir la separació segura d'aeronaus.
FL - Flight Level / Nivell de vol	A partir del nivell de transició, les altituds es refereixen en nivells de vol, que varien de mil en mil peus.
SSR	Secondary Surveillance Radar, Radar que es basa en la tècnica de pregunta-resposta entre els equips de terra i l'aeronau per a l'obtenció de dades útils, per als controladors i pilots, tals com altitud, velocitat, indicatiu...
TMA	Àrea de Control Terminal, àrea de control al voltant d'un aeròdrom amb les seves característiques i gestionada pels controladors per a l'entrada i sortida d'aeronaus.
Kt	Nusos, unitat estàndard per a mesurar la velocitat, que deriva de les milles nàutiques per hora. On 1 kt equival a 1,852 Km/h.
Nm	Milla Nàutica, Unitat estàndard del sistema internacional per mesurar les distàncies. 1 Nm equival a 1,852 Km.
Ft	Feet o Peus en català, unitat estàndard del SI per mesurar l'altitud. 1 metre equival a 3,28 ft.
PBN	Performance Based Navigation, filosofia de navegació basada en el rendiment i la capacitat de precisió en la navegació de les aeronaus.
RNAV	Area Navigation, evolució del concepte de navegació que permet dirigir-se a qualsevol punt sense el suport de les ajudes tradicional, basant-se en la precisió de navegació i el suport dels sistemes GPS.
STAR	Standard Arrival, procediment estàndard d'arribada a un aeròdrom, amb els seus punts, velocitats i altures establertes de manera fixa.
SID	Standard Instrument Departure, procediment estàndard de sortida d'un aeròdrom.
VOR	VHF Omni-directional Range, radioajuda de terra que envia senyals en els 360 radials de direcció, permetent establir la posició d'una aeronau que es basi en aquesta estació.
DME	Distance Measurement Equipment, radioajuda que permet calcular la distància de l'aeronau a l'estació.

NDB	Non Directional Beacon, radioajuda no direccional que permet a l'avió detectar el rumb on es troba l'estació.
ILS	Instrumental Landing System, sistema instrumental d'aterratge, radioajuda que emet en la dimensió vertical i l'azimut horitzontal per guiar de manera precisa a l'aeronau fins a la pista.
GNSS	Global Navigation Satellite System, sistema de navegació per satèl·lit, permetent establir la posició de manera precisa en qualsevol punt.
ATS Route	Ruta específica i predefinida per canalitzar el flux de trànsit d'una manera organitzada i estàndard.
FIR	Flight Information Region, unitat d'espai aeri més bàsica i extensa, que divideix les diferents regions on es proporcionen els serveis aeronàutics sota una autoritat de control designada.
UIR	Upper Flight Information Region, derivat del FIR que s'encarrega de la regió de l'espai aeri a nivells de vol alts.
Navegació per vectors radars	Tècnica de navegació on l'ATC ordena als pilots rumbos per a gestionar el trànsit, basat en els radars primaris i secundaris per a l'obtenció d'informació precisa de posició, altitud i velocitat.
VHF	Very High Frequency, banda de l'espectre electromagnètic de les ones de ràdio usades en l'aviació a una freqüència d'entre 30 i 300 megahertz.
CPDLC	Controller-Pilot Datalink Communication, sistema digital de comunicacions entre ATC i pilots via la transmissió d'enviament de dades Datalink.
RVSM	Reduced Vertical Separation Minima, filosofia d'estàndards de separació per a reduir-la sota uns requisits específics.
TCAS	Traffic Collision Avoidance System, sistema d'evitació de col·lisió d'aeronaus, que informa i alerta als pilots de la proximitat i potencial col·lisió.
ADS B,C	Automatic Dependant Surveillance, sistema de vigilància que emet dades de vol de les aeronaus rellevants en mode B- Broadcast, emissió continua o C-Contract, contracte previ del controlador que estableix freqüència d'emissió i dades desitjades.

Cost Index	Número entre el 0 i el 999 que estableix el perfil del vol basat en el cost de combustible, el cost operatiu del vol i el temps de vol, on 0 és màxim estalvi, menys velocitat i major temps de vol i 999 és màxima velocitat amb un major cost operatiu.
Performance Factor	Rendiment del motor que modifica els paràmetres de consum, emissions i prestacions basats en el desgast i temps del motor.
GW	Gross Weight, pes total de l'aeronau.
TOW	Take-Off Weight, pes de l'aeronau a l'enlairament.
WS	WindShear, vent de cisalladura, és un vent que canvia d'intensitat i direcció en distància vertical o horitzontal, l'efecte resultant és la turbulència i desestabilització de l'avió-
ESSA	Codi d'OACI designat a l'aeroport d'Estocolm, Suècia.
LEMD	Codi d'OACI designat a l'aeroport de Madrid, Espanya.
LEBL	Codi d'OACI designat a l'aeroport de Barcelona, Espanya.
KSFO	Codi d'OACI designat a l'aeroport de San Francisco, EEUU.
ISA	Atmòsfera Estàndard Internacional, paràmetres estandaritzats de l'atmòsfera a nivell internacional, que inclou la pressió, densitat, variació de temperatura, tropopausa.
N1	Paràmetre per referir-se a la velocitat de rotació de l'eix del compressor de baixa pressió del motor expressada en %.
UTC	Coordinated Universal Time, temps estàndard en l'aviació referenciat en l'hora del meridià de Greenwich.
Transponedor	Sistema basat en el principi del SSR per a la transmissió i recepció de dades de les aeronaus.
Flaps	Sistema incorporat en les aeronaus per augmentar la sustentació i que permet a les aeronaus volar a velocitats més baixes per a l'aproximació o enlairament en menor distància.
Eurocontrol	Òrgan de control aeri europeu
ETOPS	Extended Twin-Engine Operational Performance Standards, normes i requisits

	necessaris per a les aeronaus bimotores per a que puguin volar rutes que s'allunyen d'aeroports en cas de fallada d'un dels motors.
ND	Navigation Display, pantalla de navegació de la cabina de l'avió.
PFD	Primary Flight Display, pantalla de la cabina de l'avió que mostra el paràmetres principals del vol, que inclou altitud, velocitat, posició del morro de l'avió, rumb, etc.
CL	Coefficient of Lift, coeficient que multiplica en la fórmula de la sustentació. El modifiquen els paràmetres d'angle d'atac, perfil alar, entre d'altres.
MCDU	Multi-function Control and Display Unit, és l'interfície entre el pilot i l'ordinador de gestió de vol de l'avió. A través de la qual carreguen i gestionen la ruta, les dades pertinents del vol i l'avió.

1. INTRODUCCIÓ

1.1 Context i rellevància del tema

L'aviació moderna es troba en una constant cerca d'equilibri entre l'eficiència operacional, la seguretat i la sostenibilitat ambiental. En aquest marc, l'estalvi de combustible no només representa una qüestió econòmica per a les aerolínies, sinó també una prioritat ambiental global. La indústria aeronàutica, responsable d'una part significativa de les emissions globals de diòxid de carboni, s'enfronta a la pressió creixent de reduir la seva petjada de carboni, en línia amb els Acords de París sobre el canvi climàtic i els objectius de sostenibilitat de les Nacions Unides. [1]

Dins d'aquest context, el concepte de volar en formació emergeix com una estratègia innovadora inspirada en el món natural. Observant les aus migratòries, que optimitzen el seu consum energètic volant en formacions específiques, els investigadors i enginyers aeronàutics han començat a explorar com aquest principi natural pot ser aplicat a l'aviació per reduir el consum de combustible. Aquesta aproximació promet una via cap a l'eficiència i la reducció d'emissions, essencial en un moment on l'aviació busca camins cap a una major sostenibilitat.

El treball actual, situat en aquest àmbit de recerca emergent, es proposa analitzar quantitativament l'estalvi potencial de combustible que podrien aconseguir parelles d'aeronaus volant en formació. L'anàlisi es centra no només en els beneficis aerodinàmics i l'estalvi de combustible resultant sinó també en la viabilitat pràctica i els desafiaments operacionals i de seguretat que aquesta estratègia comporta. Aquesta investigació es presenta en un moment crític per a la indústria, quan les aerolínies, reguladors i stakeholders busquen solucions innovadores per afrontar els reptes mediambientals sense comprometre l'eficiència ni la seguretat.

A través d'una anàlisi detallada i comparativa amb altres estudis i projectes en l'àmbit, aquest treball aspira a contribuir significativament al corpus de coneixement sobre l'estalvi de combustible en l'aviació, oferint perspectives noves sobre com les tècniques de vol en formació poden ser integrades en les operacions aèries contemporànies. En última instància, el treball busca no només identificar els potencials estalvis de combustible i reduccions d'emissions sinó també llançar llum sobre el camí cap a la implementació pràctica d'aquestes estratègies, marcant un pas cap a una aviació més sostenible i respectuosa amb el medi ambient.

1.2. Objectius del Treball

Aquest treball de final de grau té com a finalitat principal investigar l'aplicació pràctica del vol en formació en l'aviació comercial i quantificar l'estalvi de combustible resultant. Els objectius específics es poden definir com segueix:

1. **Establir una base teòrica:** Revisar la literatura existent i les investigacions prèvies per construir un marc teòric sòlid sobre els principis aerodinàmics del vol en formació. Aquesta revisió inclourà l'anàlisi de les estratègies naturals d'estalvi d'energia observades en aus migratòries i la seva aplicació en entorns aeronàutics.
2. **Quantificar l'estalvi de combustible:** A través d'un model de simulació, determinar la reducció en el consum de combustible que es pot aconseguir amb el vol en formació, tenint en compte variables crítiques com la velocitat, l'altitud, la configuració de l'aeronau i les condicions atmosfèriques.
3. **Analitzar la viabilitat operacional:** Avaluar els desafiaments i les barreres pràctiques a l'hora d'implementar el vol en formació en l'aviació comercial, incloent els aspectes de seguretat, la coordinació entre les aeronaus, i les consideracions de trànsit aeri.
4. **Estudiar l'impacte ambiental:** Investigar com l'estalvi de combustible obtingut mitjançant el vol en formació podria contribuir a la reducció d'emissions de diòxid de carboni i altres gasos d'efecte hivernacle, i com això s'inscriu dins els objectius de sostenibilitat ambiental de la indústria aeronàutica.
5. **Proposar directrius per a la implementació:** Basant-se en els resultats obtinguts, desenvolupar un conjunt de recomanacions pràctiques per a la implementació de vols en formació, dirigides tant a fabricants d'aeronaus com a operadors aeronàutics i organismes reguladors.
6. **Obrir camins per a futurs estudis:** Identificar àrees de recerca addicionals basant-se en els resultats obtinguts, proporcionant així una base per a estudis futurs que puguin expandir i millorar les tècniques de vol en formació.

Les aportacions d'aquest treball són dobles: proporcionar una comprensió més profunda dels beneficis potencials del vol en formació i establir un diàleg entre la recerca acadèmica i la pràctica operacional en l'aviació. Amb aquest enfocament, aspira a contribuir de manera significativa a la literatura existent, oferint una perspectiva nova i pràctica sobre com afrontar els reptes de sostenibilitat de la indústria.

1.3. Metodologia General

La metodologia d'aquest Treball de Fi de Grau combina l'anàlisi teòrica amb simulacions pràctiques per quantificar l'estalvi de combustible derivat del vol en formació. A continuació es descriuen les etapes clau d'aquesta metodologia:

- A. **Revisió bibliogràfica:** S'iniciarà amb una extensa revisió del marc teòric que ajuda a la comprensió de l'àmbit, per identificar conceptes clau i treballs relacionats amb el vol en formació, tant en el context natural com en aplicacions aeronàutiques.
- B. **Disseny del model de simulació:** S'utilitzaran models aerodinàmics establerts per dissenyar simulacions que repliquen el vol en formació d'aeronaus. El model de simulació inclourà paràmetres ajustables com la velocitat, l'altitud, i la configuració de les aeronaus per determinar l'impacte d'aquestes variables en l'estalvi de combustible.
- C. **Recollida de dades:** Es recopilaran dades de vol reals per calibrar el model de simulació, assegurant que els escenaris simulats siguin tan representatius de les operacions reals com sigui possible. Aquestes dades inclouran informació sobre les característiques de les aeronaus, consum de combustible típic i perfils de vol.
- D. **Simulacions i anàlisi de dades:** Es realitzaran múltiples simulacions per cada configuració de formació per recopilar dades sobre l'estalvi de combustible. Les dades seran analitzades estadísticament per identificar patrons significatius i conclusions fiables.
- E. **Avaluació de viabilitat i seguretat:** Les simulacions també inclouran l'anàlisi de riscos i la viabilitat operacional, considerant factors com la seguretat del vol, els canvis necessaris en les operacions de trànsit aeri, i els requeriments de comunicació entre aeronaus.
- F. **Anàlisi cost-benefici:** Complementàriament a l'anàlisi quantitativa, es realitzarà una avaluació cost-benefici per determinar la viabilitat econòmica del vol en formació, incloent l'estudi de l'impacte de la reducció de l'estalvi de combustible en els costos operacionals.
- G. **Elaboració de propostes:** Finalment, s'elaboraran propostes pràctiques basades en els resultats de les simulacions i l'anàlisi de dades per a la implementació del vol en formació en l'aviació comercial.

Aquesta metodologia és dissenyada per ser sistemàtica, replicable i suficientment flexible per ajustar-se als descobriments que vagin sorgint durant el procés d'investigació. Amb aquest enfocament, aquest treball pretén proporcionar una contribució valuosa a l'estudi del vol en formació com a estratègia d'estalvi de combustible en l'aviació.

1.4. Estructura del document

Aquest Treball de Fi de Grau està organitzat en diversos capítols que guien al lector des de la introducció del context i els fonaments teòrics, passant per l'anàlisi detallada de la recerca, fins a les conclusions i recomanacions finals. A continuació es detalla l'estructura i el contingut de cada capítol:

1. **Introducció:** Aquest capítol establirà el marc del treball, incloent la motivació, els objectius, la metodologia i la estructura del document. És el preàmbul al detall de la investigació i el mapa per a la comprensió global de l'estudi.
2. **Marc teòric:** Presenta una revisió de la literatura pertinent, incloent els principis aerodinàmics del vol en formació i un resum del marc regulatori que engloba l'aviació actual. Aquest capítol proporciona les bases teòriques sobre les quals es construeix la recerca pràctica.
3. **Estudi del cas:** Aquest capítol es a la presentació del projecte Fello'Fly, projecte en el que s'inspira el present treball, proporcionant un anàlisi de les recerques innovadores del sector..
4. **Metodologia:** Explica en detall els mètodes emprats en la recerca, incloent el disseny de simulació, la recollida de dades i les tècniques d'anàlisi. Aquesta secció proporciona transparència i permet la replicabilitat de l'estudi.
5. **Anàlisi quantitativa del consum de combustible:** Descriu els resultats obtinguts de les simulacions, analitzant l'estalvi de combustible sota diferents condicions de vol en formació i altres variables relacionades.
6. **Discussió:** Compara els resultats obtinguts amb estudis previs, discuteix els desafiaments trobats durant la investigació, i examina les implicacions dels resultats en el context operacional i ambiental actual.
7. **Conclusions i treballs futurs:** Resumeix les troballes principals, articula les conclusions clau, i ofereix recomanacions per a la implementació pràctica del vol en formació, així com proposicions per a investigacions futures basades en els resultats del treball.
8. **Referències:** Aquesta secció contindrà totes les fonts citades en el document, organitzades de manera que facilitin al lector la localització de les obres referenciades.
9. **Annexos:** Inclou dades addicionals, gràfics, taulers, detalls metodològics, i qualsevol altre material de suport que complementi el treball principal.

2. MARC TEÒRIC

2.1 Obstacles de l'aviació moderna

L'aviació és un dels sectors amb més avenços i inversió tecnològica, factors que cerquen donar resposta a alguns dels actuals problemes del sector del transport. Una actualitat que queda definida en un marc de preocupació mediambiental, capacitat física i de recursos limitada amb pressupostos molt ajustats que marquen el modus operandi de les organitzacions que el comparteixen.

2.1.1 L'espai aeri com a recurs limitat

Amb l'apogeu del comerç electrònic, la globalitat dels mercats i la constant creixent demanda ha permès un ràpid creixement de les aerolínies que es veu reflectit en l'augment de les flotes i les rutes ofertades. L'espai aeri és un recurs limitat que es veu cada cop més congestionat pel fort creixement vist en les darreres dècades. Xifrant a la congestió mencionada, segons la font de l'aplicació Flight Radar 24, en una data recent, un divendres 1 de Març de 2024 a les 10:35 UTC (veure Figura 1), s'ha arribat a enregistrar un total de 17.991 vols compartint un mateix espai aeri, xifra superada com a registre històric amb un total de 22.000 avions volant al mateix instant un 26 de Maig de 2023.

Aquesta congestió pot comportar conseqüències tals com: retards en les sortides amb l'assignació dels slots, esperes quan hi ha demores en l'aproximació en un aeroport i entren en espera consumint combustible i contaminant. En creuer, tal congestió significa no poder volar als nivells òptims degut al trànsit en l'aerovia i té com a efecte el consum i/o el temps de vol incrementat.

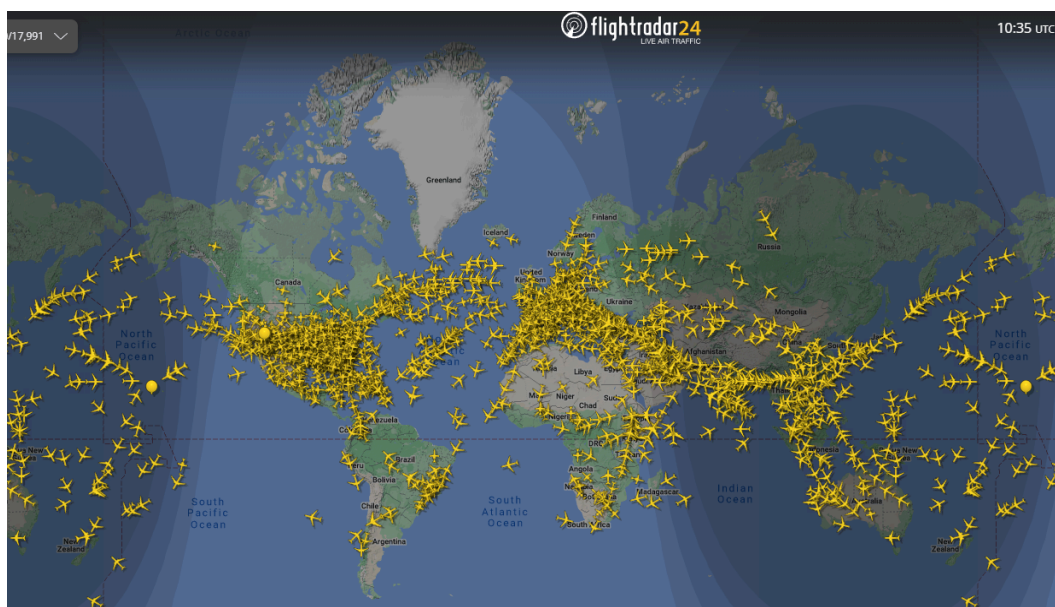


Figura 1. Captura del mapa mostrant 17.991 vols volant a les 10:35 UTC un 1 de març de 2024.

Font: FlightRadar24, <https://www.flightradar24.com>.

2.1.2 Pressió social i governamental per a la transició ecològica

La preocupació pel canvi climàtic, la petjada de carboni i el malbaratament de recursos generen una forta reacció creixent en els usuaris i clients que poden afectar en la reputació del transport aeri. A més, la imposició de taxes per compensar el carboni emès i l'increment del preu del petroli afecten directament augmentant els costos operatius.

Per fer front als objectius proposats per les autoritats globals (Comissió de la Unió Europea, EASA) en el Pacte Verd Europeu ("The European Green Deal"), l'aviació es presta a l'aplicació de mesures sostenibles com l'utilització de combustibles sostenibles que poden arribar a reduir en un 80% les emissions de Co2 respecte els combustibles fòssils. Altres mesures inclouen la renovació de flotes per més eficients, reciclatge de residus generats, l'aplicació de procediments específics que redueixen el consum com el Single Engine Taxi-In/ Out, Aterratges amb configuració de Flaps reduïdes o la recerca de projectes com el que motiva la realització d'aquest treball: els vols en formació.

2.2 Organització de l'espai aeri, concepte i marc regulatori

Per tal d'establir una operativa segura, eficient i organitzada de l'espai aeri compartit, és necessària l'estandardització dels procediments, divisions de l'espai aeri i procediments de separació i gestió del flux de trànsit aeri quedant recollit en el marc regulatori que es resumeix en aquest capítol.

EUROCONTROL i les principals entitats de serveis de navegació aeronàutica, per tal de densificar les rutes, poder aplicar els procediments que s'explicaran a continuació i poder reduir la separació entre aeronaus marca que es compleixin una serie de requisits que es basen en els pilars C.N.S (Communication, Navigation i Surveillance):

- Concepte aplicat de l'ús flexible de l'espai aeri, o entès com a espai que no es categoritza estrictament com a espai aeri militar o civil, sinó que és un espai continu que es pot modificar segons les necessitats militars i doncs restringir-lo o obrir-lo per augmentar la capacitat de les rutes.
- L'espai aeri ha de ser categoritzat mínim com a "C" per sobre de FL195: categoria que implica que els vols IFR i VFR estan permesos a volar sota autorització prèvia per part d' ATC i és aquest òrgan el que garantirà la separació entre els vols, les aeronaus disposen de ràdios de doble sentit i un transponedor que transmet en mode C com a mínim, és a dir, reporta l'alçada als receptors.
- Evolució del control de l'espai aeri estatal a àrees de blocs funcionals, control més enllà de les fronteres organitzat en blocs, divisió vista al mapa anterior d'Eurocontrol.
- Un sistema de ruta lliure entre waypoints o punts en ruta, que permeti ser vigilat via comunicació directa entre pilot i controlador i resolució de conflictes amb el SSR (secondary surveillance radar) a través del sistema TCAS, mencionat posteriorment,

- Una xarxa de rutes paral·leles unidireccionals de categoria RNAV 5, rutes ATS connectades al sistema de ruta lliure i compatible amb les rutes RNAV 1 properes a les àrees d'aproximació i a la navegació per vectors radar.
- Un esquema de nivells de vol segons el rumb que es vola, .
- Procediments estàndards de l' ATM de separació mínima, procediments de planificació de vol i la seva aprovació.
- Ús del sistema RVSM, reducció mínima de separació vertical, entre els FL 290 i 410.
- Requeriments mínims de PBN, filosofia que es basa en la capacitat, compliment i infraestructures per donar un nivell d'exactitud esperat pel que fa a la navegació i posició.

2.3 Aerovies i Rutes Aèries Superiors

L'espai aeri acumula un gran nombre d'avions volant al mateix temps en diferents direccions, velocitats i altituds, per a evitar conflictes i col·lisions entre avions i mantenir un flux de trànsit ordenat, les autoritats estableixen un compendi de normes que recull rutes i procediments que segons l'etapa del vol, marquen uns paràmetres de seguretat per mantenir la distància entre aeronaus i poder condensar el volum d'aeronaus que atravessen l'espai aeri concentrant-los en aerovies.

Les aerovies són unes rutes fixes entre punts ja sigui basats en radio-ajudes o punts ficticis especificats en coordenades i punts GPS que uneixen àrees controlades per ATC, que tenen un ample de 10 milles nàutiques o 19 km , amb un límit inferior des de 5000-7000 peus per distingir la classe d'espai aeri, les normes associades i els avions permesos a transitar-les, fins un límit superior de FL245. Es designen amb una lletra i un número, quedant així: "T857".

Més amunt de FL240 i fins FL460, es troben les denominades Rutes Aèries Superiors o Upper Air Routes, el control aeri per part d'ATS és obligatori per als que hi naveguen en aquesta franja i es classifica l'espai aeri com a C, detallat a continuació. Per aquestes rutes, es designa un prefix "U", que indica l'espai aeri superior / Upper, una lletra i un número. Tenint per exemple, la ruta mostrada al pla de vol aportat " UN858". [2]

En tot moment, les distàncies mencionades, és competència del controlador mantenir-les en la vigilància de vols sota normes de vol instrumental (IFR- Instrumental Flight Rules).

Els documents oficials de l'autoritat europea per la seguretat aèria (EASA), Eurocontrol i d'altres autoritats en coordinació y cooperació, recullen les següents normes de l'aire i distàncies mínimes que regeixen la separació dels avions.

En les regions blaves, l'ordre segueix la lògica de divisió EST-OEST, des de direccions 000° a 179° es vola a nivells imparells i des de 180° a 359° es vola a nivells parells.

CPT:	MAR24	LEMD 11.25/07 EDDL 13.48 14.48LT	319-1 EC ERA	CFM56-5B5 PER.FAC 3.1 CI 9		
	LEMDR14L.RBO2U.RBO.UN867.DGO.UL176.LUSEM..LULUT..ADABI..BOKNO..DIBES..TSU. UN858.VALEK.UM163.DIK.N853.ARCKY.T853.NVO.T857.BIKMU.BIKMU1X.EDDLR05R					
	F360 CEGAM/F380 RANUX/F370					
CRUISE CI 9	AVG.OAT	MAX.WS	AVG.GS	AVG.WC	TIME	DST
MACH AREA CI FLIGHT	M63	04	425	T20	02.11	927

Figura 3. Extracte d'un pla de vol amb les dades principals de la ruta Madrid - Dusseldorf.

Font: Pla de vol de companyia aèria.

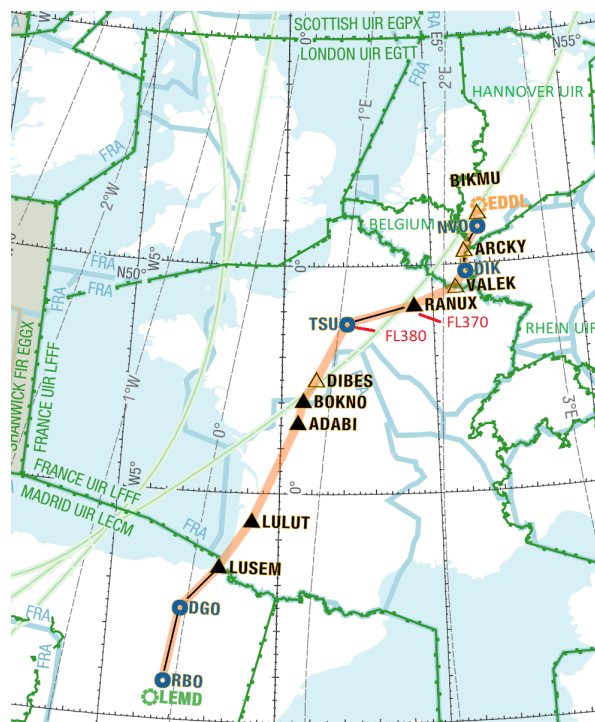


Figura 4. Captura de la ruta Madrid - Dusseldorf, punts de ruta, divisió de l'espai aeri i canvi de nivell de vol.

Font: Aplicació LIDO.

En el cas pràctic mostrat, s'observa en la Figura 3 i 4, d'acord amb la divisió de l'espai aeri i la regla dels nivells es veu com per passar a l'espai aeri belga canvia del nivell parell 380, al imparell 370 per a mantenir una separació mínima d'un nivell de vol o també 1000 peus en una referència baromètrica estàndard de 1013hPa. entre les aeronaus que volen en direccions contràries.

Hi ha dos motius que fan que existeixin uns valors mínims de separació entre aeronaus, el primer i més obvi és la seguretat i evitar la col·lisió, el segon i menys intuïtiu és evitar el fenomen conegut com a Wake Turbulence o Estela Turbulenta que genera un avió amb els vòrtex generats per la sustentació, fenomen que pot desestabilitzar i causar problemes com turbulència i pèrdua del control d'un avió que en pateixi els efectes per haver volat prop d'alguna aeronau. Més endavant en aquest treball, s'estudiarà els efectes negatius i positius dels efectes de l'estela turbulenta, efecte causant de l'estalvi de combustible en els vols en formació.

De manera generalitzada, ICAO va establir a través de les regles de l'aire que la distància entre aeronaus des de 1000 peus d'alçada o l'equivalent a 300 metres fins a nivell de vol 290 era com a mínim 1000 peus de distància, per sobre d'aquest nivell de vol, aquesta augmentava a 2000 peus. Amb l'evolució dels sistemes, es va dissenyar el sistema RVSM, acrònim de Reduced Vertical Separation Minima, que va ser aprovat i implementat desde l'any 2002. És un concepte que permet incloure 6 nous nivells de vol entre FL290 i 410, reduint els 2000 peus de separació entre les aeronaus a només 1000. Aquesta reducció beneficia als operadors permetint-los volar el més proper al seu nivell de vol òptim, resultant en un estalvi de combustible i augmentant la capacitat de les rutes ja que acumula més trànsits allotjats en els nous nivells de vol habilitats. Aquest concepte és possible degut al compliment d'una sèrie de requisits que assegurin la precisió del manteniment de l'altitud i la certificació dels equips requerits per a aquesta operativa [3],[4].

Els sistemes requerits per a poder volar en espai RVSM són:

- L'operador ha d'estar certificat per part de l'autoritat competent.
- Dos sistemes de mesura d'altitud independents
- Un sistema d'alerta d'altitud
- Un sistema de control d'altitud automàtic
- Un SSR- Secondary Surveillance Radar System, basat en la transmissió i recepció de dades a diferents freqüències codificades de l'aeronau i les properes i connectat al sistema de difusió d'altitud o conegut com a mode C.

2.5 Filosofia PBN per a la separació horitzontal

Tal com s'ha mencionat, el trànsit aeri és condensat i organitzat en aerovies donat que els usuaris compleixen amb els requisits PBN. El PBN és un sistema impulsat per l'OACI que dona la seguretat i confiança als pilots i controladors de que la posició esperada de l'avió és la mateixa dins d'uns límits de posició actual, lògica que s'il·lustra a la figura 5. Això s'aconsegueix amb els sistemes de l'avió, receptors GPS, Inercials, receptors de radio-ajudes, la vigilància de la navegació, monitorar i alertar si s'excedeixen els límits d'error en la precisió desitjada o es perd la capacitat de navegació. [5]

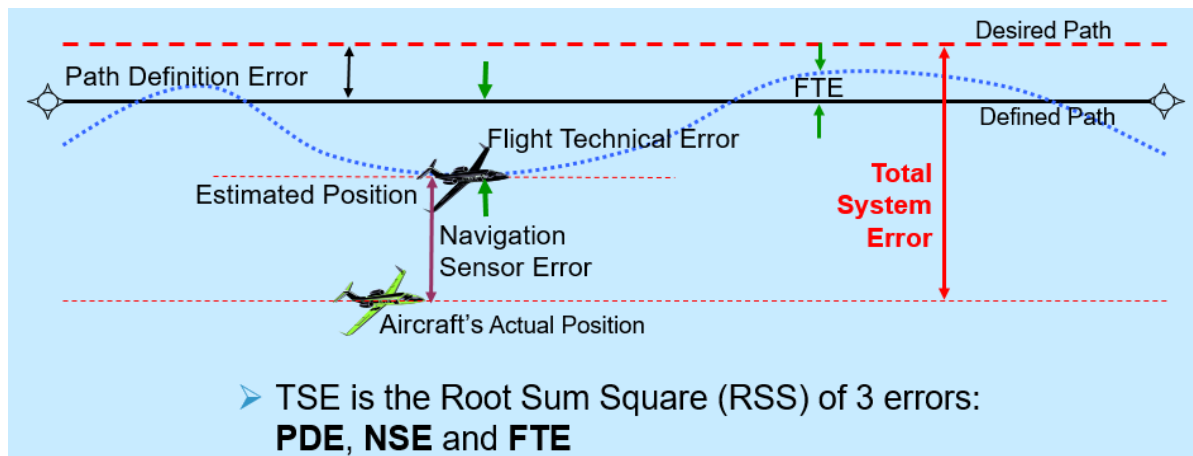


Figura 5. Il·lustració de la filosofia PBN, error estimat i posició actual.

Font: EUROCONTROL, [Navigation Performance](#).

Així doncs, el PBN es recolza en tres pilars [6]:

- Especificacions de navegació: Prestacions i requeriments per part de l'aeronau i les tripulacions que assegurin una correcta trajectoria del vol i la monitoratge de la integritat de la precisió per operar en rutes RNAV (Random Navigation, evolució de la navegació de radioajuda a radioajuda al nou sistema de punts aleatoris) .
- Aplicacions: Sistemes de rutes aplicats per l' ATS i seguits pels usuaris que han d'estar degudament qualificats per operar en procediments específics, STAR, SID, aerovies.
- Infraestructures: Totes aquelles fonts de senyals que permeten a l'aeronau determinar la seva posició, estacions VOR, DME, ILS, satèl·lits GNSS, radars primaris i secundaris.

Això permet que segons la ruta i la fase de vol es puguin reduir notablement les distàncies entre els avions i doncs poder augmentar la capacitat del sector aeri controlat.

Per exemple, en àrees terminals de rutes RNAV 1 es requereix un error que no superi +/- 1 NM el 95% del temps de vol per poder mantenir una separació horitzontal de 3 NM entre aeronaus. En les rutes RNAV 5, fases de vol en ruta i creuer, s'augmenta la precisió de +/- 5 NM per poder garantir una separació radar de 5NM. [7],[8].

Llavors, l'espai aeri PBN, el que regeix la normativa de separacions a Europa, EEUU i d'altres regions membres de l'OACI, queda separat per les següents precisions i distàncies mostrades a la Taula 1, d'acord al requeriment RNAV i la fase de vol:

Especificació de Navegació	Fase de Vol, Aplicació i Precisió Lateral de la Navegació (NM)							
	ATS o Rutes preferides per l'Usuari		Procediments d' Arribades	Aproximació				Procediments de Sortida
	En ruta Ocànica/ Remota	En ruta Continental	Arribades (STAR)	Inicial	Intermitja	Final	Frustrada	Sortides (SID)
RNAV 10	10							
RNAV 5		5	5					
RNAV 2		2	2					2
RNAV 1		1	1	1	1		1	1
RNP 4	4							
RNP 2	2	2						
RNP 1			1	1	1		1	1
RNP avançat	2	2 o 1	0,3	0,3	0,3		0,3	0,3
RNP APCH				1	1	0,3	1	
RNP AR APCH*				1-0,1	1-0,1	0,3-0,1	1-0,1	
Separació Segons la fase	20 NM o 15minuts	5 NM	5 NM	5 NM	5 NM	2,5 NM	2 minuts	2 minuts

Taula 1: Taula de l'error màxim requerit segons la fase en espai aeri RNP

Nota: Elaboració pròpia

A continuació, relacionant la Taula 1 amb l'aplicació pràctica que es mostra en la Figura 6 d'un vol en fase de creuer en ruta continental, volant sota requeriments RNP 2 on l'error màxim requerit és 2 NM i la precisió que ofereix l'avió és d'un error estimat de 0.08 NM, per tant es pot mantenir la separació longitudinal a 5 NM del precedent.



Figura 6. Captura de la MCDU mostrant l'aplicació real de l'error requerit PBN i l'estimat en espai aeri RNP 2.

Font: Pròpia

2.6 Rutes Oceàniques NAT-HLA

En el cas de les densament transitades rutes transatlàntiques i rutes objectiu del projecte a analitzar, s'aplica un procediment diferent per a mantenir la separació entre aeronaus. Aquest espai aeri es denomina NAT-HLA North Atlantic i High Level Airspace i compta amb procediments específics pel que respecta a comunicacions degut a la limitada cobertura d'estacions i radio-ajudes, equips mínims requerits per part dels avions, procediments de contingència i procediments de separació. Aquest espai aeri requereix del concepte PBN amb especificacions RNP 4 d'un error màxim permès de 4 NM, l'ús del CPLDC i comptar amb l'Automatic Dependant Surveillance mode C (sistema de transmissió de dades de l'aeronau automàtica, útil per als controladors i altres aeronautes) i 2 equips independents de navegació de llarga distància. [9]

En la distància vertical, ICAO dictamina l'aplicació de les següents distàncies:

- Cas A: 4000 peus per sobre de FL450, incloent-lo, entre avions supersonic i qualsevol altre aeronau.
- Cas B: 2000 peus al nivell 290 o superior.
- Cas C: 1000 peus, al nivell 290 i fins FL 410 inclòs, entre avions RVSM.
- Cas D: 1000 peus per aeronaus per sota de FL 290.
- Cas E: 2000 peus entre un vol en formació i qualsevol altra aeronau des de FL 290 en amunt.

Notes importants a destacar referents als vols en formació:

Els vols en formació es consideren NO-RVSM, per tant cal separar-los 2000 peus de la resta de trànsits.

Dos avions certificats en RVSM amb el manteniment de posició operant en un vol de formació en la mateixa ruta, mateixa altitud i amb una distància longitudinal de menys de 1 Nm, es consideraran com a un sol trànsit, per tant, sota autorització i respectant els 2000 peus dels procediments RVSM domèstics si s'escau, es pot aplicar una separació de mil peus entre el grup i qualsevol altre aeronau aprovada amb RVSM [10].

2.6.1 Separació Lateral

Les següents distàncies s'apliquen en el pla lateral per avions volant en un mateix nivell de vol [11]:

- **120 NM o 2 graus de latitud** entre aeronaus fora de l'espai aeri NAT-HLA o que no compleixin amb les especificacions de navegació requerides.
- **60 NM o 1 grau de latitud** entre aeronaus certificades per operar en aquest espai aeri i els seus requeriments.

- **50 NM** entre aeronaus certificades amb RNP 10 i 4 operant en les regions d'entrada i sortida a l'espai aeri oceànic de Santa Maria, Reykjavik, Nova York, Bodø (veure divisió dels espais aeris que es mencionen en la Figura 7).
- **30 NM** entre aeronaus operant sota control ATC o avions operant a l'espai oceànic de Nova York, certificats amb RNPi 4, sessió iniciada i en comunicació via CPLDC i transmissió de dades en ADS-C amb un avís per a desviacions de 5 NM establert el contracte per events.
- **23 NM** entre aeronaus operant en espai oceànic de Gander, Reykjavik, Santa Maria i Shanwick, autoritzats al RNP 4, CPDLC , ADS-C i sessió iniciada i en comunicació via CPLDC i transmissió de dades en ADS-C amb un avís per a desviacions de 5 NM establert el contracte per events.
- **20 NM** mentre un dels trànsits es troba en ascens o descens a través del nivell d'un altre avió i ambdòs avions estan certificats per RNP 2 o equips GNSS.
- **19 NM** entre avions que les seves trajectòries no es creuen, l' ATS monitora les rutes mitjançant els seus sistemes de vigilància i s'estableix una alerta d'un marge de 3 NM de desviació.
- **15 NM** si es donen els requisits anteriors, si la densitat de l'espai aeri mesurat en ocupació és menor a 0.6 i si és possible la comunicació directa via VHF entre el controlador i els pilots.
- **7 NM** en el cas d'ascens o descens d'un dels avions a través del nivell de vol de l'altre, compleix amb les especificacions RNP2 i es manté comunicació directa VHF controlador-pilot.



Figura 7. Divisió de l'espai aeri Atlàntic Nord.

Font: Civil Aviation Safety Authority, CASA, [North Atlantic high level airspace operations](#).

2.6.2 Separació Longitudinal

Pel que fa a la distància en el pla longitudinal, el que diferencia dels procediments de separació utilitzats per àrees continentals, és la separació longitudinal per minuts i no per milles nàutiques mitjançant la tècnica del Mach Number. Tècnica que consisteix en ajustar els avions assignant-los unes velocitats referenciades en número de Mach o relativa a la velocitat del so que garanteix la distància estàndard segons cada cas representada en minuts entre dos avions volant en un mateix nivell i ruta. Aquesta tècnica es recolza en les hores estimades al següent punt i les hores reals al que el punt s'ha sobrevolat, això dona les eines necessàries per a que l'ATC gestioni i asseguri els paràmetres de seguretat.

Les distàncies mesurades en temps depenen dels següents casos:

- **60 minuts** entre espais aeris restringits en moviment.
- **30 minuts** entre aeronaus diferents als turboreactors.
- **15 minuts**
- **10 minuts** entre avions en la mateixa ruta o rutes que creuen, donat que compten amb ADS-C sota un contracte de informes de posició no més enllà d'interval de 20 minuts o sota vigilància i cobertura d'ATC.
- **10 minuts** si s'aplica la tècnica del número de Mach, si mantenen la mateixa ruta o rutes divergents.
- **9** si s'aplica la tècnica de Mach i el precedent va a un Mach 0.002 més ràpid.
- **8** si s'aplica la tècnica de Mach i el precedent va a un Mach 0.003 més ràpid.
- **7** si s'aplica la tècnica de Mach i el precedent va a un Mach 0.004 més ràpid
- **6** si s'aplica la tècnica de Mach i el precedent va a un Mach 0.005 més ràpid
- **5** si s'aplica la tècnica de Mach i el precedent va a un Mach 0.006 més ràpid.
- **5 minuts** si les aeronaus implicades operen en espai oceànic Gander, Santa Maria, Reykjavik i Shanwick, certificats RNP4 I 10, i connectats satisfactòriament al sistema de comunicacions CPLDC i ADS-C.

De no aplicar la tècnica de Mach o separació per temps, s'apliquen les següents distàncies longitudinals entre avions que volen en les mateixes rutes o que es creuen:

- **50 NM** entre avions turboreactors que operen completament en l'espai oceànic de Nova York i estan certificats en RNAV 10 o RNP 4, CPLDC i ADS-C.
- **30 NM**: entre avions turboreactors que operen completament en l'espai oceànic de Nova York i Santa Maria, estan certificats en RNAV 10 o RNP 4, CPLDC i ADS-C.
- **20 NM** entre aeronaus en la mateixa ruta, donat que la separació és comprovada obtenint simultàniament lectures del sistema GNSS dels avions en intervals de temps.
- **17 NM** entre aeronaus que volen la mateixa ruta o es creuen, donat que l'angle entre les rutes és menor a 90 graus dins de l'espai de Gander, Shanwick i Santa Maria, sota operació RNP 4 O 2, CPLDC i la posició s'obté mitjançant els equips de vigilància d'ATS.

- **14 NM** entre aeronaus que volen la mateixa ruta o es creuen, donat que l'angle entre les rutes és menor a 45 graus dins de l'espai de Gander, Shanwick i Santa Maria, sota operació RNP 4 O 2, CPLDC i la posició s'obté mitjançant els equips de vigilància d'ATS. [12]

2.7 Polítiques de combustible per a la planificació d'un vol

Igual que els procediments de navegació, la planificació del vol i la previsió del càlcul de combustible compta amb uns estàndards mínims per a la seguretat de l'operació del vol, assegurant el combustible suficient per arribar a la destinació o de no ser possible, a un alternatiu amb garanties. Aquesta planificació es farà d'acord amb les informacions obtingudes sobre la meteorologia de l'aeroport d'origen, destí, alternatiu i ruta, els espais aeris restringits i les característiques del vol com poden ser el pes, el nivell de vol, les limitacions de l'avió, entre d'altres.

La política de combustible estableix que un operador, a l'hora de planificar el vol ha de calcular les quantitats de combustibles per a les següents etapes i característiques del vol [13]:

- Taxi/ rodatge: inclou el combustible necessari abans d'enlairar, des de l'aparcament fins a la pista.
- Trip / trajecte: comprèn el combustible necessari per enlairar-se, ascens, creuer, descens, aproximació i aterratge.
- Reserva, desglossat en:
 - a) combustible de contingència:
 - el major de: 5% del trajecte o 5 minuts volant en esperes a 1500 peus a l'aeroport de destinació
 - 3 % si es compta amb un aeroport alternatiu en ruta
 - b) combustible del trajecte a l'alternatiu
 - c) reserva final, equivalent a volar 30 minuts d'esperes a 1500 peus sobre la destinació.
 - d) adicional: quantitat afegida per a operacions específiques, illes remotes sense alternatius, operació ETOPs, operació especial per desviació de la configuració de l'avió com volar amb el tren baixat o volar a nivells més baixos.
- Extra: combustible adicional a discreció del comandant.

Quedaria així un exemple d'una planificació de combustible per a un vol de Madrid a Venècia, on s'ha planificat combustible adicional per un sistema diferit per manteniment que fan incrementar el consum un 4 % com es mostra a la Figura 8:

MAX.WS	AVG.GS	AVG.WC	TIME	DST
02	412	117	02.08	879
TAXI+APU	00.12	240		
TRIP	02.08	6870		
HOLD LIPZ	00.00	0		
CONTINGENCY	00.05	250 / MIN		
ALT LIPQ	00.27	1520		
FINAL RES	00.30	1430		
ADDITIONAL	00.06	275		
UNUSABLE		0		
EXTRA		0		
TANKER		0		** ECAM MSG WING A ICE R VALVE OPEN - MEL 30-11-01A - **
DISC		0		** INCREMENTADO CONSUMO 4% **
				MEL/CDL 98-98-10
RAMP FUEL		10310		MEL 98-98-10 FUEL CONSUMPTION PERCENT INCREASE (1.00%)
MIN FUEL ALTN LIPQ		2950		MEL 98-98-10 FUEL CONSUMPTION PERCENT INCREASE (3.00%)

Figura 8. Extracte d'un pla de vol amb les dades del combustible total requerit desglossat d'un vol.

Font: Pla de vol d'una companyia aèria.

La proposta de volar en formació implica un estalvi del combustible i requerir menys combustible comporta reduir el pes de l'avió, millorant l'eficiència i permetent més càrrega transportada mentre que s'abaraten els costos operatius.

2.8 Conceptes teòrics clau

2.8.1 Biomimètica aplicada a l'aeronàutica

All llarg de la història de l'aviació s'ha dut a terme la biomimètica, estudi que cerca observar i imitar el comportament de la naturalesa per a replicar comportaments o la producció de sistemes i estructures. En aquest àmbit parlem dels ocells, des del disseny de les ales i el vol de les aus rapinyaires aprofitant les tècniques fins a la tècnica d'aterrar tant característica del cigne en un llac, a continuació s'observa la similitud de la tècnica en les figures 9 i 9.1.



Figura 9. Imatge de la tècnica aterratge d'un cigne.

Font: Franz Schallmeiner, [Unsplash](https://unsplash.com/photos/5333333333).



Figura 9.1. Imatge de la tècnica d'aterratge d'un A330-200

Font: Elaboració pròpia

En aquest projecte, la biomimètica s'ha centrat en el vol en formació de les aus migratòries, en especial les oques i el seu particular vol en V aprofitant els beneficis aerodinàmics d'aquesta formació que els permet volar distàncies majors amb un desgast energètic menor (veure Figura 10).

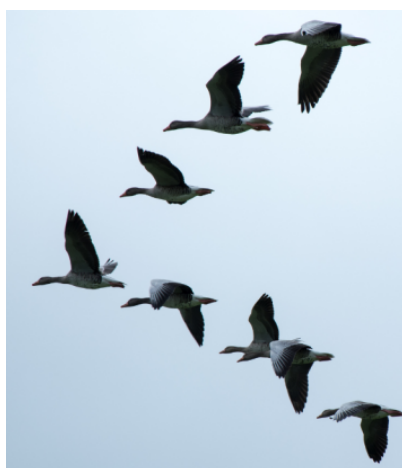


Figura 10. Vol en formació de les oques aprofitant els beneficis aerodinàmics.

Font: My Nature Nook, [Why do geese fly in a V shape? - Nature Study Made Easy](#)

2.8.2 La sustentació

La sustentació és la força perpendicular a la direcció del fluid que es genera al desplaçar-se a través d'ell. Com reflexa la biomimètica, el disseny de les ales dels avions ve inspirat en les ales dels ocells, elements causants de la força de sustentació que els manté enlairats.

Per entendre el motiu de l'estalvi de combustible, cal entendre el principi de la sustentació. Resumint-lo amb la il·lustració, l'aire en ser pertorbat per les ales ha de viatjar per damunt de l'ala (amb una corba major) i per sota (més plana). Han d'arribar a la vora posterior alhora, cosa que implica que l'aire de la part superior ha de viatjar a una velocitat major per recórrer més distància i arribar al mateix moment que l'aire inferior. Aquest fenomen, sota la llei de dinàmica de fluids fa modificar el valor de les dues pressions estàtiques que empenyen l'ala cap amunt i avall al mateix temps.

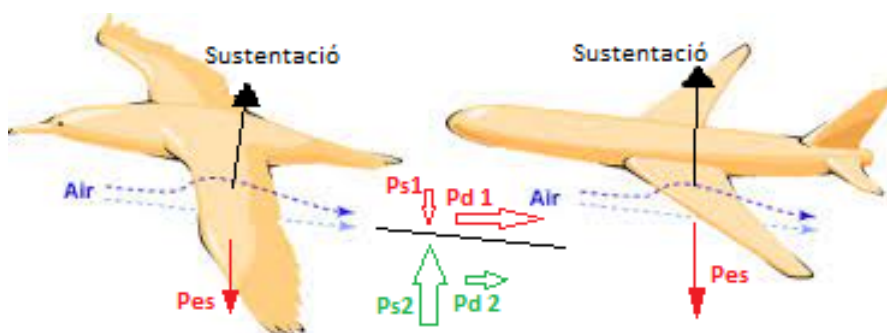


Figura 11. Il·lustració de les forces i pressió en l'ala en el pla vertical.

Font: Modificada de la font [Bird Flight](#), CJ Kazilek, 2009.

Tal com es mostra a la Figura 11, la pressió total es manté constant si res l'altera i n'és la suma de la pressió estàtica i la pressió dinàmica. En aquest cas, la pressió total de la part superior de l'ala veu com augmenta la pressió dinàmica degut a l'acceleració de l'aire i doncs l'estàtica baixa. L'efecte resultant és un desequilibri dels valors de la pressió estàtica entre ambdues parts a favor de la inferior, que exerceix una força en direcció perpendicular a l'eix de l'ala cap amunt denominada Sustentació.

La sustentació es calcula amb la següent fórmula:

$$L = \frac{1}{2} \times \rho \times CL \times A \times v^2$$

Les variables que la conformen són:

- **L:** Lift/ Sustentació, mesurada en Newtons o Lliures.
- **ρ :** densitat de l'aire, mesurada en quilograms per metre cúbic.
- **CL:** Coeficient de Sustentació, quantitat no dimensional que quantifica les característiques del cos causant de la sustentació i té en compte diferents paràmetres (perfil alar, angle d'atac, entre d'altres).
- **A:** Àrea total de l'ala, en metres quadrats.
- **v:** velocitat de l'aire que passa al voltant de l'ala, en nusos.

Cada variable juga un paper clau en l'aportació a la sustentació, modificant proporcionalment l'efecte si se'n modifiquen les característiques d'algun paràmetre.

2.8.3 Vol en formació

El vol en formació es basa en principis aerodinàmics observats en la natura, especialment en aus migratòries. Quan les aeronaus volen en proximitat, la pertorbació de l'aire generada per l'aeronau líder pot ser utilitzada per les seguidors per reduir la seva resistència aerodinàmica.

És una tècnica de vol que va ser imitada inicialment per l'aviació militar per estratègies de vol tàctica, interceptació d'aeronaus o seguiment i acompanyament, acrobàtica per l'atractiu visual i ara es vol implementar en l'aviació comercial per la reducció d'emissions.

Segons el Butlletí Oficial de l'Estat: "El vol en formació ve definit per un vol en el que hi participen més d'una aeronau que , sota acord entre tripulants i el proveïdor de serveis aeronàutics , operen com una sola aeronau a efectes de navegació aèria i informació de posició."

En l'àmbit militar, les aeronaus volen a menys d'una milla nàutica i menys de 100 peus entre si. En la proposta de l'aviació comercial, les distàncies es veurien modificades per a assolir el posicionament òptim. [14]

2.8.4 Els vòrtex

Un cop definit el concepte de la sustentació, el fenomen explicat a continuació dona sentit a la proposta de volar en formació. La conseqüència del diferencial de pressions, a més de la sustentació, és la generació dels coneguts Vòrtexs. Els vòrtexs són producte de la pertorbació de l'aire, són fluxos d'aire de sota l'ala que volen passar a la part superior i ho fan a través de la via més fàcil i curta, les puntes de l'ala, on la superfície alar és menor. La rotació circular del vòrtex i el moviment rectilini de l'aeronau donen forma d'espiral a la denominada estela turbulenta, conegut en anglès com a Wake Turbulence.[15]

La intensitat del vòrtex està relacionada directament amb la superfície alar, el pes de l'aeronau, la velocitat i la densitat de l'aire en el que actua. [16]

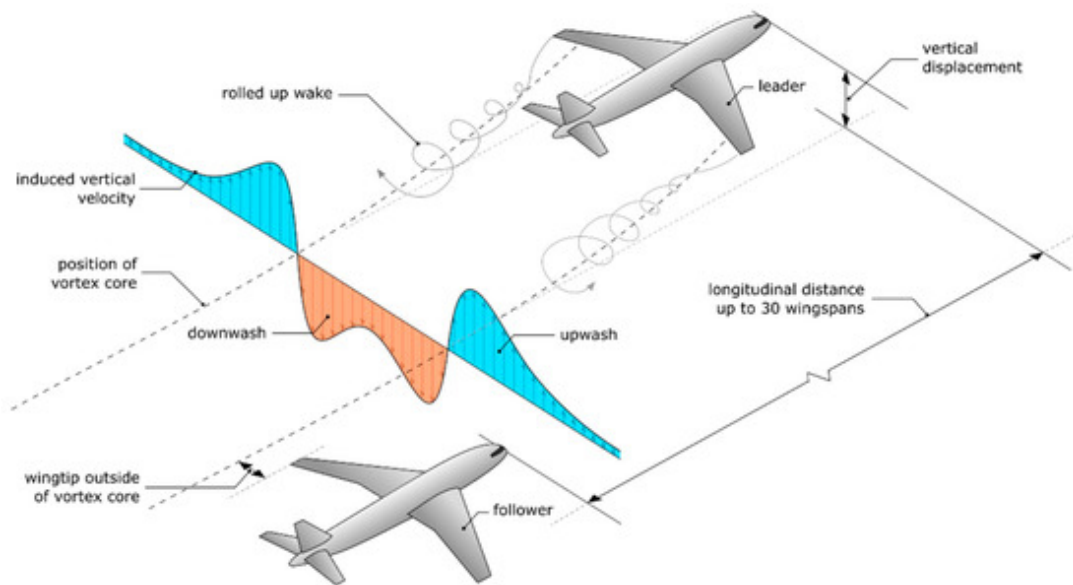


Figura 12. Il·lustració de l'efecte de la sustentació i el vòrtex generats per les aeronaus.

Font: [Climate Impact Mitigation Potential of Formation Flight](#), Gener 2021, Marks, T., Dahlmann, K., Grewe, V., Gollnick, V., Linke, F., Matthes, S., Stumpf, E., Swaid, M., Unterstrasser, S., Yamashita, H., & Zumegen, C.

Aquesta estela que es vol aprofitar pot tenir dos efectes diferents segons la incidència:

1. Efectes negatius i perjudicials que fan desestabilitzar el vol de l'aeronau que segueix al precedent si entra en el vector descendent del vòrtex.
2. Un risc en la seguretat del vol, generant més resistència i doncs, incrementant el consum tal com seria la franja taronja de la Figura 12.
3. Efectes positius i beneficiosos si s'aprofita la corrent ascendent de l'espiral, franja blava de la il·lustració. Una força amb vector vertical ascendent que en sumar-se a la força de sustentació alleugera la lluita de forces Pes-Sustentació traduint-se en un esforç menor en la potència produïda pels motors, relacionat directament amb un consum disminuït.

2.8.5 Densitat de l'aire i l'efecte en el vol en formació

La densitat de l'aire es defineix com la quantitat de massa d'aire per unitat de volum, n'és el medi natural pel qual es desplacen les aeronaus.

Com s'ha esmentat, cada variable de la fórmula de la sustentació juga un paper clau en la modificació del resultat. En l'exemple anterior dels vòrtex, l'efecte beneficiós se sumaria a la variable CL (on s'inclou la potència lliurada pels motors i la minvaria per mantenir el mateix resultat). La densitat de l'aire, a l'igual que la temperatura i la pressió, minva amb l'altura. L'aire, a mesura que puja l'altitud conté menys partícules o massa per volum i doncs, ofereix menys resistència a les aeronaus que l'atravessen, d'aquí que els avions volin a altituds generalitzades de 36.000 peus.

No obstant, per aquest mateix fet els vòrtex són més febles a alts nivells de vol en comparació a nivells inferiors i és per aquest motiu que els efectes del vol en formació són més notables en cotes més baixes. Aquest argument pot fer creure que dona la ràpida solució de creuar l'atlàntic amb una parella d'avions a uns nivells de vol llunyanament inferiors dels òptims als que es vola en l'actualitat, des de nivell de vol 330 fins a FL 450, per aprofitar els vòrtex més intensos. Però el consum a aquestes cotes més baixes augmenta exponencialment impossibilitant arribar a destí amb el combustible planificat sumat al fet que només un actor de la parella se'n beneficia de la formació.[17]

2.9. Estudi de cas: Projecte Fello' Fly

Les organitzacions aeronàutiques tenen com a missió donar resposta a la capacitat, seguretat i eficiència, i donat que l'augment de capacitat per la via de l'increment de recursos no és viable, s'inicia una cursa per desenvolupar les solucions més òptimes i viables que permetin augmentar la capacitat de l'espai aeri de manera viable i sostenible.

2.9.1 Descripció del projecte

Recentment, ha sorgit i es troba en procés d'experimentació un projecte innovador, amb objectius econòmicament i ecològicament ambiciosos que vol demostrar la viabilitat tècnica, operacional i comercial de fer volar dos avions a prop en formació en un vol de durada considerable de mig i llarg radi, a partir de les 5 hores. És un projecte propulsat per l'empresa Airbus que lidera la recerca i investigació de l'evolució del món aeronàutic en col·laboració amb altres empreses referents del sector com són;

- ❖ Autoritats aèries:
 - IAA (Irish Aviation Authority)
 - DGAC (Direction Générale d'Aviation Civile, France)
- ❖ Organitzacions de Serveis Aeronàutics:
 - EUROCONTROL
 - NATS (National Air Traffic Services,UK)

- Navcanada
- DSNA (Direction des Services de Navigation Aérienne, France)
- ❖ Aerolínies:
 - Scandinavian Airlines Systems, SAS
 - Frenchbee

Airbus proposa ajuntar parelles de vols per aprofitar els beneficis dels vols en formació. Amb aquesta tècnica, segons han demostrat en els vols de prova, s'arriba a estalviar entre un 5 i un 10% en vols de llarga durada com serien els que creuen l'Atlàntic. Aquest estalvi s'aconsegueix reduint les distàncies i aplicant una tècnica de posicionament òptima que aprofiti les avantatges aerodinàmiques del vol en formació.

El vol de prova s'ha dut a terme amb dues aeronaus A350 volant entre els aeroports de Toulouse, França i Montreal, Canadà, creuant l'espai aeri de Brest (França), Shanwick (Regne Unit), Gander i Montreal (Canadà). Els detalls del vol no s'han fet públics, per tant en aquest treball es parteix del desconeixement del nivell de vol, la velocitat i la configuració pel que fa a pes i centre de gravetat de les aeronaus implicades. [18]

El projecte implica la coordinació entre els diferents òrgans implicats, un d'ells el conformen la parella d'avions, un altre la parella i l'ATC i el darrer seria els dos planificadors dels vols a unir. Aquesta col·laboració de la indústria ha estat possible gràcies a les entitats que han participat en l'experiment, un grup que l'han conformat aerolínies, empreses del control aeri i les autoritats reguladores. [19]

Des de la preparació fins a l'execució, el vol Fello' Flight segueix els següents passos:

1. Els despatxadors de vol planifiquen un vol regular afegint-li l'opció del programari Fello'Fly creat per Airbus, un programari que analitza i quantifica les probabilitats d'emparellar el vol amb el d'una altra companyia.
2. Donades les probabilitats i les rutes generades, el despatxador selecciona la més adient d'acord a la meteorologia, costos i potencial emparellament. Una vegada generat el pla de vol, s'envia a control aeri esperant l'aprovació i mostrant la intenció de volar en formació.
3. L'aplicació d'emparellament estableix un ranking de probabilitat de succeir.
4. Els vols implicats, s'enlairen en els seus horaris respectius com en un vol regular, havent carregat el combustible necessari sense saber la seva posició en el vol, seguidor, líder o en solitari.
5. Una vegada enlairats, l'eina d'emparellament analitza les millors opcions segons les dades reals dels vols i es confirma la informació als pilots sobre l'aprovació del vol Fello' Fly, l'hora i punt de trobada i la seva posició a ocupar.
6. L' ATC s'encarrega de gestionar els trànsits donant-los les autoritzacions de nivell de vol i el punt, on els pilots es comprometen a arribar mitjançant la funció del programari de l'avió RTA- Required Time of Arrival, que ajusta la velocitat d'acord a l'hora indicada. Cal destacar que en aquesta autorització, l'ATC ordena una separació inicial de 1000 peus entre els nivells que els ha instruït.

7. Un cop sobrevolat el punt, els avions es troben a les distàncies estàndards de fins a 20 o 30 NM, que mitjançant la tècnica de MACH, les aeronaus s'aproximen fins a una distància d'entre 0,8 Nm 1,5 Nm (1,48 Km - 3 Km), un fet innovador en la navegació en ruta.
8. Aconseguida la situació de trobada, la responsabilitat de la separació entre les aeronaus és transferida al parell d'avions per part d'ATC. A partir d'aquí, el conjunt vola cooperant i és el líder qui manté les comunicacions amb control que tracta a la parella d'aeronaus com a un sol trànsit.
9. Per part del seguidor, se separa 3 Nm lateralment, ascendeix al nivell de vol del líder i mitjançant una nova funció anomenada "OPTI" [19], a través dels nous models d'alerons amb servos elèctrics dels A350 que detecten la força que reben del vòrtex i ajusta el vol cap a una posició òptima on aprofita l'estela turbulenta amb el corrent ascendent i comença a gaudir de l'estalvi. De perdre la posició òptima, el sistema és capaç d'ajustar fins a 5° per recuperar-la, però si s'excedeixen o es detecta una situació d'inestabilitat, té una funció d'escapament per separar-se de nou les 3 milles i tornar a guanyar la posició en formació.
10. En el moment que la parella ha de separar-se per prosseguir cap a les seves respectives destinacions, el seguidor torna a separar-se en una posició estàndard pel que fa a les regulacions d'avui en dia i es trenca la formació tot mantenint les distàncies mínimes establertes, donant per finalitzat el vol en formació i l'operació Fello' Fly.

2.9.2 Aportacions

És un projecte ambiciós que presenta un gran nombre d'avantatges i oportunitats, que pretén despertar l'interès dels clients amb l'atractiu de les següents aportacions:

Estalvi de combustible, reducció de les emissions i costos derivats

En la literatura revisada d'Airbus [19] s'ha reportat després de dur a terme el vol de prova que l'estalvi efectiu de combustible oscil·la entre un 5 i un 10 %, un estímul prou fort per a les aerolínies destinen fins a un 50% dels seus costos operatius en combustible. Però és un assoliment que va més enllà dels beneficis econòmics d'abaratir els vols.

Si es té en compte el volum d'avions diaris que vola només en la regió Atlàntica (cas d'estudi d'aquest treball) i se'n redueix fins a un 10% el consum, implica que les emissions nocives cap al medi ambient es redueixen proporcionalment i és aquest un dels objectius implícits del repte que aporta un benefici social en temps de preocupació climàtica.

A més, aprofitar la sustentació i alliberar al motor de cert percentatge de potència per mantenir la sustentació afecta directament al manteniment de les components de l'avió, fent-los més eficients i allargant la vida útil d'un element d'essencial cura.

Densificació i ús òptim de l'espai aeri

Pel que fa a la densificació i congestió de l'espai aeri, en el procediment i segons les regulacions d'ICAO, una parella d'avions ocupa l'espai aeri com a un sol trànsit, fet que permet densificar més les rutes sense augmentar la càrrega del controlador i fer-ne un ús més òptim d'un recurs limitat com n'és l'espai aeri.

Unificació del sector i impuls per a la col·laboració

Tal i com destaca el líder de la demostració de Fello' Fly, Nick Macdonald : “En la indústria aeronàutica, aconseguir els objectius de reducció de les emissions requerirà implementar noves vies d'utilització dels avions en el cel. La col·laboració amb les aerolínies i els proveïdors de serveis d'aeronavegació en el projecte fello' fly mostra que el sector està fent bons esforços cap als objectius plantejats”. Una cita que mostra la motivació per fer-ne de l'espai aeri un espai únic i d'associació amb una actitud de progrés en equip cap a uns objectius comuns, una oportunitat per aquest projecte d'obrir noves relacions cap a l'evolució.

2.9.3 Implicacions i barreres del projecte

Un vol es desenvolupa en un medi molt hostil ple d'amenaques que van des d'atmosferes inestables, meteorologia adversa, fins a d'altres avions volant al voltant en el que un error o una situació no controlada pot desencadenar en conseqüències fatals per als usuaris.

És per això que la idea d'apropar dos avions que volen aproximadament 1000 km/h pot resultar una gran amenaça i posar en risc la idea del Fello' Fly. Un risc que s'ha de minimitzar i afrontar amb les mesures de seguretat apropiades.

Meteorologia

Ja per si sola la meteorologia suposa una amenaça per als milers de vols individuals que operen en vols continentals i transoceànics. Si un vol en formació es troba amb meteorologia adversa en forma de turbulències d'aire clar, nuvositat convectiva es pot perdre el control i manteniment de les altituds objectiu fent perdre milers de peus, posant en risc el poc marge amb el que compten les aeronaus volant en formació.

A més, donat el freqüent cas de trobar-se amb una línia de turbonada com la que es representa en la Figura 13, en termes meteorològics anomenat squall line amb unes dimensions que poden oscil·lar des de 50 NM fins a més de 300 NM com es pot veure en la captura del radar meteorològic sobre l'atlàntic a l'est del Mar Carib, significa que les aeronaus han de desviar-se de la seva ruta. La desviació del líder pot diferir per interessos comercials i destinació final de la del seguidor, havent de prendre rutes divergents i deixant el Fello' Fly enrere.

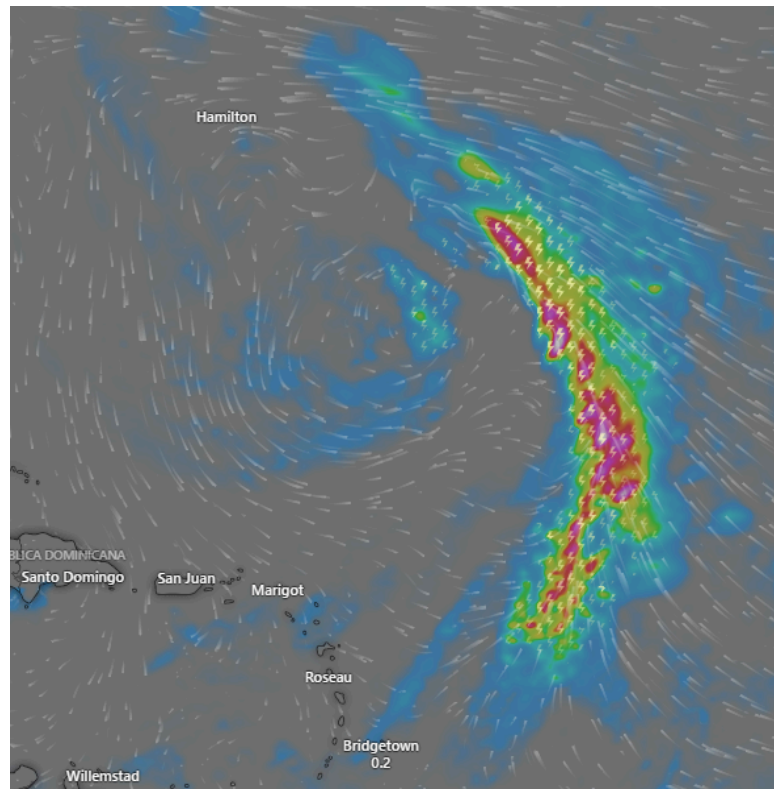


Figura 13. Captura del radar mostra activitat convectiva i de tempestes a l'est del Mar Carib

Font: Windy, <https://www.windy.com/ca>

Excessiva proximitat, TCAS

Fins l'actualitat, els estàndards de distàncies de seguretat gràcies a la precisió de navegació dels avions, els sistemes de vigilància, els procediments de control han permès mantenir una separació segura i prou mínima entre els trànsits, però a vegades s'ha traspassat alguna d'aquestes barreres de seguretat i la següent ha hagut d'actuar.

En la xarxa de seguretat, la primera barrera la conforma l'estratègia de la separació per milles, la segona la complexa tàctica de l'ATC i la tercera barrera de seguretat és un sistema anomenat TCAS- Traffic Collision Avoidance System que actua quan un avió s'apropa de manera perillosa a la zona segura d'un altre.

El TCAS com bé mencionen les seves sigles en anglès, és un sistema per evitar les col·lisions entre avions i té tres funcions:

1. Detecta i mostra les aeronaus de l'entorn que disposen d'un transponedor.
2. Calcula i mostra possibles amenaces de col·lisió.
3. Activa ordres de velocitat vertical per evitar col·lisions.

La capacitat de detecció del TCAS està limitada als intrusos que volen dins d'una distància màxima de 30 NM a cada costat i aproximadament de 30 NM a 80 NM longitudinalment (segons la configuració de l'aeronau i les condicions externes), i dins d'un rang altitudinal màxim de 9.900 peus per sobre i per sota de l'aeronau.

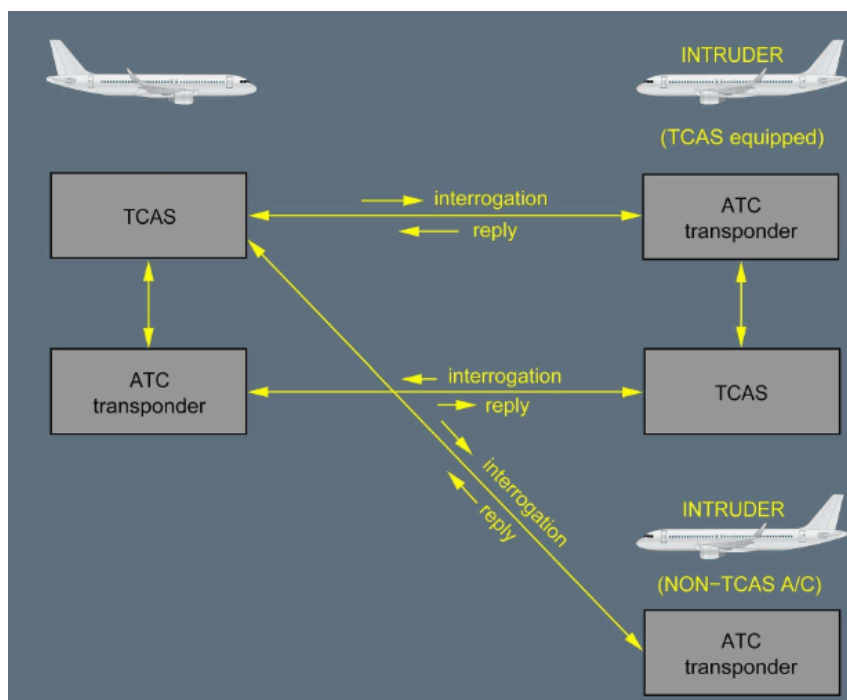


Figura 14. Il·lustració del sistema de comunicació entre els TCAS de diferents aeronaus.

Font: Manual d'Airbus.

Aquest sistema obté les dades transmeses pels transponders de les aeronaus properes i utilitza aquestes dades per avaluar possibles amenaces de col·lisió (veure Figura 14).

El TCAS determina:

- La direcció dels intrusos, en relació amb la direcció de l'aeronau.
- La distància entre l'aeronau i els intrusos, i la tendència de separació o aproximació.
- L'altitud relativa dels intrusos, si els intrusos informen de la seva altitud a través d'un transponder Mode-C o Mode-S.

A continuació, el TCAS calcula la trajectòria dels intrusos, el Punt Més Proper d'Aproximació (CPA), i el temps estimat (TAU) abans d'arribar al CPA (veure Figura 13).

El TAU, Time to Alert Unresolved o temps fins l'alerta sense resoldre, és la relació entre la distància que separa les dues aeronaus i la suma de les seves velocitats, amb l'altitud augmenta .

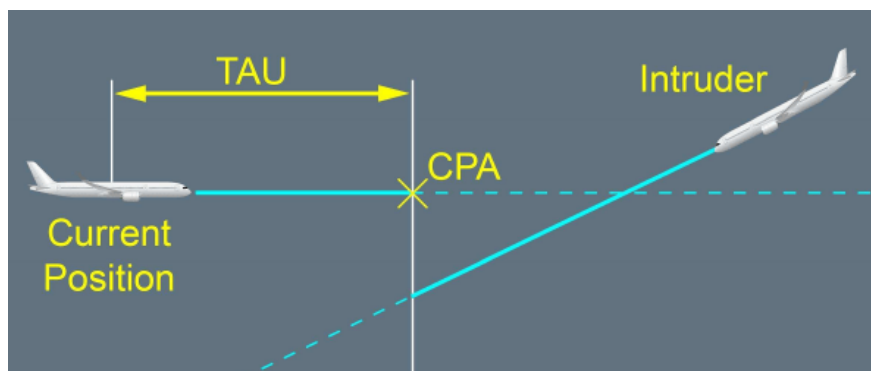


Figura 15. Il·lustració representativa del marge del sistema TCAS.

Font: Manual d'Airbus.

Si el TCAS detecta que la trajectòria d'un intrús pot ser una amenaça de col·lisió, activa:

- Senyals acústiques i visuals.
- Ordres de velocitat vertical en coordinació i contràries a les del TCAS de l'intrús, per assegurar una separació de trajectòria suficient i una variació mínima de velocitat vertical tenint en compte tots els intrusos.

Es consideren intrusos aquells trànsits que entrin dins del rang de les 4 zones de la Figura 16 que es delimiten segons l'amenaça :

1. Resolució d'Alerta (RA) - Resolution Advisory (RA)
2. Alerta de Trànsit (TA) - Traffic Advisory (TA)
3. Intrusos pròxims - Proximate intruders
4. Altres intrusos - Other intruders

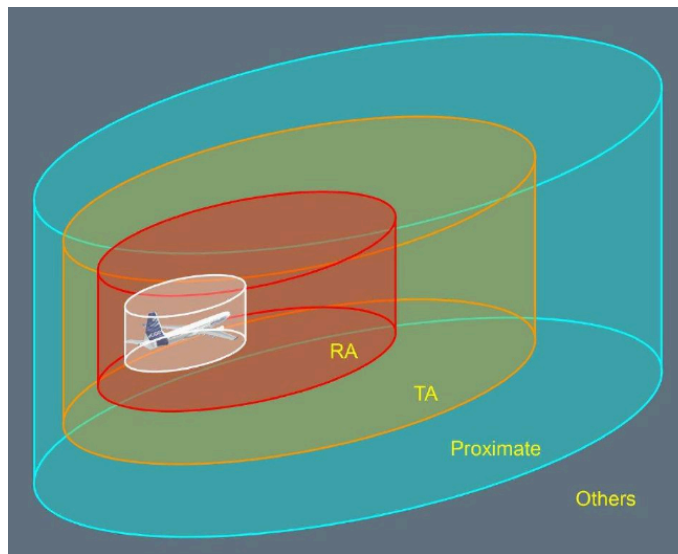


Figura 16. Il·lustració representativa de l'àrea divisòria per a la classificació de l'intrús

Font: Manual d'Airbus.

La Taula 2 especifica les característiques de cada classificació:

Lògica del TCAS			
Classificació	Posició de l'intrús.	Informació mostrada i missatges d'alerta	
Altres intrusos	Sense amenaça de col·lisió. Qualsevol intrús no pròxim, TA, RA dins de l'àmbit de vigilància (rang lateral: més a prop de 30 NM).	Navigation Display (ND) : Mostra la posició de l'intrús	 -17↑
Pròxims	No és amenaça de col·lisió. Intrús a la proximitat de l'A/C (més proper de 6 NM lateralment i ±1 200 peus verticalment).	ND Pantalla de Navegació: Mostra la posició de l'intrús	 -10↑
TA Alerta de Trànsit	Amenaça potencial de col·lisió. El TAU és d'aproximadament 40 segons.	ND: Posició de l'intrús Missatges auditius: " TRAFFIC, TRAFFIC"	 -09↑
RA Alerta de Resolució	Amenaça real de col·lisió. El TAU és d'aproximadament 25 segons.	ND: Posició de l'intrús Missatges auditius (entre les 13 que hi ha): "CLIMB, INCREASE CLIMB", "DESCEND, INCREASE DESCEND", LEVEL OFF Primary Flight Display- Pantalla de vol principal : Ordres verticals Mantenir la V/S actual (Advertència Preventiva) Modificar la V/S (Advertència Correctiva)	 -06↑

Taula 2: Lògica de la classificació d'amenaçes i resposta del sistema TCAS

Nota: Elaboració pròpia.

Exposat l'àmbit de vigilància, en un vol en formació el sistema detectaria l'intrús fent saltar l'alerta i ordenant als pilots a maniobrar, trencant doncs el vol en formació definint clarament el sistema TCAS com a un sistema imprescindible però també una barrera per al projecte.

A nivell pràctic, vist des de la pantalla de navegació d'una cabina d'A320, un vol en formació es veuria com es mostra a l'imatge següent, segons cada cas, amb el TCAS operant o desactivat per possibilitar la formació.

Cas A : funció "resolution advisory" del TCAS desactivada però amb informació de posició de la resta d'aeronaus, sense cap avís ni a la pantalla de navegació ni a la pantalla principal de vol "PFD":

1. Fase d'aproximació al lider, a una distància longitudinal de 2 milles nàutiques i als 2.000 peus de separació vertical estàndards en ruta en la mateixa direcció (veure Figura 17) :



Figura 17. Imatge de la pantalla de Navegació mostrant la proximitat d'un altre avió, 2000 peus de separació, cas A.

Font: Elaboració pròpia, Airbus 320.

2. Fase de posicionament rere l'estela i reducció de la separació longitudinal de 1,5 NM i vertical fins a 300 peus o l'òptima per al cada cas concret (veure Figura 18):



Figura 18. Imatge de la pantalla de Navegació mostrant la proximitat d'un altre avió, 300 peus de separació, TCAS desactivat.

Font: Elaboració pròpia, Airbus 320

la PFD :

- (veure Figura 19):



Figura 19. Imatge de la pantalla de Navegació mostrant la proximitat d'un altre avió, 2000 peus de separació, cas B.

Font: Elaboració pròpia, Airbus 320

- l'intrús acompanyat de l'alerta auditiva: " TRAFFIC, TRAFFIC" (veure Figura 20):



Figura 20. Imatge de la pantalla de Navegació mostrant la proximitat d'un altre avió, 900 peus de separació i alerta de proximitat TCAS.

Font: Elaboració pròpia, Airbus 320.

3. Continua aproximació a l'avió precedent i activació del mode TCAS "resolution advisory", amb les següents indicacions al ND i PFD, acompanyat de l'alerta auditiva: "DESCEND DESCEND NOW" repetida dues vegades (veure Figura 21 i 22).



Figura 21. Imatge de la pantalla de Navegació mostrant la proximitat d'un altre avió, 1 NM i 100 peus de separació i alerta de proximitat TCAS.

Font: Elaboració pròpia, Airbus 320.

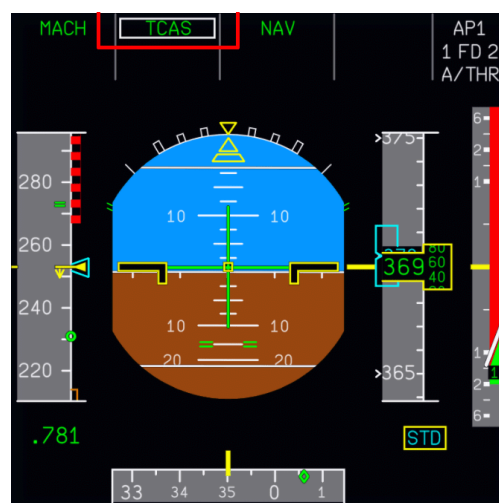


Figura 22. Imatge de la "Primary Flight Display" mostrant l'alerta resolutiva del TCAS ordenant descendre.

Font: [TCAS - FlyByWire Simulations Documentation](#), Abril 2024.

En un vol comercial regular, el TCAS ha d'anar activat i en el cas d'intentar el vol en formació es donaria la segona situació mostrada, on a la pantalla PFD es mostra les ordres del règim de velocitat vertical (barra colorida de la banda dreta) una zona segura en verd que ordena descendre a 1400 peus/minut allunyant-se doncs de l'aeronau líder i trencant la formació. [20]

Cost d'inversió:

Una altra barrera menys obvia però inherent, és el cost que suposa el disseny i implementació, certificació i entrenament de les tripulacions per adoptar aquests nous procediments, fer ús de les funcions de gestió de vol per mantenir el vol en formació i les mesures de contingències en cas de pèrdua de navegabilitat, emergències i desviacions per meteorologia.

Regulacions i aprovacions

Actualment, les regulacions impossibiliten estendre la tècnica del vol en formació. Per això, d'aplicar el projecte a escala global i comercial, s'hauria de modificar un gran nombre de regulacions aèries i procediments, passar per l'aprovació i posterior certificació. Tot fent-ne un procés llarg i que pot encarir la implementació sota el risc de no prosperar en els diferents espais aeris i autoritats reguladores.

No emparellament

Entre els riscos de la planificació d'aquest tipus de vol, dins de la probabilitat calculada amb el programa d'emparellament, hi ha la possibilitat que a la pràctica no sigui possible formar junt a un altre avió per causes alienes a la planificació i no es faria efectiva la reducció d'emissions prevista.

Pèrdua de comunicacions

El Fello'Fly estableix que una vegada agrupat el conjunt d'aeronaus és responsabilitat del líder mantenir les comunicacions amb ATC, i la separació i coordinació recau en la formació. Per tant, donat el cas d'una pèrdua de comunicacions, és imperatiu trencar el vol en formació ja que no es pot garantir la seguretat del vol.

Dependència tecnològica:

Finalment, una de les debilitats del projecte, és la dependència tecnològica i la homogeneïtzació dels vols en formació. Actualment només s'ha demostrat en avions Airbus 350 i coneguda la diversificació de flotes que conformen les aerolínies, pot suposar un fort repte estandarditzar la tecnologia per fer-la comuna a altres flotes o de no ser així quedaria limitat el projecte a l'A350, capant el potencial benefici del projecte per la reducció d'emissions globals. Tot i això, la intenció del projecte és estendre-ho a altres avions com el A380, que compta amb una major superfície alar i major pes serien factors claus i idonis per intensificar els vòrtexs maximitzant els beneficis aerodinàmics. Inclús, s'estudia des d'EASA la possible investigació de compatibilitzar-ho amb la fabricant Boeing i els seus models B777 i B787, tot i que la difícil situació actual de la companyia no afavoreix una implementació prompta.

3. Anàlisi quantitativa de l'estalvi de combustible del vol en formació

3.1 Procediment de la investigació

3.1.1 Tipus d'investigació

Una vegada exposat el preàmbul teòric i posat en context el projecte a analitzar, es calcula en aquest apartat l'estalvi efectiu del cas estudiat. S'estudia per dues vies, una via teòrica i una pràctica. La teòrica suposa la determinació numèrica del consum del parell d'aeronaus per mitjà del càlcul donats uns paràmetres, detallats en la descripció de l'escenari i una hipòtesi inicial.

La segona via, necessària per contrastar i donar validesa als resultats obtinguts en el procediment anterior, tracta de replicar l'escenari simulat a la teoria en un simulador de vol virtual per veure el comportament dels motors en sotmetre a l'avió en les condicions favorables del vòrtex.

3.1.2 Hipòtesis inicial

Davant la manca d'informació tècnica per la confidencialitat del projecte Fello' Fly, en aquesta investigació es parteix de les següents hipòtesis basades en els coneixements d'aerodinàmica i les deduccions de les dades generals oferides pel projecte en el que s'inspira:

- L'estalvi és efectiu a partir de vols amb una durada superior a les 3 hores
- El nivell de vol és un paràmetre important que determinarà la magnitud de l'estalvi de combustible.
- La densitat de l'aire juga un paper clau que afecta proporcionalment segons la fórmula de la sustentació i varia segons el nivell de vol; contra més alt, menys densitat i els vòrtex són més febles oferint menys sustentació pel seguidor.
- El nivell de vol òptim serà diferent pel líder i pel seguidor segons els objectius individuals de cada aeronau. Això suposarà una penalització en el consum de combustible pel líder si baixa a nivells inferiors per oferir més beneficis aerodinàmics al seguidor i doncs cal veure si compensa el balanç global de la reducció d'emissions.
- Cal escollir rutes densificades o coordinar una parella de vols si la probabilitat d'emparellament és baixa.

3.1.3 Eines

FlySmart +

FlySmart + és una aplicació desenvolupada per NavBlue, subsidiària d'Airbus i creadors de programari d'operacions de vol, que ofereix solucions integrades a les EFBs de cabina i en sincronització als paràmetres de vol per al càlcul de prestacions de l'avió segons la fase de vol, ofereix llistes de comprovació i els manuals d'Airbus.

Per a la investigació, s'utilitzen les funcions "Performance" per a les fases: Inflight, Cruise i ATMO amb les condicions de l'escenari estàndards per a tot el procediment.

Pla de vol oficial

Per a una simulació realista amb números coherents, s'utilitzen plans de vol oficials d'una aerolínia espanyola operant en rutes comercials regulars tal i com pretén funcionar el projecte Fello'Fly. No només són útils per a la configuració de l'aeronau en relació als pesos i al combustible carregat, sinó també en les rutes i els possibles punts de coincidència amb una potencial parella.

LIDO

L'aplicació oficial LIDO útil per a la visualització i planificació de les cartes de vol en aeròdroms, aproximació i sortides, ruta i divisió d'espais aeris és una eina que aporta una visió realista del vol a simular i serveix de guia segons el pla de vol. [21]

XPlane

Eina sobre la que gira al voltant l'execució de la investigació, és un potent simulador de vol que emula de manera precisa la modelització de vol, l'aerodinàmica, el rendiment dels motors i els efectes meteorològics per a ordinador on es realitza la simulació predefinint l'escenari del cas.

Excel i Spyder

Eina per a la recopilació i síntesi de les dades obtingudes durant la simulació. Realització de taules i dades per a la posterior discussió i conclusions.

Spyder, com a eina de programació s'usarà per a l'extracció de les dades del simulador i l'elaboració de gràfics detallats.

3.1.4 Procediment

L'experimentació s'inicia amb la definició de l'escenari, configuració de les aeronaus i l'atmosfera en la que es troben en el càlcul hipotètic amb l'eina FlySmart+ i al simulador Xplane. Seguidament es realitzen els càlculs modificant els paràmetres i recopilant les dades obtingudes que es recullen en una plantilla d'Excel i s'elabora una taula inicial amb els valors de la primera prova.

En finalitzar la primera prova, es procedeix a operar el vol en el simulador i s'observa els valors dels consums maniobrant els avions dins de les diferents envolvents segons les variables. Realitzat el vol, s'emplena una segona taula que contrasta amb la primera i se sintetiza els gràfics d'anàlisi comparatiu.

Acabada l'experimentació, s'analitzen els resultats i passen a ser discutits per a la final conclusió.

3.1.5 Escenari , avions i configuració

Per explorar l'efectivitat i flexibilitat del projecte Fello'Fly, es proposen dos escenaris aplicables, un de llarg radi i un de curt. En aquest treball s'experimenta en un escenari real diferent al ja demostrat per Airbus, es tracta d'un vol de Mig Radi amb una duració inferior a les 6 hores però superior a les 3 hores.

3.1.5.1 Escenari de Mig Radi

El primer escenari simula un vol comercial regular entre les capitals Estocolm, Suècia i Madrid, Espanya. Un vol d'una durada de 3 hores i 48 minuts operat per dos avions Airbus 320-251 NEO inspirats en els pesos i prestacions de l'avió amb matrícula EC-MXU, per a l'estandardització de resultats es duplicarà un vol i es volarà en formació al llarg de la ruta mostrada. Amb el punt de unió del vol en formació "ELPAX" i es trenca la formació en el punt de la ruta d'inici del descens "BANEV", on comença el procediment d'arribada estàndard de l'aproximació a l'aeroport de Madrid (veure ruta i punts mencionats en la Figura 23).

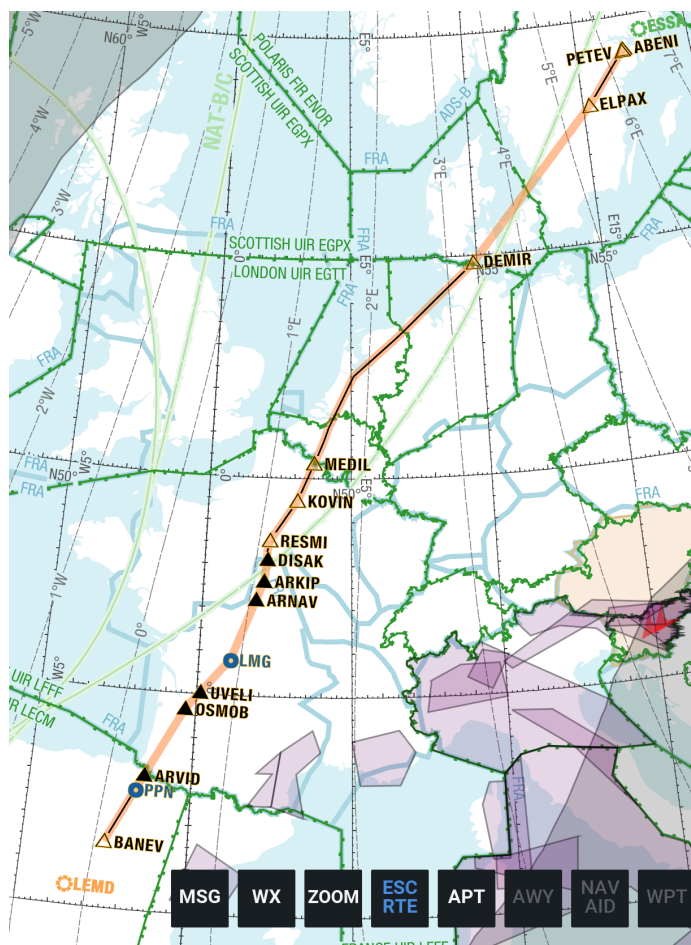


Figura 23. Captura de la ruta entre Estocolm i Madrid

Font: Aplicació LIDO

Prenent com a referència el pla de vol aportat de la Figura 24, podem veure les següents dades tècniques que definiran la configuració de l'aeronau i l'escenari. Cal destacar la dada subratllada en verd, que indica l'increment o l'estalvi de combustible per cada 1000 kg de més o menys de càrrega de l'avió.

ESSAR08.ABENI3R.PETEV.N872.ELPAX..DEMIR.N872.MEDIL.UN872.KOVIN.UM728.RESMI. UN857.DISAK..ARKIP..ARNAV..LMG..UVELI..OSMOB..ARVID.UT424.PPN.UN10.BANEV. BANEV3D.LEMDR32R							
ESSA 13.55/10 LEMD 17.53 18.53LT		N59 39.1 E017 55.1 CI 5 F340/M60		256/24 36588		320251 ECMXU PER.FAC 4.2 ERA CI 5	
F340 ELPAX/F360 DEGUL/F380 PAM/F370 BANEV/F230 PINAR/F210 MD545/F190 NOSKO/F130							
CRUISE CI 5		AVG.OAT	MAX.WS	AVG.GS	AVG.WC	TIME	DST
MACH AREA CI FLIGHT		M48	04	392	H32	03.48	1489
TRLD	16997		TAXI+APU	00.10	190		
DOW	44466		TRIP	03.48	8240		
ZFW	61463	64300	HOLD LEMD	00.00	0		
TOF	10970	19050	CONTINGENCY	00.07	250 / 3PCT		
TOW	72433	73500	ALT LEVD	00.42	1500		
TPF	8240		FINAL RES	00.30	980		
LGW	64193	67400	ADDITIONAL	00.00	0		
PAX:	175 FRG:	1247	UNUSABLE,		0		
			EXTRA		0		
			TANKER		0		
			DISC		0		
			RAMP FUEL		11160		
			MIN FUEL ALTN LEVD		2480		
CI SCENARIO		KG	MIN				
CI0		-5	+00:01				
CI000		+796	-00:10				
+/- 1000 KGS TOW		+82/-84					

Figura 24. Extracte de la capçalera del pla de vol amb les dades principals de la ruta Estocolm - Madrid

Font: Pla de vol d'una aerolínia.

Veient el pla de vol, se sintetitzen en la Taula 3 les dades que configuren l'escenari i els avions:

Escenari	Valor del paràmetre	Avió	Valor del paràmetre
<u>Nivell de vol</u> <u>Nivell òptim de vol</u>	FL 380 FL 375	<u>Velocitat (Mach)</u>	0.78
<u>Distància</u>	1.489 NM	<u>Velocitat (Nusos)</u>	392 Kt
<u>Temps de vol</u>	03:48	<u>Combustible carregat</u>	11.160 Kgs
<u>Desviació temperatura</u>	ISA - 3°C	<u>Cost Index</u>	5
<u>Temperatura</u>	-59°C	<u>Performance Factor</u>	4.2%
<u>Component del vent:</u>	-32 Kt (en cara)	<u>Pes a l'enlairament (TOW)</u>	72.433 Kg
<u>Ràtio Densitat de l'aire</u>	0,275	<u>Pes mitjà en creuer (GW)</u>	68.400 Kg
<u>Velocitat del so</u>	570 Kt	<u>Centre de Gravetat</u>	33%
<u>Espai aeri</u>	RVSM	<u>Consum en creuer vol individual</u>	2.061 Kg/H
<u>Turbulència</u>	Lleugera, WS 4	<u>Combustible per +/-1000 Kg TOW</u>	+82 Kg / - 84 Kg

Taula 3: Configuració de l'escenari del vol de mig radi

Nota: Elaboració pròpia

El segon escenari, simula una parella de vols entre Barcelona, Espanya i San Francisco, EEUU. L'operen dues aeronaus Airbus 330-200 inspirats en en la matrícula EC-NEN. El vol pren una durada de 22 hores i 59 minuts recorrent l'espai aeri NAT-HLA amb les regulacions que aquest espai comporta, com s'ha esmentat en el marc teòric. A la pràctica es podria comparar amb l'exemple de dos vols comercials, un que opera de Madrid a Los Angeles i aquest de Barcelona a San Francisco on passen un nombre d'hores efectiu pel projecte Fello'Fly en rutes similars unint-se en el punt d'entrada a l'espai NAT-HLA anomenat "Tulta", mostrat a la Figura 25.

L'extensa ruta es mostra amb els punts a creuar i els diferents espais aeris amb les seves respectives regulacions sota la filosofia PBN i NAT-HLA.



Figura 25. Captura de la ruta entre Barcelona i San Francisco i els diferents espais aeris a creuar.

Font: Aplicació LIDO

El pla de vol en el que s'inspira la configuració de l'escenari i l'avió és la Figura 26 a continuació:

LEBLR24L.GRAUS5Q.GRAUS.UM601.BLV.UN75.DELOG..TULTA..LIMRI..5330N02000W..5530N03000W..57N040W..58N050W..VESMI..MOATT..LAKES..KLIPS..GRAND..54N090W..KAIIN..50N104W..GGRBI.J7.GTF..REO..LEGG.S.BDEGA3.KSFOR28R						
LEBL 12.00/17 KSFO 00.11 17.11LT		N41 17.8 E002 04.7 CI 6 F270/M31		332-L ECNEN PER.FAC 2.3% STD ETOPS CI 6		
F270 POSSY/F310 PPN/F330 BLV/F340 H5320/F330 5850N/F380 5490N/F400						
CRUISE CI 6		AVG.OAT	MAX.WS	AVG.GS	AVG.WC	TIME DST
MACH AREA CI FLIGHT		M50	07	446	H7	11.59 5344
TRLD	28753		TAXI+APU	00.12	450	
DOW	122908		TRIP	11.59	65450	
ZFW	151661	166000	HOLD KSFO	00.00	0	
TOF	70640	111680	CONTINGENCY	00.08	530	/ ACF95
TOW	222301	229600	ALT KOAK	00.14	1320	
TPF	65450		FINAL RES	00.30	1930	
LGW	156851	182000	ADDITIONAL	00.11	750	
PAX:	283 FRG:	3000	UNUSABLE		0	
			EXTRA		660	
			TANKER		0	
			DISC		0	
CI SCENARIO		KG				
CI0		+7				
CI000		+1483				
+/-1000 KGS TOW		+272/-273	RAMP FUEL		71090	
			MIN FUEL ALTN KOAK		3250	

Figura 26. Extracte de la capçalera del pla de vol amb les dades principals de la ruta Barcelona - San Francisco

Font: Pla de vol d'una aerolínia.

D'aquí s'elabora la Taula 4 amb les característiques a destacar:

Escenari	Valor del paràmetre	Avió	Valor del paràmetre
Nivell de vol Nivell òptim	FL 380 FL 370	Velocitat (Mach)	0.806
Distància	5.344 NM	Velocitat (Nusos)	446 Kt
Temps de vol	11:59	Combustible carregat	71.090 Kgs
Desviació temperatura	ISA + 4°C	Cost Index	6
Temperatura	-52 °C	Performance Factor	2.3%
Component del vent:	-7 Kt (en cara)	Pes a l'enlairament (TOW)	222.301 Kg
Ràtio Densitat de l'aire	0,2659	Pes mitjà en creuer (GW)	189.576 Kg
Velocitat del so	579 Kt	Centre de Gravetat	37%
Espai aeri	NAT-HLA	Consum en creuer vol individual	5464 Kg/H
Turbulència	Lleugera, WS 4	Estalvi +/-1000 Kg TOW	+272 Kg / - 273 Kg

Taula 4: Configuració de l'escenari del vol de llarg radi

Nota: Elaboració pròpia

3.1.6 Càlcul Teòric - Escenari d'un vol de mig radi

Plantejat l'escenari i les dades tècniques amb les que es treballarà, en aquest apartat es calcula les variables de control i el resultat dels consums a nivell teòric amb l'eina FlySmart. Es calcula inicialment els valors d'un avió volant en la ruta individualment i posteriorment es modificaran les variables de control simulant l'emparellament amb l'aeronau que vola la mateixa ruta.

3.1.6.1 Densitat de l'aire, el seu efecte hipotètic en els vòrtex i l'estalvi segons el nivell de vol

Com s'ha esmentat, la densitat varia amb l'altitud i juga un paper important en el consum de combustible, la velocitat i la intensitat de l'estela turbulenta. En la Taula 5 es calcula el ràtio de la densitat segons cada nivell de vol i com modifica proporcionalment l'efecte d'estalvi de combustible en el vol en formació. [17]

Vol A320 ESSA-LEMD				
Nivell de vol	Densitat relativa respecte FL 0	Proporció %	Estalvi teòric % optimista	Estalvi teòric % pessimista
FL400*	N/A	N/A	N/A	N/A
FL380	0,2746	68,24	6,82	3,41
FL360	0,298	74,06	7,41	3,70
FL340	0,3219	80,00	8,00	4,00
FL320	0,3473	86,31	8,63	4,32
FL300	0,3741	92,97	9,30	4,65
FL280**	0,4024	100,00	10,00	5,00
* Fora de rang, Sostre màxim A320 = FL 398				
**FL de referència, en la relació variació de la densitat-estalvi màxim hipotètic				

Taula 5: Relació entre el nivell de vol i la densitat de l'aire, efecte en el percentatge d'estalvi de combustible hipotètic a nivell de vol 280 on s'assumeix el màxim estalvi de la investigació.

Nota: Elaboració pròpia

La taula mostra com varia la densitat prenent el nivell de referència 280, degut a la manca d'informació per la confidencialitat del projecte Fello'Fly i atenent a l'hipòtesi que estima un major estalvi a menor nivell de vol com a resultat d'una major densitat.

La primera columna mostra el nivell de vol, la segona la densitat relativa per a cada FL. La següent calcula la proporció respecte el nivell 280 d'on es parteix el màxim estalvi, que modificarà l'estalvi segons els resultats que mostra Airbus, resulta entre un 10% i un 5% d'estalvi identificant-los com al cas més optimista el primer i el cas pessimista el segon. S'assignen els valors màxims al nivell de

referència i es veu minvat l'estalvi a mesura que es puja el nivell i baixa la densitat en detriment de la intensitat del vòrtex.

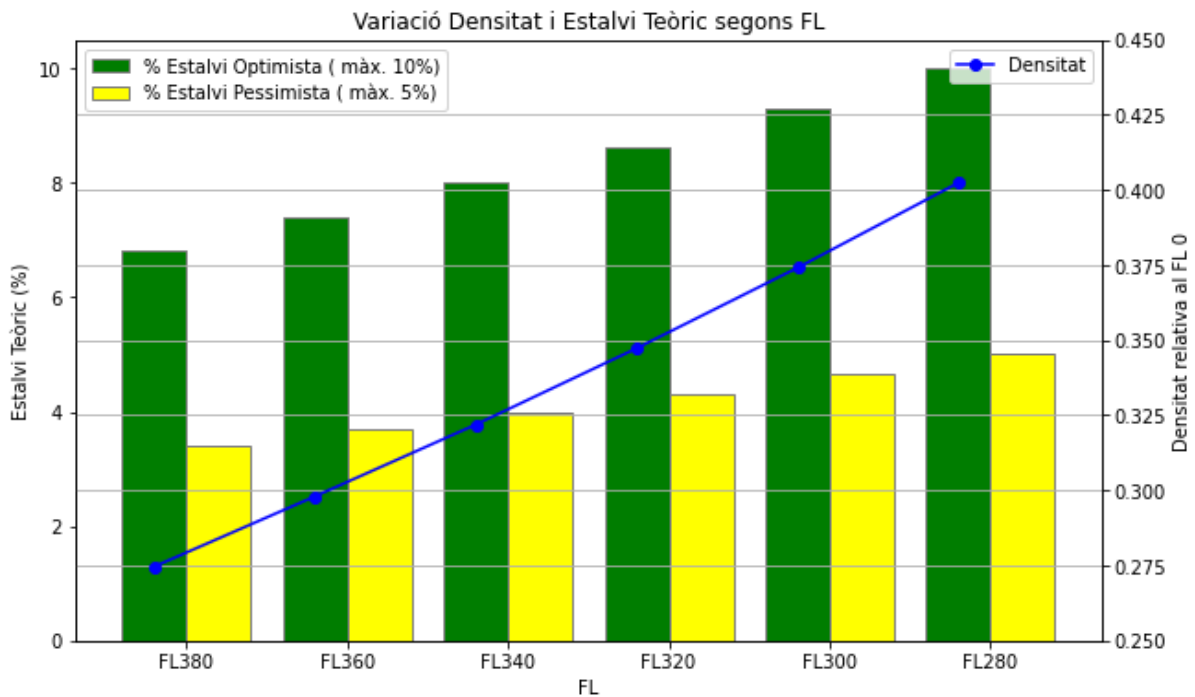


Figura 27: Gràfic de la variació de la densitat i la correlació amb l'efecte en l'estalvi de combustible.

Font: Elaboració pròpia

El gràfic de la Figura 27 mostra de manera il·lustrativa l'evolució dels valors des del nivell de vol més alt amb la menor densitat i estalvi, fins al nivell més baix amb l'evolució dels valors segons els dos casos estimats.

3.1.6.2 Consums d'un avió segons el nivell de vol

La planificació del vol es fa ajustant als nivells més òptims en relació al combustible i temps de vol. En les següents taules es mostra el consum a cada nivell de vol segons cada tècnica. La tècnica de vol de cost index fixe marca unes velocitats que respecten la relació consum de combustible per cost de l'operació del vol, en el pla de vol de l'A320 marca un cost index de 5. En la tècnica de Mach constant, en aquest cas M.0,78 , es manté la velocitat en Mach a tots els nivells, incrementant notablement el consum de combustible i la velocitat respecte el terra.

A320 ESSA-LEMD // EC-MXU; PES: 68.400 Kg. Cost Index: 5. Dist.: 1489 Nm , Perf. Factor: 4.2%

FL	Velocitat del so Kt	No. de MACH	Velocitat sobre la terra Kt	Consum de combustible Kg/h	Rendiment rotació N1 %	temps de vol	Consum total
380	579	0,78	451,6	2061	83	3,30	6795,16
360	570	0,772	440,0	2067	80,7	3,38	6994,28
340	576	0,761	438,3	2109	79,5	3,40	7164,14
320	581	0,73	424,1	2106	77,8	3,51	7393,57
300	586	0,69	404,3	2053	75,6	3,68	7560,26
280	591	0,657	388,3	2030	73,7	3,83	7784,63

Taula 6: Dades del rendiment de l'avió a diferents FL amb Cost Index 5 i condicions del pla de vol..

Nota: Elaboració pròpia

La Taula 6 exposa tots els paràmetres d'interès que representen l'estat del vol, per a cada nivell de vol es calcula la velocitat del so, que va en funció de la temperatura (contra més baixa menor resulta el valor de la velocitat del so). El número de Mach és la proporció de la velocitat del so i va en funció del Cost Index que en funció dels costos de l'operació del vol i el combustible determina les velocitats i consums. La rotació de l'eix del motor N1 i el consum combustible determinen el rendiment i eficiència per a cada FL, el qual en la taula és mostra com a òptim FL380 on requereix menys combustible per un rendiment major del motor, major velocitat sobre la terra i menor temps de vol.

Per a estandarditzar el procés de la investigació i l'obtenció de resultats constants i coherents, els paràmetres es calculen a una velocitat de MACH 0.78 constant i sota les condicions de l'atmosfera estàndard internacional coneguda com a ISA amb les seves respectives variacions de temperatura segons l'altitud i component del vent 0 kt en cara.

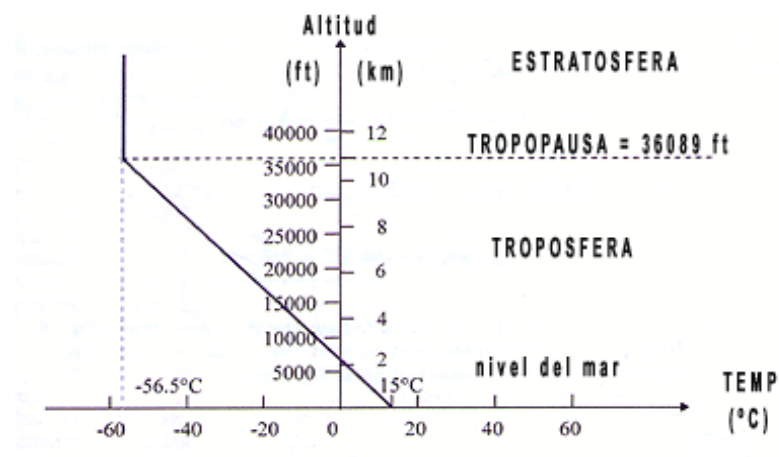


Figura 28. Gràfic de la variació de la temperatura amb l'altitud

Font: [La atmósfera estandar internacional: ISA | extracrew](#), 2006.

La Figura 28 mostra la variació de la temperatura a mesura que puja el nivell de vol, en una atmosfera estàndard la temperatura i densitat minven amb l'altitud fins a la tropopausa (valor estàndard de 36089 peus) a partir d'on la temperatura es manté constant i influeix directament en la

velocitat del so, que depèn de la temperatura i conseqüentment mantindrà una velocitat sobre la terra igual a partir de FL360 en amunt si es manté el nombre de MACH. A la vida real, l'atmosfera és variable i pren valors diferents segons l'àmbit i condicions específiques. Aquesta evolució dels paràmetres modifica els paràmetres del vol com s'ha vist en la velocitat del so, el consum, entre d'altres.

En aquest escenari, els consums i rendiments són els mostrats a continuació, primer la Taula 7 de Cost Index 5 en condicions ISA i seguidament la Taula 8 de Mach Constant 0.78 en condicions ISA:

A320 ESSA-LEMD // EC-MXU; PES: 68.400 Kg, Cost Index: 5, Dist.: 1489 Nm , Perf. Factor: 4.2%							
FL	Velocitat del so(Kt)	No. de MACH	Velocitat sobre la terra (Kt)	Consum de combustible (Kg/h)	Rendiment rotació N1 (%)	temps de vol (h)	Consum total (Kg)
380	574	0,78	447,7	2061	83	3,33	6854,35
360	574	0,772	443,1	2067	80,7	3,36	6945,54
340	580	0,761	441,4	2109	79,5	3,37	7114,73
320	585	0,73	427,1	2106	77,8	3,49	7343,01
300	590	0,69	407,1	2053	75,6	3,66	7509,01
280	595	0,657	390,9	2030	73,7	3,81	7732,29

Taula 7: Dades del rendiment de l'avió a diferents FL amb Cost Index 5 i condicions ISA.

Nota: Elaboració pròpia.

Vol A320 ESSA-LEMD // EC-MXU; PES: 68.400 Kg, Distància: 1489 NM, Perf Factor: 4.2%							
FL	Velocitat del so(Kt)	No. de MACH	Velocitat sobre la terra (Kt)	Consum de combustible (Kg/h)	Rendiment rotació N1 (%)	temps de vol (h)	Consum total (Kg)
380	574	0,78	447,72	2072	83	3,33	6932,6
360	574	0,78	447,72	2110	81,5	3,33	7017,3
340	580	0,78	452,4	2193	80,6	3,29	7217,9
320	585	0,78	456,3	2305	80,1	3,26	7521,7
300	590	0,78	460,2	2434	79,8	3,24	7875,3
280	595	0,78	464,1	2592	79,6	3,21	8316,1

Taula 8: Dades del rendiment de l'avió a mach number constant : 0,78 i estandardització de les condicions a l'atmosfera ISA per a la homogeneïtzació dels resultats amb la investigació..

Nota: Elaboració pròpia.

S'observa un increment en la velocitat sobre la terra degut a l'increment en la velocitat del so i la constant de Mach, que afegit a la desviació del nivell de vol òptim augmenta notablement el consum de combustible malgrat la reducció del temps de vol. (veure Figura 29)

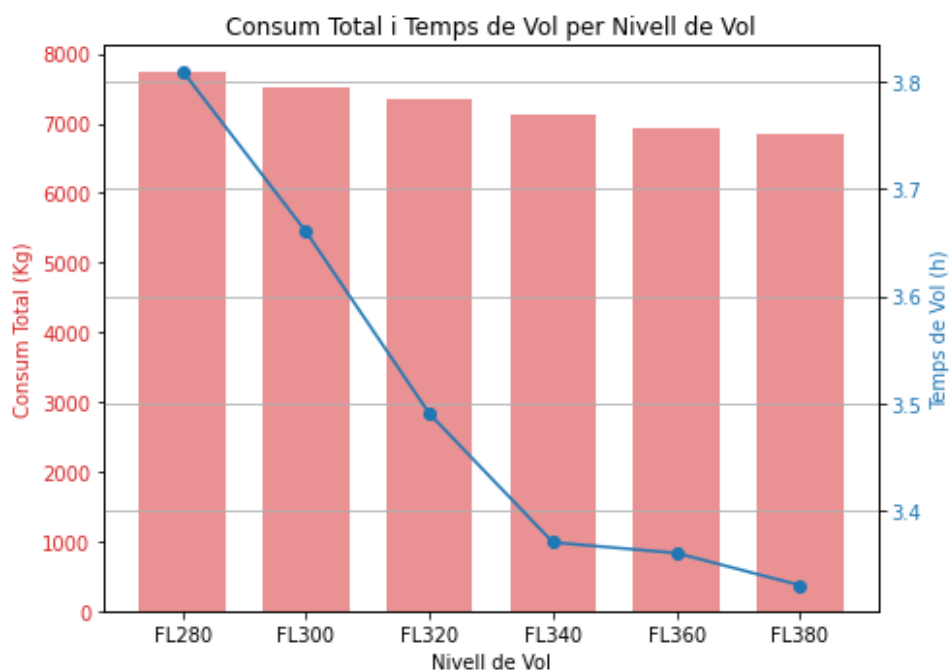


Figura 29. Gràfic del consum i temps per a cada nivell de vol, CI 5 i condicions ISA

Font: Elaboració pròpia

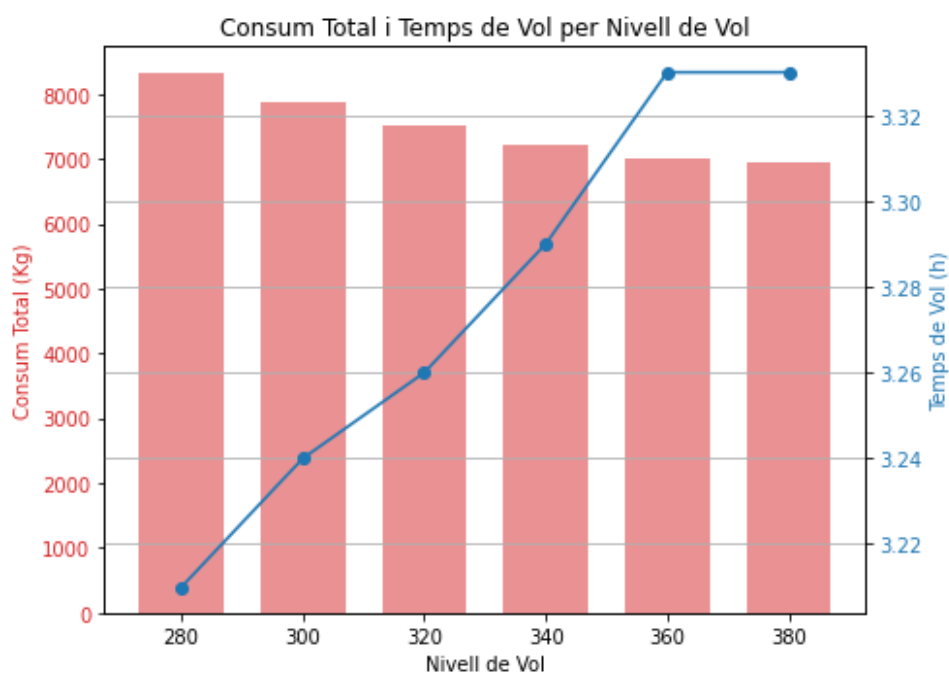


Figura 30. Gràfic del consum total de combustible requerit i durada del trajecte de 1489NM segons cada FL MACH 0.78 i condicions ISA.

Font: Elaboració pròpia.

El gràfic de la Figura 30 visualitza de menor nivell de vol a major, el consum total de combustible per a tot el trajecte des d'Estocolm fins a Madrid i la corba de temps de vol. La diferència entre extrems es quantifica en 7.2 minuts menys de vol i suposa 1383.5 kg de combustible requerit a nivell de vol

280 respecte 380. Unes xifres que de moment, en el vol individual, justifiquen l'interès de volar el més proper al nivell òptim desestimant l'estudi de nivells més baixos.

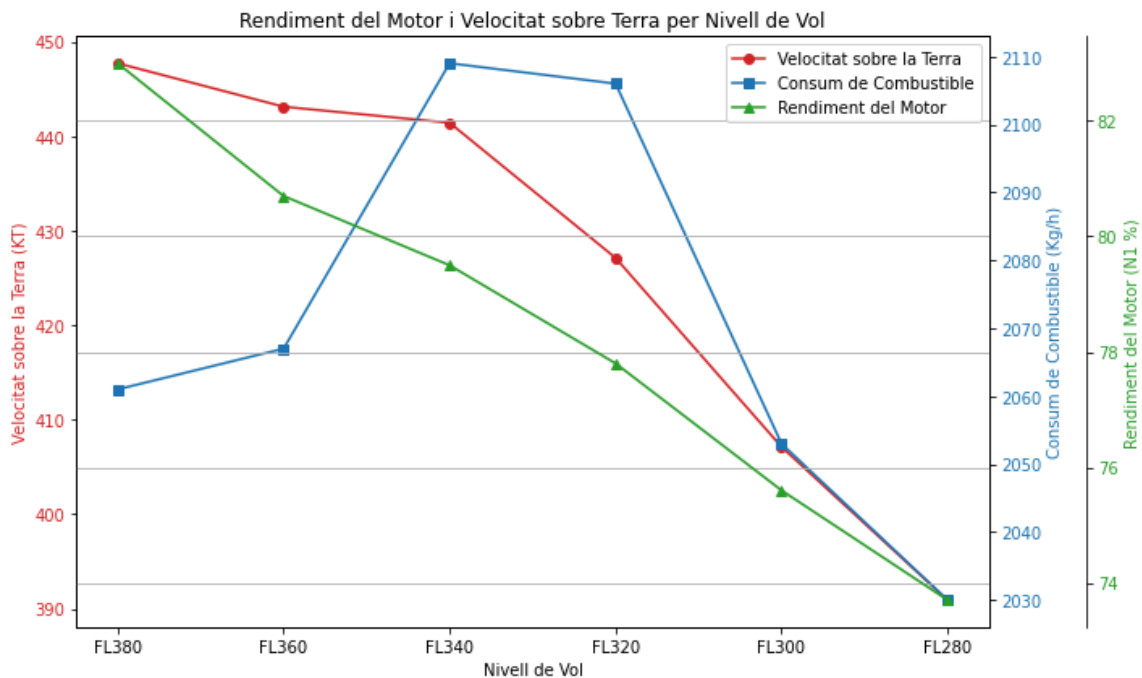


Figura 31. Taula Relació Nivell de vol-Rendiment del motor-Consum-velocitat sobre la terra amb Cost Index 5 Condicions ISA.

Font: Elaboració pròpia.

La Figura 31 mostra els paràmetres de la velocitat sobre la terra, el consum per hora de combustible i el rendiment de N1 en percentatge de la taula del vol a Cost Index 5. S'observa inicialment un increment del consum de combustible amb una pèrdua de la velocitat i el rendiment que després pren una tendència decreixent en tots els paràmetres recordant l'increment del consum requerit total

amb la baixada de nivell de vol.

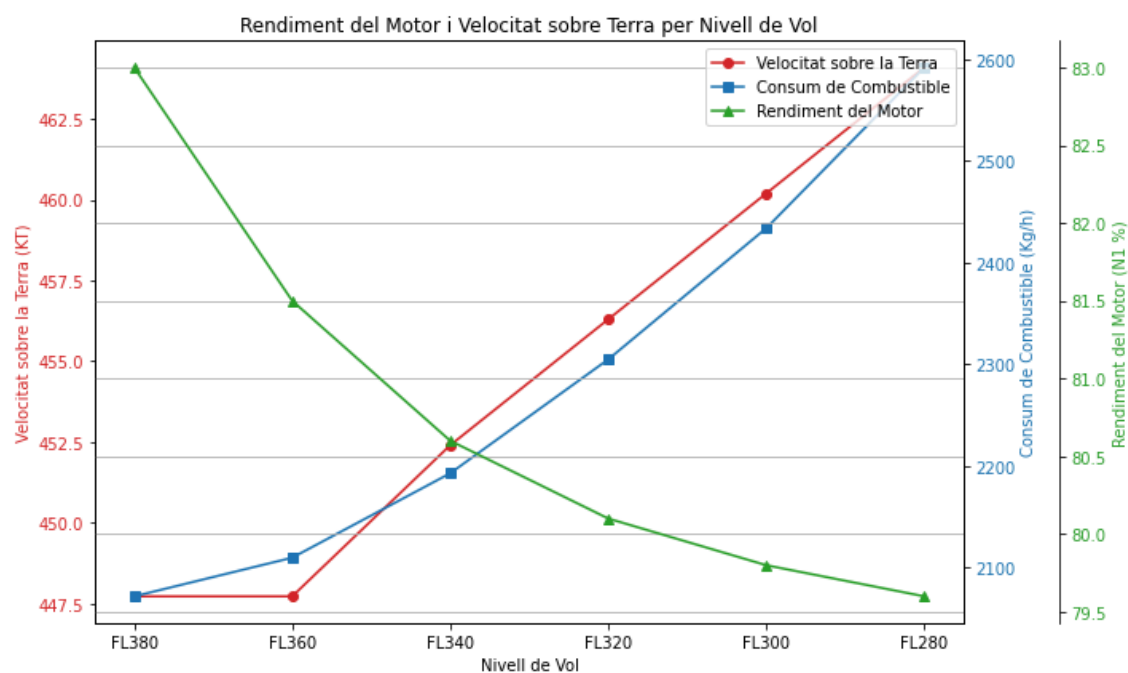


Figura 32. Gràfica de la relació entre la velocitat sobre la terra i el consum de Combustible-Rendiment N1 a Mach 0.78, condicions ISA.

Font: Elaboració pròpia

El gràfic de la Figura 32 del vol a Mach constant per a tots els nivells de vol, mostra un increment de la velocitat de la mà del consum mentre que el rendiment de N1 baixa mostrant la ineficiència de la baixada de nivell de vol pel que respecta al consum i les emissions.

3.1.6.3 Consums teòrics de l'avió seguidor en un vol en formació

Aplicant la variació de la densitat d'acord a la hipòtesi als valors calculats, s'obtenen els següents resultats teòrics recollits en la Taula 9 i 10. [22]

Vol A320 ESSA-LEMD // EC-MXU; PES: 68.400 Kg // Estalvi hipotètic màx. 10%							
FL	Velocitat del so(Kt)	No. de MACH	Velocitat sobre la terra (Kt)	Consum de combustible (Kg/h)	Rendiment rotació N1 (%)	temps de vol (h)	Consum total (Kg)
380	574	0,78	447,72	1930,61	83	3,33	6420,7
360	574	0,78	447,72	1953,74	81,5	3,33	6497,6
340	580	0,78	452,4	2017,57	80,6	3,29	6640,5
320	585	0,78	456,3	2106,06	80,1	3,26	6872,5
300	590	0,78	460,2	2207,72	79,8	3,24	7143,2
280	595	0,78	464,1	2332,8	79,6	3,21	7484,5

Taula 9: Dades dels consums segons nivell de vol i relacionats directament amb la taula de la variació de densitat en el cas d'un estalvi màxim hipotètic del 10%.

Nota: Elaboració pròpia.

Vol A320 ESSA-LEMD // EC-MXU; PES: 68.400 Kg, No.Mach: 0.78 // Estalvi màx. hipotètic 5%							
FL	Velocitat del so(Kt)	No. de MACH	Velocitat sobre la terra (Kt)	Consum de combustible (Kg/h)	Rendiment rotació N1 (%)	temps de vol (h)	Consum total (Kg)
380	574	0,78	447,72	2001,30	83	3,33	6655,8
360	574	0,78	447,72	2031,87	81,5	3,33	6757,5
340	580	0,78	452,4	2105,29	80,6	3,29	6929,2
320	585	0,78	456,3	2205,53	80,1	3,26	7197,1
300	590	0,78	460,2	2320,86	79,8	3,24	7509,3
280	595	0,78	464,1	2462,40	79,6	3,21	7900,3

Taula 10: Dades dels consums segons nivell de vol i relacionats directament amb la taula de la variació de densitat en el cas d'un estalvi màxim hipotètic del 5%.

Nota: Elaboració pròpia

Les taules 9 i 10 mostren el càlcul de dades representant els resultats hipotètics segons l'escenari d'un màxim de 10% d'estalvi i un mínim de 5% al nivell de referència FL280 on s'estima la màxima intensitat del vòrtex i benefici.

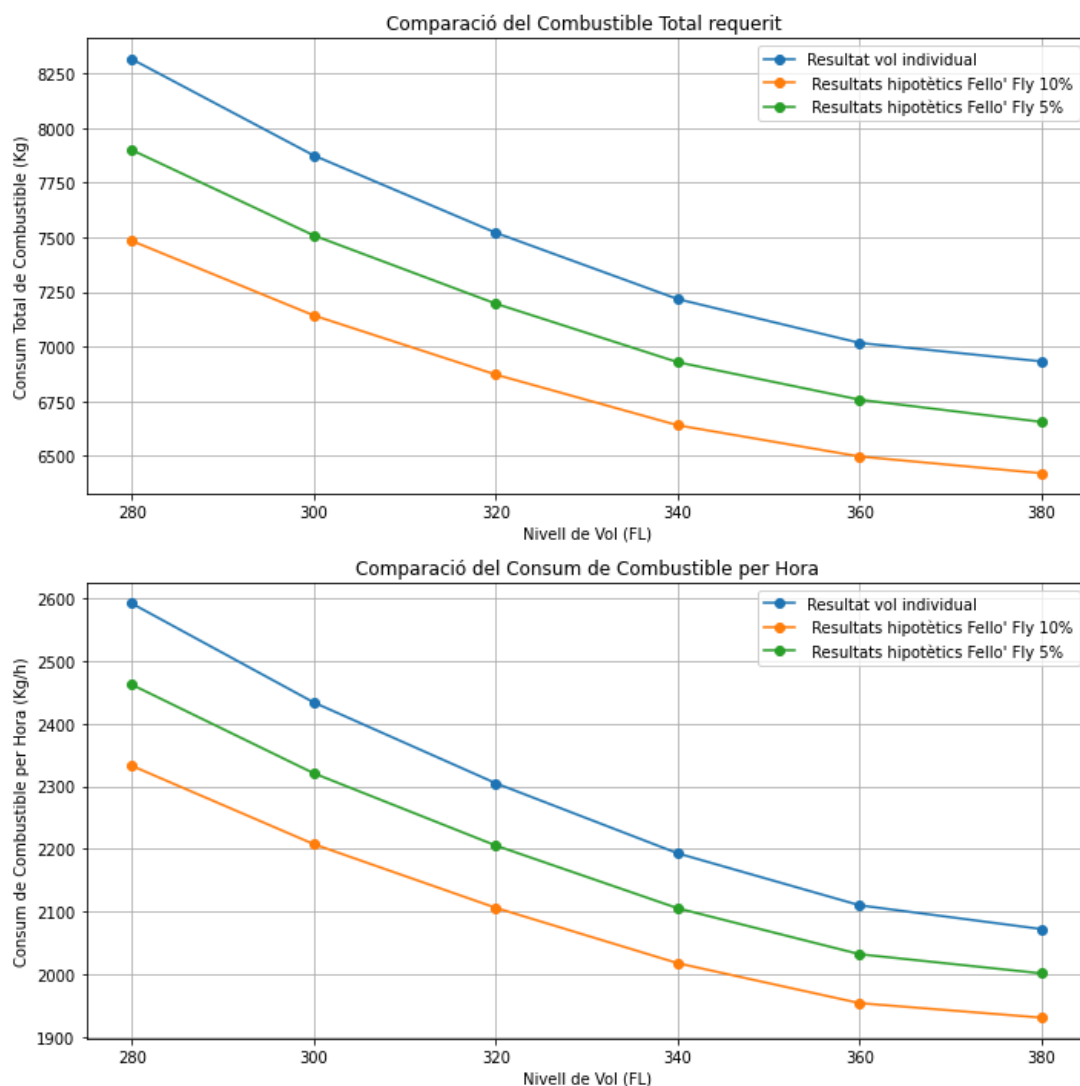


Figura 33. Gràfic comparatiu de les taules de consums Vol individual- Vol en formació 5% estalvi màxim - Vol en formació 10% estalvi màxim.

Font: Elaboració pròpia.

Les gràfiques de la Figura 33 mostren l'evolució del consum total requerit en la primera gràfica i el consum mitjà en la segona en relació al nivell de vol i els escenaris hipotètics màxim del 10% d'estalvi i el 5% d'estalvi amb les respectives variacions calculades segons la densitat.

3.1.7 Experimentació i resultats obtinguts

Una vegada estudiat l'àmbit teòric, es procedeix a l'experimentació i simulació de dos vols, els quals es fan enlairar partint de la pista 08 de l'aeroport d'Arlanda, Estocolm. En la fase de creuer es procedeix a executar el vol en formació coordinant i ajustant el vol del seguidor a una posició òptima de l'estela de manera manual per manca d'una tecnologia que ho mantingui automàticament. Es recopilen les dades mitjançant un programa en python que recull la sortida de dades dels sistemes i

paràmetres dels avions per a cada nivell de vol, un mateix pes i configuració on s'obtenen els següents resultats:

3.1.7.1 Resultats

Seguidor// Vol A320 ESSA-LEMD // EC-MXU; PES: 68.400 Kg, No.Mach: 0.78, Dist: 1489 NM							
Nivell de vol (FL)	Velocitat del so (KT)	Rotació N1 (%)	Velocitat sobre la terra (KT)	Consum de combustible mitjà (Kg/H)	Temps de Vol (H)	Consum Total (KG)	increment respecte FL òptim
380	574	84,39	447,72	1959,57	3,33	6517,02	94,75
360	574	81,74	447,72	1931,08	3,33	6422,27	0,00
340	580	80,06	452,03	1988,45	3,29	6550,01	127,74
320	585	79,24	456,01	2060,55	3,27	6728,27	306,00
300	590	79,28	459,96	2235,64	3,24	7237,30	815,03
280	595	80,2	464	2520	3,21	8086,81	1664,54
Líder//Vol A320 ESSA-LEMD // EC-MXU; PES: 68.400 Kg, No.Mach: 0.78, Dist 1489 NM							
Nivell de vol (FL)	Velocitat del so (KT)	Rotació N1 (%)	Velocitat sobre la terra (KT)	Consum de combustible mitjà (Kg/H)	Temps de Vol (H)	Consum Total (KG)	increment respecte FL òptim
380	574	83	447,72	2072	3,33	6890,9	0,00
360	574	81,5	447,72	2110	3,33	7017,3	126,4
340	580	80,6	452,4	2193	3,29	7217,9	327,0
320	585	80,1	456,3	2305	3,26	7521,7	630,8
300	590	79,8	460,2	2434	3,24	7875,3	984,4
280	595	79,6	464,1	2592	3,21	8316,1	1425,1

Taula 11: Dades recopilades de la simulació de l'avió seguidor i líder, condicions ISA i Mach .78.

Nota: Elaboració pròpia.

Les taules conjuntes en la Taula 11 mostren el recull de dades de l'experimentació amb els paràmetres rellevants que reflecteixen el nivell d'eficiència i consum per a cada nivell de vol. El nivell òptim és el ressaltat en lletres de color verd, mesurat en el menor consum de combustible mitjà i total requerit per al trajecte.

S'observa una tendència creixent de la velocitat del vol a mesura que el nivell de vol baixa, reduint el temps de vol total però augmentant el consum de combustible, que de la mà de la darrera columna es reflecteix l'increment que suposa volar a nivells diferents de l'òptim FL360 i FL380 respectivament, fins a un màxim de 1425 kg més en l'aeronau líder i 1665 kg en la seguidora.

Si s'analitza la relació entre la rotació de N1 i el consum per hora de combustible es dedueix l'eficiència del motor a cada nivell de vol, que en baixar de nivell requereix més combustible per fer rotar l'eix N1 del motor a una velocitat o un percentatge menor respecte el seu màxim de 100%, demostrant així la ineficiència del motor a cotes més baixes.

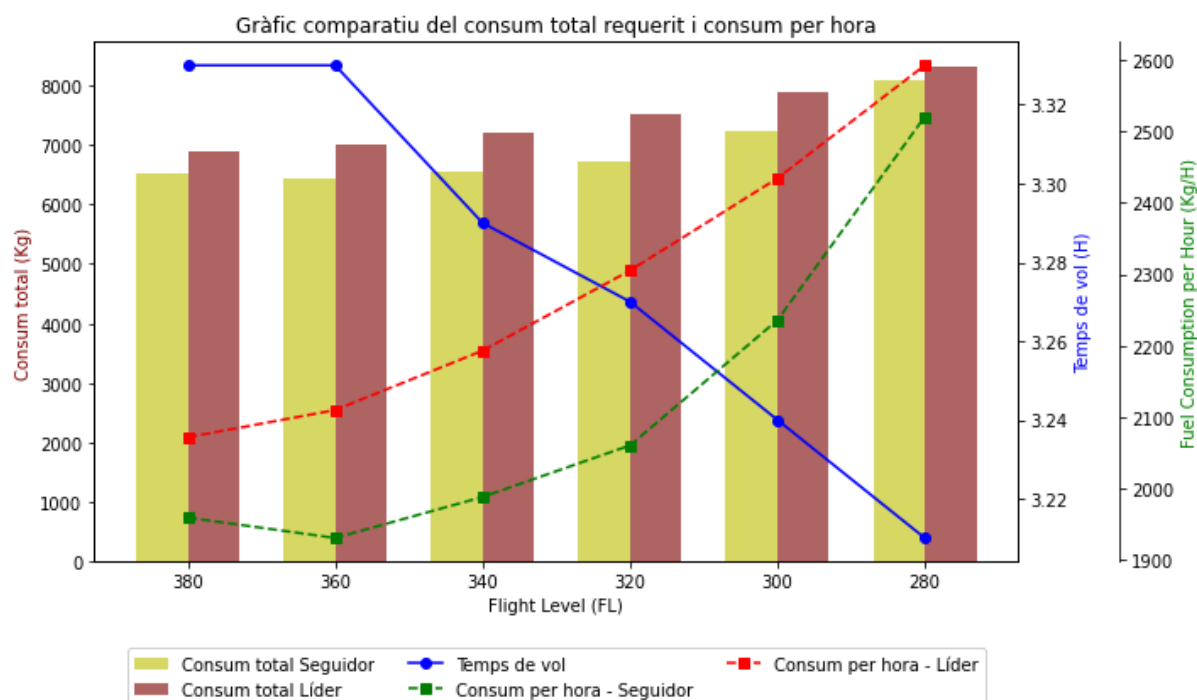


Figura 34. Gràfic dels resultats simulació Líder-Seguidor, consum total, consum per hora i temps de vol.

Font: Elaboració pròpia

En la Figura 34 s'il·lustra l'evolució dels resultats amb el canvi de nivell de vol, s'observa una tendència creixent del consum i el combustible total requerit mostrant un punt de diferència màxima entre els consums dels avions al FL 320. Cal esmentar que la manca de pendent de la corba de temps de vol entre els nivells de vol entre FL380 i FL360 és degut al fenomen exposat sobre l'altitud de la tropopausa en estandarditzar l'escenari a paràmetres ISA, a 36080 peus. En superar la tropopausa es manté la temperatura i doncs la velocitat del so no varia mantenint com mostra el gràfic el temps de vol però amb uns nivells d'eficiència diferents com marquen els consums.

3.1.7.2 Comparativa i anàlisi de resultats

En aquest apartat s'analiza la magnitud de l'estalvi comparant els resultats dels paràmetres observats en les dues aeronaus.

Comparativa Seguidor- Líder en unitats						
Nivell de vol (FL)	Velocitat del so (KT)	Rotació N1 (%)	Velocitat sobre terra (KT)	Consum de combustible mitjà (Kg/H)	Temps de Vol (H)	Consum Total (KG)
380	574	1,39	0	-112,43	0,000	-373,91
360	574	0,24	0	-178,92	0,000	-595,04
340	580	-0,54	-0,37	-204,55	0,003	-667,89

320	585	-0,86	-0,29	-244,45	0,002	-793,41
300	590	-0,52	-0,24	-198,36	0,002	-638,03
280	595	0,6	-0,1	-72	0,001	-229,26
Comparativa Seguidor - Líder en %						
380	574	1,67	0,00	-5,43	0,00	-5,43
360	574	0,29	0,00	-8,48	0,00	-8,48
340	580	-0,67	-0,08	-9,33	0,08	-9,25
320	585	-1,07	-0,06	-10,61	0,06	-10,55
300	590	-0,65	-0,05	-8,15	0,05	-8,10
280	595	0,75	-0,02	-2,78	0,02	-2,76

Taula 12: Comparativa en unitats i percentatge dels paràmetres del Seguidor respecte el Líder..

Nota: Elaboració pròpia.

La Taula 12 aportada sintetiza la comparativa entre les dades del seguidor i el líder per a cada nivell de vol, on es ressalta el números verds les dades del nivell on es maximitza la diferència entre els dos avions. A FL320, en iguals condicions i configuració, l'avió amb el rol de seguidor aconsegueix amb pràcticament la mateixa velocitat, 0,29 nusos menys, un consum per hora de 244,45 kg menys que el líder i en el total del trajecte es tradueix en 793,41 kg d'estalvi, un 10,55%. Cal destacar que amb menor consum de combustible aconsegueix mantenir la velocitat amb un rendiment de rotació de l'eix del motor N1 menor, beneficiant-se d'un menor esforç amb les implicacions en el cost de manteniment que comporta.

Durant la simulació i en l'anàlisi de resultats s'observa un increment en la intensitat del vòrtex fins a tal punt que a nivell de vol 280, el manteniment del vol en formació i el vol estable ha estat un repte crític degut a la desestabilització reiterada del vol en ser arrossegat pel vòrtex a la banda inestable del mateix, provocant la desconexió del pilot automàtic com a conseqüència d'una rotació brusca en l'eix longitudinal de més de 60° i la baixada en picat del morro de l'avió que trencava el vol en formació. Aquest efecte ha reduït significativament el nombre de mostres recollides i l'efecte d'estalvi de combustible fins al valor més baix de la taula amb un 2,76% d'estalvi entre ambdues aeronaus.

És demostrat a la taula l'estalvi del 10,55% del seguidor respecte el líder a nivell de vol 320, però els resultats obtinguts de la simulació calen ser analitzats en profunditat i s'ha extreure les dades que recolzen els interessos del projecte global i no només el benefici del seguidor.

En primer lloc, és conegut que un avió al allunyar-se del nivell òptim, que sol ser més elevat, perd eficiència i consumeix més combustible. Si s'analitza a nivell individual, en la Taula 13 s'observa l'increment de combustible total consumit en volar a nivells diferents de l'òptim:

Comparativa Nivell òptim Seguidor amb el nivell de màxima diferència Líder-seguidor						
Nivell de vol (FL)	Velocitat del so (KT)	Rotació N1 (%)	Velocitat sobre la terra (KT)	Consum de combustible mitjà (Kg/H)	Temps de Vol (H)	Consum Total (KG)
360	574	82	447,72	1931,08	3,326	6422,27
320	585	79,6	456,01	2060,55	3,27	6728,27
Diferència	11	-2,4	8,29	129,47	-0,06	306,00
Comparativa Nivell òptim Líder amb el nivell de màxima diferència Líder-Seguidor						
380	574	83	447,72	2072	3,33	6890,9
320	585	80,1	456,3	2305	3,26	7521,7
Diferència	11	-2,9	8,58	233	-0,06	630,8
Consum Incrementat col·lectivament						936,8

Taula 13: Increment de combustible total consum en volar en allunyar-se del FL òptim.

Nota: Elaboració pròpia.

Respecte el nivell de màxim estalvi aparent FL320, individualment consumeixen 306 kg més en el cas del seguidor i 630.8 kg més el líder, en conjunt consumeixen **936.8** kg més de no volar en els seus nivells més eficients.

Des d'una perspectiva global, la següent taula aporta els resultats del projecte i una visió més realista sobre la decisió de quin nivell cal prendre per atendre els interessos individuals i comuns del projecte Fello'Fly:

Consum total	Consum total en el vol en formació	Estalvi individual %	Consum total sense vol en formació	Estalvi global %	Estalvi en KG
360	13407,95	-5,43	13781,86	-2,71	373,91
360	13439,58	-8,48	14034,62	-4,24	595,04
340	13767,91	-9,25	14435,80	-4,63	-667,89
320	14249,96	-10,55	15043,37	-5,27	-793,41
300	15112,63	-8,10	15750,66	-4,05	-638,03
280	16402,88	-2,76	16632,14	-1,38	-229,26

Taula 14: Comparativa global del combustible requerit i estalvi entre el conjunt de les dues aeronaus..

Nota: Elaboració pròpia.

De la Taula 14 s'extreu diferents resultats;

1. FL320 és el nivell on un vol en formació estalvia més combustible en comparació a una parella d'aeronaus volant separades, fins a un 5.27 % menys a nivell global.
2. FL380 és el nivell en el que el conjunt d'aeronaus requereix menys combustible amb un total de 13.407,95 respecte els 13.781,86 que requereixen dues aeronaus que volen el mateix trajecte individualment, significant un 2.71% d'estalvi en el conjunt i 373,91 kg menys.

3. FL280 és el nivell de vol que requereix més combustible a canvi de recórrer la distància en menys temps.
4. Malgrat FL320 suposar el màxim estalvi comparatiu, requereix 842,01 Kg més de combustible que la parella que vola a FL380.
5. Malgrat mostrar un estalvi en el conjunt dels vols, el líder no veu el seu consum reduït pel vol en formació i no se'n beneficia, en tot moment incrementa el consum de combustible en allunyar-se del seu nivell òptim repercutint negativament en l'estalvi del conjunt.
6. FL 280, segons la simulació, marca un nivell límit inferior per als paràmetres de seguretat i eficiència, descartant nivells inferiors.

4. Discussió

4.1 Implicacions pràctiques i operacionals

Amb les dades sintetitzades i representades en taules com les que s'han analitzat prèviament, cal analitzar el valor, les conseqüències i implicacions que comporta l'aplicació de la proposta d'Airbus.

Econòmiques: Les conseqüències més motivadores que impulsen l'atractiu del projecte són les econòmiques, la reducció del consum de combustible es tradueix directament en una reducció dels costos operatius de cada vol que implementi el vol en formació amb el rol de seguidor. No només en la reducció del combustible que es consumeix, sino en el manteniment dels motors en patir menys desgast pel menor esforç requerit.

Quantificant la implicació econòmica directa, si s'obté un preu orientatiu del combustible utilitzat pels avions comercials de turbina és valorat en 2,49€ per galó. 1 galó equival a 3,785 litres que en multiplicar per la densitat estàndard del combustible de 0,803 equival a 3,039 kg. Convertint el preu, el querosè costa 0,819€/kg. [23]

Centrant-se únicament en aquesta ruta i posant com a exemple la companyia Iberia, opera 4 vols diaris de mitja entre anada i tornada. En escollir el nivell de vol FL380 per al vol en formació, el seguidor estalvia 373,91 kg que suposaria 306,363€ en el vol d'Arlanda a Madrid.

Centrant-se únicament en aquesta ruta i prenent com a exemple una companyia equivalent a l'operativa d' Iberia que opera 4 vols diaris de mitja entre anada i tornada, de multiplicar l'estalvi per la freqüència, es xifra en **1225,45 €** d'estalvi en només una de les múltiples rutes que opera l'aerolínia que compta amb aproximadament 280 vols diaris, dividits en 70 vols de llarg radi on l'impacte és notablement major i 210 vols de curt radi on caldria estudiar quants són candidats per al vol en formació.

Mediambientals: Col·lateralment, la reducció del consum de combustible suposa una emissió menor de gasos contaminants a l'atmosfera propiciant l'assoliment dels objectius del projecte. A més, un desgast menor dels motors, o expressat d'alta manera en aquest document com a Performance Factor, implica una major eficiència que els fa menys contaminants de cara al medi ambient.

Amb l'eina de càlcul d'emissions que ofereix OACI, en el cas d'estudi es calcula que les emissions de Co2 són de 0,083 de kg per passatger i per Km, que en suposar una mitja de 175 passatgers per trajecte, en els 4 vols diaris es generen 150.003,6 kg de Co2. Aplicant l'estalvi de 5,43% de combustible trobat de manera directament proporcional a les emissions, resulta en **8.145,20 kg de Co2** que es deixarien d'emetre i **1495,65 Kg** menys de combustible consumit.

Formacions de les tripulacions: El vol en formació es caracteritza per ser una operació complexa la qual cal preparar, practicar i mantenir validada per a assegurar una operació segura. És precis un programa de formació a les tripulacions per a desenvolupar els coneixements i les tècniques dels nous procediments a aplicar, una formació que incrementa el cost general de l'operació.

Tecnològiques: Actualment, el projecte de vol en formació requereix una tecnologia molt avançada i específica instal·lada en els avions A350 que han estat protagonistes de l'experiment. Una tecnologia tan limitada pot suposar un increment en el cost dels avions a més de la incompatibilitat entre possibles parelles si es manté l'exclusivitat tecnològica, limitant l'abast del projecte.

Modificacions regulacions i procediments: Tal com s'ha exposat en la part teòrica, les regulacions estableixen uns paràmetres de seguretat conservadors per garantir la seguretat. Aquest projecte es podria veure limitat per moltes regulacions i lleis de l'aire actuals que, de demostrar-se com a projecte exitós, viable i d'interès general, caldria revisar-les i modificar-les per permetre reduir les distàncies i establir nous procediments de gestió del trànsit aeri, comunicacions i procediments de contingència. Implicaria la coordinació dels diferents òrgans per estudiar i formular les propostes que s'adaptin al nou model de navegació.

Els procediments també haurien de ser revisats, afectant els de comunicació entre aeronaus i control aeri, els de contingència, tals com fallada de motor en creuer, despressurització, pèrdua de control de l'aeronau, haurien de ser modificats per tal de no intercedir en la seguretat de l'aeronau seguidora que hauria d'evitar una reducció repentina de la separació amb el seu precedent.

Seguretat: La seguretat és l'àmbit sobre el que gira l'anàlisi de risc, viabilitat i aprovació de la implementació del projecte. Caldria un estudi en profunditat dels riscos i noves mesures mitigadores que inspiri confiança d'un projecte segur i adaptable a l'aviació comercial.

FFHH: En la fase de creuer, de les més llargues en les fases d'un vol, on seria imperativa i constant la supervisió i vigilància per part dels pilots davant d'un potencial risc de gran magnitud en cas de fallada de l'operació. Aquest fet implica una fatiga incrementada exponencialment en la tripulació que pot tenir conseqüències afectant qualsevol altra fase crítica del vol com és la reducció de la capacitat de resposta dels pilots davant d'un efecte de sobresalt (Startle effect) que inclou les respostes físiques i mentals a un estímul inesperat sobtat i que pot afectar a la presa de decisions i disminuir la capacitat de mantenir l'atenció. Els factors humans s'haurien de tenir en compte en l'estudi de viabilitat del projecte Fello'Fly ja que podria augmentar considerablement el nombre de fases crítiques d'un vol que augmentant la càrrega de treball i fatiga en les tripulacions.

Meteorologia com a factor condicionant: L'emparellament parteix de molts condicionals que calen ser prèviament estudiats detingudament per poder planificar-lo i suposen fortes barreres per a efectuar-lo. La meteorologia cal que sigui ideal per a poder emparellar avions mantenint el màxim

grau de seguretat requerit. El vol en formació es veuria amenaçat si es creuen àrees de turbulència, meteorologia adversa, forts vents que desplacin en excés l'estela turbulenta (a nivell de creuer es poden trobar corrents de vent de més de 280 Km/H) i perdi intensitat. Per això, la planificació del vol seria més rigorosa, requerint una major precisió dels pronòstics i seguiment en viu.

Rols i interessos operatius Donat que el líder no obté cap benefici, cal establir un guió de rols en el vol en formació seguint els interessos del líder per tal de no haver d'ajustar-se als del seguidor, amb una comunicació efectiva i uns objectius predefinits. Donat el cas d'un major benefici global a costa d'un possible perjudici del líder, s'hauria d'establir una política de compensació per minimitzar l'impacte.

Interessos comercials, atractiu bitllets i capacitat de l'espai aeri.

El projecte Fello'Fly despertaria molts interessos comercials per les diferents àrees de benefici que abarca per a diferents clients. Entre aquests, despertaria l'interès de les aerolínies per la reducció de costos operatius i mediambientals servint a la vegada de publicitat de cara als clients per ostentar una política ecològica. De reduir els costos, podria millorar l'atractiu de les ofertes, gaudint d'un avantatge competitiva per a les companyies.

Aquest projecte interessa també a les organitzacions de control aeri i navegació aèria, permetent optimitzar la capacitat de l'espai aeri, augmentant l'oferta d'slots, descongestionant els aeroports i les rutes.

5. Conclusions i noves línies d'investigació

5.1 Conclusions

Després de la realització d'aquest Treball de Fi de Grau que es plantejava quantificar l'estalvi de combustible que resulta de volar en formació amb una altra aeronau durant la fase de creuer, es pot concloure la consecució dels següents objectius plantejats i els obstacles que s'han trobat.

Previ a l'investigació, s'ha aconseguit donar una visió dels conceptes generals i claus que impliquen un vol en formació, a nivell tècnic, lògica de la física implicada i el marc regulatori que l'envolta. Aquesta visió ha permès definir l'anàlisi d'oportunitats i barreres associades al projecte en el que s'inspira aquest treball, el Fello' Fly impulsat pel fabricant Airbus.

L'objectiu principal ha estat assolit, demostrant de manera pràctica i mitjançant les eines de simulació més properes a un vol real, l'estalvi quantitatiu de combustible en la tècnica de vol en formació. Per a la demostració i quantificació, s'ha simulat un cas pràctic d'un vol real entre Estocolm i Madrid amb dades i paràmetres reals. Gràcies a l'escenari realista del que es partia, s'ha pogut aproximar el resultat objectiu al demostrat per la pròpia fabricant Airbus en el seu vol real de prova, s'ha obtingut entre un 2,76 % i un 10,55% d'estalvi (depenent de les variables aplicades), respecte el 5-10% del que es partia i fa públic l'entitat amb paràmetres i dades de la investigació no accessibles.

En la formulació de les hipòtesis i preparació del cas pràctic, s'ha ampliat el ventall de paràmetres i possibilitats degut a la manca d'accés a la informació de natura confidencial. Aquest és l'obstacle principal amb el que s'ha topat la investigació, però ha suposat també una oportunitat per a diferenciar-se d'una investigació ja executada i s'ha obtat per dirigir-ho a un escenari diferent amb aeronaus alternatives a les ja utilitzades en el Fello'Fly, proposant l'aplicació del model a una escala menor en vols de mig radi amb dos Airbus A320 NEO i no de llarg radi amb dos A350 com ja s'ha demostrat.

Una de les altres hipòtesis més importants parteix de l'obstacle mencionat, la variabilitat de l'estalvi demostrat en el Fello' Fly era deconeguda i s'ha formulat una hipòtesi que partia dels principis d'aerodinàmica per proposar un major estalvi de combustible a mesura que es descendia de nivell. Amb la simulació, no només s'ha confirmat la hipòtesi, sinó que s'ha trobat un nivell límit FL280 que degut a la intensitat del vòrtex no permet obtenir beneficis aerodinàmics i suposa més riscos que avantatges.

No obstant, la confirmació de la hipòtesi no dona resposta a un dels dubtes plantejats inicialment que qüestiona quin nivell seria l'òptim per a l'execució del vol en formació. És cert que s'ha trobat a nivell de vol FL320 una diferència de 10,55% entre el consum del líder i el seguidor, però l'intercanvi de l'increment de combustible en allunyar-se del nivell òptim en comptes de volar a nivells més

propers a l'optíim no suposa un benefici global que ho compensi. És per això que malgrat estalviar un 5,43% a nivell de vol 380 suposa un estalvi a nivell col·lectiu i seria el preferit per a l'execució.

Com a conseqüència, a més de la demostració quantitativa de l'estalvi de combustible, s'ha trobat les implicacions i beneficis addicionals que suposaria aplicar aquesta tècnica proposada. Resumint-les en el cas pràctic, implica directament en un estalvi **1225,45€** , **8.145,20 kg de Co2** [24] i **1495,65 Kg** de combustible a més dels beneficis indirectes de manteniment, benefici social i mediambiental implícits. Aquests resultats i el compliment dels s nivells mínims de SAF imposats en diferents terminis a futur (Sustainable Aviation Fuel) a preus llunyanament més cars que el querosè actual, recolzen la idea del desenvolupament del projecte si s'aconsegueix resoldre les barreres que sorgeixen de les hipòtesis inicials i demostrades en la simulació.

Tal com es planteja i s'ha observat en la simulació, la tecnologia actual de pilot automàtic en els avions utilitzats, el sistema TCAS, els factors humans i els factors externs fan que sigui una maniobra complexa i d'alt risc que no seria aplicable a l'aviació actual. Aquesta conclusió s'extreu de l'experiència de pèrdua de control de l'avió a nivell de vol 280 per la intensitat del vòrtex, de l'àrdua tasca de manteniment del vol en formació en la posició òptima a tots els nivells investigats malgrat gaudir d'unes condicions exteriors estables i estàndards que facilitaven el posicionament i finalment, el primer i més important obstacle trobat en aproximar-se, la constant alerta de proximitat i resolutiva del TCAS que obligava a trencar el vol en formació.

Des del punt de vista dels factors humans, és prematur concloure l'acceptació social de l'aplicació del projecte sense estudiar la confiança del client, usuari i operador, ni els efectes col·laterals d'efectuar el vol en formació, com podrien per part dels tripulants tècnics la fatiga, l'augment de la càrrega de treball, i a nivell de la comprensió del públic de la maniobra i els seus paràmetres de seguretat.

En resum, en aquest Treball de Fi de Grau s'ha demostrat l'impacte positiu i de canvi que tindria el projecte del vol en formació en l'evolució dels diferents àmbits del sector aeronàutic; en les regulacions aeronàutiques, en la capacitat de l'espai aeri, en l'economia, en la societat, en el medi ambient, en els procediments operatius i de comunicació dels treballadors del sector, tot i que al mateix temps, avui en dia, es requereix un major grau d'investigació de viabilitat del projecte en els aspectes que impacten en la seguretat de la operativa.

5.2 Propostes per a investigacions futures

En la fase de desenvolupament en la que es troba aquest projecte, calen noves línies d'investigació que persegueixin de manera paral·lela l'objectiu de la viabilitat del projecte. Nous treballs que abordin la resolució de les barreres trobades que dificulten la minimització de riscos associats a la maniobra i potencial aplicació global. Algunes d'aquestes propostes són:

- Implementació i impacte econòmic en la xarxa operativa d'una aerolínia.
- Nova funció del sistema TCAS que permeti els vols en formació.
- Sistema de posicionament òptim compatible amb altres aeronaus.

- Estudi de l'efecte del vòrtex segons el tipus d'aeronau i les condicions meteorològiques.
- Disseny de Procediments de comunicació estàndards en la coordinació del vol en formació i l'ATC.
- Anàlisi de riscos per a l'aeronau seguidora en l'aplicació dels procediments de contingència de l'aeronau líder.
- Anàlisi de l'impacte en l'àrea de factors humans, especialment pel que fa a la fatiga i a la càrrega de treball de les tripulacions tècniques i controladors en aplicar el Fello'Fly, que impacta directament en la seguretat de la operació.
- Anàlisi quantitativa de l'impacte ambiental.

En general, els nous camps d'estudi proposats poden contribuir a la superació dels reptes i oportunitats que proposa el vol en formació, desenvolupant un projecte més segur, viable i eficient de gran valor per a l'aviació comercial.

6. Referències

1. ICAO, "Contribución de la aviación a la agenda de desarrollo sostenible de 2030 de la organización de las naciones unidas," 2019. [Online]. Available: https://www.icao.int/Meetings/a40/Documents/WP/wp_189_es.pdf
2. Skybrary, "Classification of Airspace," ICAO Annex 11, Ch. 2, App. 4. [Online]. Available: <https://skybrary.aero/articles/classification-airspace>
3. EASA, "Easy Access Rules for Standardised European Rules of the Air (SERA) - Revision from February 2023," EASA, 2023. [Online]. Available: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/online-publications/easy-access-rules-standardised-european?page=15>
4. EUROCONTROL, "EUROCONTROL Guidelines for the Certification and Operation of State Aircraft in European RVSM Airspace", edition 3, 23/03/2021 , [Online]. Available: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2021-03/eurocontrol-rvsm-military-guidelines-ed-3.pdf>
5. EUROCONTROL, "Navigation Performance," PBN Portal. [Online]. Available: <https://pbnportal.eu/epbn/main/Overview-of-PBN/PBN-Concept---Unpacked/PBN-Navigation-Specifications/Navigation-Performance.html>
6. EUROCONTROL, "European PBN Route Spacing Handbook," 2020. [Online]. Available: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-04/eurocontrol-european-pbn-route-spacing-handbook-3.pdf>
7. ICAO, "ROADMAP 2022 – 2026: PERFORMANCE-BASED OPTIMIZATION OF SAM AIRSPACE," 2022. [Online]. Available: www.icao.int/SAM/Documents/2022-RLA06901-SAMIG27/SAMIG27_WP2.3%20Roadmap.pdf
8. DGAC, "OPERACIONES PBN," 2020. [Online]. Available: https://www.dgac.gob.cl/wp-content/uploads/2020/10/DAN_160.pdf
9. ICAO, "North Atlantic Operations and Airspace Manual," ICAO, 2019. [Online]. Available: [https://www.icao.int/WACAF/Documents/Meetings/2019/SAT24/SAT%2024%20WP%2017e%20_APP%20E_NAT%20Doc%20007%20%20\(EN\)%20-%20Edition%20V.2019-2_eff.pdf](https://www.icao.int/WACAF/Documents/Meetings/2019/SAT24/SAT%2024%20WP%2017e%20_APP%20E_NAT%20Doc%20007%20%20(EN)%20-%20Edition%20V.2019-2_eff.pdf)
10. Skybrary, EUROCONTROL ATM Lexicon, "Formation Flights", Loss of Separation, 2019. [Online]. Available: <https://skybrary.aero/articles/formation-flights#:~:text=Definition.as%20clearances%20issued%20by%20ATC>.
11. ICAO, "Application of Separation Minima, North Atlantic region," 1st Ed., Amd. 13, Jan. 2024. [Online]. Available: [https://www.icao.int/EURNAT/EUR%20and%20NAT%20Documents/NAT%20Documents/NA_T%20Doc%20008%20-%20NAT%20ASM/NAT%20Doc%20008%20\(EN\)%20-%20Edition%201,%20Amd%2013.pdf](https://www.icao.int/EURNAT/EUR%20and%20NAT%20Documents/NAT%20Documents/NA_T%20Doc%20008%20-%20NAT%20ASM/NAT%20Doc%20008%20(EN)%20-%20Edition%201,%20Amd%2013.pdf)
12. NATS, "New separation standard permanently adopted over the North Atlantic," NATS, 2021. [Online]. Available: <https://www.nats.aero/news/new-separation-standard-permanently-adopted-over-the-north-atlantic>

13. UK Civil Aviation Authority, "CAT.OP.MPA.150 Fuel policy," 2012. [Online]. Available: https://regulatorylibrary.caa.co.uk/965-2012/Content/Regs/06750_CATOPMPA150_Fuel_policy.html
14. BOE, "Real Decreto 601/2016, de 2 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de la Circulación Aérea Operativa," BOE-A-2016-11481, 2016. [Online]. Available: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2016-11481>
15. T. Marks et al., "Climate Impact Mitigation Potential of Formation Flight," in *Aerospace*, vol. 8, no. 1, p. 14, 2021, <https://doi.org/10.3390/aerospace8010014>
16. D. Jin et al., "The calculation and analysis of the trailing vortex influence in the flight of aircraft," in *Proceedings of the 2015 4th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering*, 2015. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/301450003_The_calculation_and_analysis_of_the_trailing_vortex_influence_in_the_flight_of_aircraft
17. "La Densidad Del Aire." *Pasión por Volar*. [Online]. Available: <https://www.pasionporvolar.com/la-densidad-del-aire/>
18. ICAO, Chapter Six, "Climate Change Mitigation: Operations: fello'fly: Airbus' Wake Energy Retrieval concept shows promise for operational fuel savings," 2022. [Online]. Available: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVR_eport2022_Art39.pdf
19. Airbus, "How a fello'fly flight will actually work," Airbus, 2020. [Online]. Available: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2020-09-how-a-fellofly-flight-will-actually-work>
20. FlyByWire Simulations, "TCAS - Flight Instrument Indicators," FlyByWire Simulations Documentation. [Online]. Available: <https://docs.flybywiresim.com/pilots-corner/advanced-guides/flight-guidance/tcas/#flight-instrument-indicators>
21. Lufthansa Systems, "Lido Route Manual." [Online]. Available: <https://www.lhsystems.com/solutions-services/flight-deck-solutions/lidonavigation/lidoroutem anual>
22. "True Air Speed (TAS)." [Online]. Available: <https://e6bx.com/>
23. "Jet fuel prices," IndexMundi. [Online]. Available: <https://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=gasolina-de-aviacion&mes=12&moneda=eur>
24. ICAO, "ICAO Carbon Emissions Calculator (ICEC)." [Online]. Available: <https://www.icao.int/environmental-protection/Carbonoffset/Pages/default.aspx>

7. Annexos



Figura 35. Imatge de la MCDU rebutjant requisits RNP10 en estar sobrevolant un espai aeri RNP 2.

Font: Elaboració pròpia.



Figura 36. Captura de la simulació del cas pràctic on s'observa l'avió líder desde la perspectiva de l'avió seguidor i els vòrtex generats sintèticament per a la visualització i posicionament òptim.

Font: Elaboració pròpia.



Figura 37. Imatge capturada que representa visualment el rendez-vous del Fello'Fly darrere d'un A330.

Nota: No es tracta d'un vol en formació, sinó d'una espera però permet visualitzar la tècnica del vol en formació.

Font: Elaboració pròpia.



Figura 38. Imatge capturada que representa visualment desde la perspectiva del líder el rendez-vous del Fello'Fly davant d'un A330.

Nota: No es tracta d'un vol en formació, sinó de la fase de creuer sobre l'Atlàntic on coincideixen dos trànsits, però permet visualitzar la tècnica del vol en formació.
Font: Elaboració pròpia.



Figura 39. Imatge capturada que representa visualment desde la perspectiva del seguidor el rendez-vous del Fello'Fly darrere d'un A350.

Nota: No es tracta d'un vol en formació, sinó de la fase de creuer sobre l'Atlàntic on coincideixen dues aeronaus separades per 1000', però permet visualitzar la tècnica del vol en formació.
Font: Elaboració pròpia.

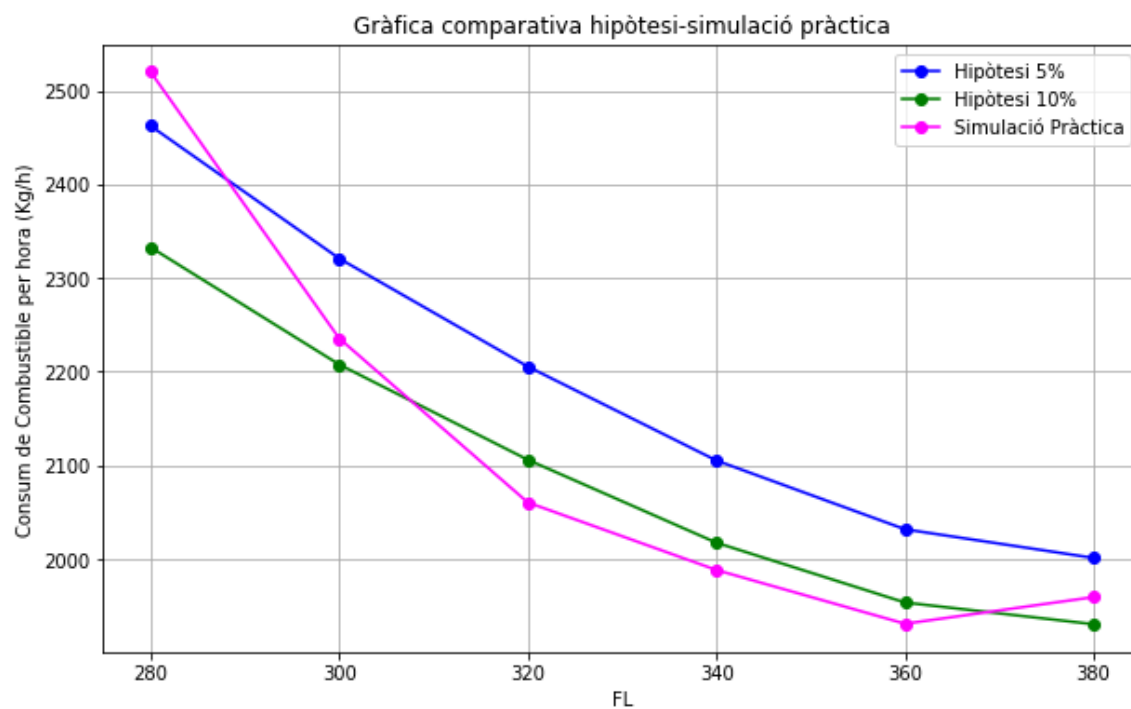


Figura 40. Gràfica comparativa de les dues hipòtesis inicials i la corba de resultats de la simulació.

Nota: Es pot observar que els resultats de la simulació són coherents en relació al projecte Fello' Fly i s'acosten a les hipòtesis plantejades, demostrant la no linealitat dels resultats teòrics.

Font: Elaboració pròpia.