Universitat Autònoma de Barcelona

La eficàcia de la sostenibilitat per a la descarbonització del sector aeri mitjançant la implementació de sistemes d'IA

Memòria del Treball de Fi de Grau en Gestió Aeronàutica

Autor

Bernat Falcón Oller

Tutora

Dra. Mónica Perna Hernández

Escola d'Enginyeria UAB

Barcelona, 25 de juny de 2026

AGRAÏMENTS

M’agradaria agrair a la Dra. Mónica Perna Hernández per la seva dedicació i guia que m’ha brindat durant el seguiment i desenvolupament d’aquest treball.

Tanmateix, m’agradaria fer una menció especial i donar les gràcies a la meva família que m’ha donat el seu suport i els ànims per arribar fins al final d’aquest camí.

RESUM

Aquest treball analitza la descarbonització del sector aeronàutic europeu i els seus principals impactes econòmics, socials i tecnològics. L'estudi examina el paper del Pacte Verd Europeu, el paquet *Fit for 55*, l'EU ETS i *ReFuelEU Aviation*, així com els efectes que aquestes mesures poden generar sobre aerolínies, aeroports, proveïdors de combustible i passatgers. També es valoren les alternatives sostenibles al querosè convencional i el paper de la intel·ligència artificial com a eina per millorar l'eficiència operativa i reduir emissions. El treball conclou que la descarbonització de l'aviació és necessària, però només serà viable si combina regulació, innovació tecnològica, eficiència econòmica i equilibri territorial.

PARAULES CLAU: Descarbonització, Sector aeronàutic, *Fit for 55*, Combustibles d'aviació sostenibles, Intel·ligència artificial.

RESUMEN

Este trabajo analiza la descarbonización del sector aeronáutico europeo y sus principales impactos económicos, sociales y tecnológicos. El estudio examina el papel del Pacto Verde Europeo, el paquete *Fit for 55*, el EU ETS y *ReFuelEU Aviation*, así como los efectos que estas medidas pueden generar sobre aerolíneas, aeropuertos, proveedores de combustible y pasajeros. También se valoran las alternativas sostenibles al queroseno convencional y el papel de la inteligencia artificial como herramienta para mejorar la eficiencia operativa y reducir emisiones. El trabajo concluye que la descarbonización de la aviación es necesaria, pero solo será viable si combina regulación, innovación tecnológica, eficiencia económica y equilibrio territorial.

PALABRAS CLAVE: Descarbonización, Sector aeronáutico, *Fit for 55*, Combustibles sostenibles de aviación, Inteligencia artificial.

ABSTRACT

This dissertation analyses the decarbonisation of the European aviation sector and its main economic, social and technological impacts. It examines the role of the European Green Deal, the Fit for 55 package, the EU ETS and ReFuelEU Aviation, as well as the effects these measures may have on airlines, airports, fuel suppliers and passengers. It also assesses sustainable alternatives to conventional kerosene and the role of artificial intelligence as a tool to improve operational efficiency and reduce emissions. The study concludes that aviation decarbonisation is necessary, but it will only be viable if it combines regulation, technological innovation, economic efficiency and territorial balance.

KEY WORDS: Decarbonisation, Aviation sector, Fit for 55, Sustainable Aviation Fuels, Artificial intelligence.

INDEX

ABREVIATURES.....3
INTRODUCCIÓ.....4
CAPITOL I - ESCENARIS D'EFICIÈNCIA DE LA DESCARBONITZACIÓ A L'AERONÀUTICA.....7
1. Context actual de l´estat de la descarbonització a la Unió Europea.....7
1.1. Aportacions del Pacte Verd Europeu al sector aeronàutic.....8
1.2. Influència dels Objectius de Desenvolupament Sostenible 2030 per la reducció d'emissions.....9
2. Marc jurídic d´aplicació a la sostenibilitat a la Unió Europea.....9
2.1. Competències de la Unió Europea en matèria ambiental.....10
2.2. Competències estatals d'Espanya en aviació.....11
3. Mecanismes per controlar les emissions al sector aeronàutic.....11
3.1. Aspectes rellevant de l'*EU Emissions Trading System*.....11
3.2. Implementació del *Refuel EU*.....13
3.3. Paper complementari de CORSIA i de l'ETD.....13
CAPÍTOL II - IMPACTE ECONÒMIC I SOCIAL DE LA DESCARBONITZACIÓ AL SECTOR AERONÀUTIC.....15
4. La influència econòmica en els agents dels sector aeronàutic.....15
4.1. Quantificació del cost de la descarbonització.....15
4.2. Repercussió en l'estructura de costos de les aerolínies.....18
4.3. Impacte econòmic en els aeroports.....20
5. Afectació sobre els passatgers, demanda i connectivitat.....22
5.1. Trasllat dels costos al preu del bitllet i impacte en la demanda.....22
5.2. Operativitat en la connectivitat territorial.....24
5.3. Riscos en la competitivitat europea.....26
6. Alternatives sostenibles de la combustió.....27
CAPÍTOL III - APORTACIONS DELS SISTEMES D'INTELLIGÈNCIA ARTIFICIAL A LA DESCARBONITZACIÓ AÈRIA.....29
7. Les aplicacions de la IA com a eina de reducció d'emissions per la millora del medi ambient.....30
8. Costos i impacte de la implementació dels sistemes d'IA en el transport aeri.....31
9. Anàlisi cost-benefici de l'aplicació de la IA en el sector aeronàutic en la descarbonització.....33

CONCLUSIONS.....35
BIBLIOGRAFIA.....37
LEGISLACIÓ.....37
ALTRES DOCUMENTS.....38
WEBGRAFIA.....39

ABREVIATURES

ACI	*Airport Council International*
AELC	Associació Europea del Lliure Comerç
AFIR	*Alternative Fuels Infrastructure Regulation*
ATM	Air Traffic Management
CAS	Combustible d'Aviació Sustenible
CORSIA	*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*
EEE	Espai Econòmic Europeu
ETD	*Energy Taxation Directive*
GJ	Gigajoule
IA	Intel·ligència Artificial
OACI	Organització d'Aviació Civil Internacional
SAF	*Sustainable Avition Fuel*
TFUE	Tractat de Funcionament de la Unió Europea
UE	Unió Europea

INTRODUCCIÓ

L'objectiu d'aquest treball és analitzar el procés de descarbonització del sector aeronàutic dins del marc de la Unió Europea, estudiant tant les mesures jurídiques aprovades per reduir les emissions com els efectes econòmics, socials i operatius que aquestes poden arribar a generar sobre els diferents agents del sector. En concret, el treball se centra en l'impacte del Pacte Verd Europeu, el paquet *Fit for 55*, el sistema europeu de comerç d'emissions, el reglament *ReFuel Aviation* i altres instruments relacionats amb la transició ecològica del sector del transport aeri.

La proposta d'aquest estudi parteix de la necessitat d'entendre com, un sector essencial per a la connectivitat global, el turisme, el comerç i la mobilitat europea que cada cop creix més i cada any bat nous records, pot adaptar-se a uns objectius climàtics cada vegada més exigents. L'aviació és un mercat difícil de descarbonitzar perquè depèn totalment del querosè convencional i perquè moltes de les alternatives tecnològiques encara presenten limitacions de cost, maduresa i aplicació comercial. És per això que la descarbonització no només planteja un desafiament ambiental, sinó també econòmic, jurídic i de gestió aeronàutica.

L'elecció d'aquest tema sorgeix de l'interès d'estudiar un problema d'actualitat i vinculat amb el futur del sector. La sostenibilitat ja no és una qüestió de cara a la galeria, sinó un element central en la regulació, competitivitat i de gestió empresarial. Per aquest motiu, resulta rellevant analitzar fins a quin punt les mesures ambientals poden transformar l'estructura de costos del sector, afectar la demanda dels passatgers i condicionar la connectivitat territorial.

El treball també pretén valorar si la transició ecològica pot arribar a generar desigualtats entre els diferents actors del sector. Les aerolínies, els aeroports, els proveïdors de combustible i els passatgers no assumeixen els costos de la mateixa manera. A més, els efectes poden variar segons el tipus de ruta, el model de companyia, la mida de l'aeroport o la disponibilitat d'alternatives de transport. Per aquest motiu, l'estudi no es limita a descriure les mesures de descarbonització, sinó que també intenta analitzar qui en suporta els costos i quines conseqüències poden derivar-se'n.

L'estudi està estructurat en tres capítols principals. En el primer capítol s'analitza el marc jurídic i polític de la descarbonització del sector aeronàutic. Aquí es presenta el context actual de les emissions de l'aviació, el paper del Pacte Verd Europeu, la influència dels objectius climàtics de la Unió Europea i els principals mecanismes normatius aplicables

al transport aeri. Així mateix, s'estudien les diferents competències entre la Unió Europea i l'Estat Espanyol en matèria ambiental i de transport aeri.

En el segon capítol s'estudia l'impacte que aquestes ambicions mediambientals poden tenir en la economia i la societat. Un cop exposat el marc normatiu, es valora com aquestes obligacions es tradueixen en costos concrets per a les aerolínies, els aeroports i els proveïdors de combustible. També s'analitza el possible trasllat d'aquests costos al preu del bitllet, l'impacte sobre la demanda, la connectivitat territorial i la competitivitat europea. Aquest capítol és important perquè mostra que la transició ecològica no afecta tots els agents de la mateixa manera i que pot generar efectes desiguals dins del mercat aeri europeu.

En aquest segon tema, també es tracten alternatives sostenibles a la combustió convencional com els combustibles d'aviació sostenibles, la propulsió elèctrica i l'hidrogen. Aquest apartat permet valorar si existeixen solucions tecnològiques capaces de reduir la dependència del querosè i mitigar part dels costos analitzats anteriorment. No obstant això, també es posa de manifest que aquestes alternatives encara presenten limitacions importants i que, a curt termini, no poden substituir completament els mecanismes actuals de descarbonització.

En el tercer capítol s'analitzen les aportacions dels sistemes d'intel·ligència artificial a la descarbonització aèria. La IA es presenta com una eina complementària que pot contribuir a millorar l'eficiència operativa del sector mitjançant l'optimització de trajectòries, la gestió del trànsit aeri, el manteniment predictiu i l'avaluació ambiental. Tot i això, també s'estudien els costos i riscos associats a la seva implementació, com la certificació, la supervisió humana, la ciberseguretat, la fiabilitat tècnica i el consum energètic. Aquest capítol permet valorar si la IA pot contribuir realment a reduir emissions o si el seu paper ha de ser considerat només com un suport parcial dins d'una estratègia més àmplia.

La metodologia utilitzada en aquest treball és principalment de revisió bibliogràfica, normativa i documental. S'han analitzat textos legislatius de la Unió Europea, informes institucionals, estudis econòmics i documents tècnics elaborats per organismes especialitzats en aviació, sostenibilitat i regulació. Aquesta metodologia permet combinar l'anàlisi jurídica de les obligacions climàtiques amb una valoració econòmica i operativa dels seus efectes sobre el sector aeronàutic.

En definitiva, aquest treball pretén oferir una visió global i equilibrada de la descarbonització del sector aeronàutic europeu. D'una banda, reconeix la necessitat d'avançar cap a un model de transport aeri més sostenible i compatible amb els objectius

climàtics de la Unió Europea. De l'altra, posa de manifest que aquesta transició comporta costos elevats, riscos de competitivitat, possibles impactes socials i limitacions tecnològiques. Per això, la qüestió principal no és només reduir emissions, sinó fer-ho d'una manera econòmicament viable, socialment equilibrada i tècnicament realista.

CAPÍTOL I - EFICIÈNCIA DE LA DESCARBONITZACIÓ DEL SECTOR AERONÀUTIC

El canvi climàtic representa una de les principals amenaces mundials amb impactes directes i indirectes sobre els diferents sistemes econòmics, socials i també ambientals. Sota aquestes circumstàncies, la Unió Europea, d'ara en endavant UE, ha esdevingut una de les regions a nivell mundial amb un paper més actiu a l'hora de prendre decisions i aprovar lleis en contra del canvi climàtic, afectant així al sectors del transport i per tant, l'aeronàutic.

1. Context actual de l´estat de la descarbonització a la UE

L'any 2023 l'aviació en el món va representar un 2,5% de les emissions mundials, va generar aproximadament unes 940,60 Mt de CO_2 i xifres molt properes a les 1024,82 Mt CO_2 dels nivells registrats abans de la pandèmia de la COVID-19, segons dades de l'Agència Internacional de l'Energia [1].

A la Unió Europea i a la Associació Europea del Lliure Comerç, a partir d'ara AELC, tots aquells vols procedents de la UE i de l'AELC van representar el 12% del total d'emissions de gasos d'efecte hivernacle en el sector del transport i un 4% del total de les emissions dels 27, Islàndia, Suïssa i Noruega. A més, és la branca de transport que ha experimentat un increment de les emissions més ràpid comparada amb les altres i que segons la OACI, pel 2050, les seves emissions podrien triplicar-se si se segueix aquesta tendència.

És per això que a Europa, per poder seguir amb els seus objectius climàtics, el sector aeronàutic es troba actualment en una etapa de transició pel que fa a la seva sostenibilitat ambiental. Tal i com s'esmenta en l'*European Aviation Enviromental Report 2025* [2], l'aviació constitueix una peça important dins de la xarxa de connectivitat de transport a la regió, però també és un dels sectors més complexos a l'hora de descarbonitzar. L'informe subratlla que el sector aeronàutic reb cada cop més pressions per assolir els objectius ambientals establers a nivell europeu i internacional, més enllà de les emissions de CO_2, com també altres partícules que fan proliferar el canvi climàtic i afecten a la salut pública com l'òxid de nitrogen, òxid de sofre i altres.

L'Agència Internacional de l'energia informa de la necessitat del conjunt integral de les mesures destinades a promoure tecnologies innovadores, ampliar els usos dels

[1] *Vid.* LOMBARDO, LEO. (2025) "CO_2 emissions in aviation in the Net Zero Scenario, 2000-2030", *International Energy Agency*, en *https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation* (accés 15 març 2026)

[2] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY. "European Aviation Environmental Report 2025", *EASA*. *https://www.easa.europa.eu/en/light/topics/european-aviation-environmental-report-2025* (accés 15 març 2026).

Sustainable Avition Fuel , anoments SAF a partir d'aquí, i implementar una gestió de la demanda per reduir el nivell d'emissions, actualment en gran augment, per reduir-les per sota de les 1000 Mt de CO_2 pel 2030 i d'acord amb l'escenari de Zero Emissions Netes pel 2050 [3].

Davant d'aquest escenari d'augment sostingut d'emissions i de la complexitat tècnica que representa la descarbonització de l'aviació, la UE ha impulsat un marc estratègic integral destinat a transformar el model productiu i energètic europeu. Aquest marc s'entra en profunditat principalment en el Pacte Verd Europeu.

1.1. Aportacions del Pacte Verd Europeu al sector aeronàutic

Presentat per la Comissió Europea el desembre de l'any 2019 per la presidenta de la comissió, Ursula Von der Leyen, el seu objectiu és dirigir la transició cap a una economia climàticament neutra i sostenible i treballar per arribar a ser el primer continent del món neutre.

El Pacte Verd Europeu, és la contribució de la UE a l'Acord de París i que marca l'objectiu estratègic de mantenir l'escalfament global com a màxim a 1,5ºC respecte els nivells pre-industrials. El pacte no només fixa directrius generals, sinó que defineix metes concretes de reducció d'emissions. En concret, estableix la necessitat de reduir el 55% de les emissions netes de gasos d'efecte hivernacle el 2030 respecte als nivells de l'any 1990, fins a assolir la neutralitat climàtica l'any 2050 [4]. Es vol assolir aquest repte passant per l'impuls d'un model d'economia circular, la descarbonització de la indústria, la restauració del medi ambient, aplicant pràctiques agrícoles més sostenibles i garantint una transició justa i equitativa [5].

Perquè aquests objectius fossin jurídicament vinculants i per tant esdevinguessin una obligació legal, la UE va aprovar la Llei Europea del Clima, Reglament (UE) 2021/1119[6],

[3] *Vid.* LOMBARDO, LEO. "CO_2 emissions...", *Op.cit.*
[4] COMISSIÓ EUROPEA. "El Pacto Verde europeo". *Promesas Cumplidas*, en. *https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es (*accés 22 març 2026)
[5] CONSELL DE LA UNIÓ EUROPEA. "Principales objetivos del Pacto Verde". *Por qué hace falta el Pacto Verde*, en *https://www.consilium.europa.eu/es/policies/european-green-deal/* (accés 22 març 2026).
[6] Reglamento (UE) 2021/1119 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de junio de 2021 por el que se establece el marco para lograr la neutralidad climática y se modifican los Reglamentos (CE) nº 401/2009 y (UE) 2018/1999 («Legislación europea sobre el clima»), *DOUE*, núm. 243, de 9 de julio de 2021.

que referma legalment aquests compromisos de reducció de les emissions i neutralitat climàtica amb l'objectiu intermedi de de reduir-les a un 55% l'any 2030 [7].

1.2. Influència dels Objectius de Desenvolupament Sostenible 2030 per a la reducció d'emissions

Per tal de garantir que els diferents estats membres de la unió compleixin amb l'objectiu de reduir el 55% d'emissions pel 2030, la Comissió Europea va proposar el paquet legislatiu d'execució *Fit for 55* que posteriorment va ser adoptat pel Parlament i el Consell. És el conjunt d'iniciatives i modificacions normatives destinades a alinear tots els sectors econòmics en al conjunt de la UE per reduir les emissions de gasos d'efecte hivernacle [8].

Dins d'aquest paquet de mesures hi ha un reglament dedicat expressament a l'aviació anomenat *ReFuel EU Aviation*. Aquest implicarà que:

Els proveïdors hauran d'oferir un percentatge mínim de subministrament de combustibles d'aviació sostenible per les aeronaus dels aeroports de la UE i anar augmentant gradualment la quantitat cada 5 anys. A més, també un percentatge d'aquests SAF, dedicat a combustibles sintètics o electro-combustibles.

Aquelles aerolínies que surtin d'aeroports de la UE, només podran efectuar el proveïment del combustible necessari per a les aeronaus per evitar les emissions relacionades amb l'excés de pes provocat per les pràctiques del proveïment extra de combustible.

Els aeroports hauran de garantir la infraestructura necessària per proveir i emmagatzemar combustibles d'aviació sostenible.

2. Marc jurídic d´aplicació a la sostenibilitat a la Unió Europea i a la UE

La política climàtica europea i la regulació i limitació dels diferents sistemes per descarbonitzar el conjunt dels seus estats com l'estratègia del Pacte Verd, la Llei Europea del Clima i el paquet de mesures *Fit for 55*, no es poden entendre deixant al marge el marc competencial establert en els Tractats de la Unió Europea i el marc competencial de cada estat membre.

---

[7] COMISSIÓ EUROPEA. "European Climate Law", *Climate Action, en* https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_en?prefLang=es%20https://eur-lex.europa.eu/ES/legal-content/summary/european-climate-law.html (accés 25 març de 2026)

[8] CONSELL DE LA UNIÓ EUROPEA."The ReFuelUE aviation regulation will oblige Fit for 55: increasing the uptake of greener fuels in the aviation and maritime sectors", en *https://www.consilium.europa.eu/es/infographics/fit-for-55-refueleu-and-fueleu/ (accés 24 març* 2026).

2.1. Competències de la UE en matèria ambiental i de transports

Les polítiques climàtiques de la Unió Europea es fonamenten jurídicament en el Tractat de Funcionament de la Unió Europea, d'ara en endavant TFUE, específicament en els articles 4, 191, 192 i 193 que regulen les accions de la Unió en assumptes de medi ambient i les seves competències:

L'article 4 TFUE estableix les diferents competències compartides entre cada estat membre de la Unió i la pròpia Unió Europea, on s'hi troba la competència de medi ambient, així com també la de transport.

Això vol dir que tan els estats pel seu compte o la UE poden legislar en aquesta matèria, sempre i quan els estats actuïn en la mesura que la normativa europea els permeti [9] .

L'article 191 TFUE estableix que la política mediambiental de la Unió seguirà els objectius de preservar, protegir i millorar la qualitat del medi ambient, protegir la salut de les persones, utilitzar prudent i racionalment els recursos naturals i promoure mesures a nivell internacional per fer front als problemes ambientals, regionals o globals, i en particular, el combatre el canvi climàtic

Aquest article incorpora conceptes com *qui contamina paga*, que constitueix i legitima el Sistema Europeu de Comerç d'Emissions, també anomenat EU ETS [10].

L'article 192 TFUE permet al Parlament Europeu i el Consell adoptar totes aquelles mesures o limitacions necessàries per assolir els objectius ambientals esmentats en l'article anterior [11].

I finalment, **l'article 193 TFUE** remarca que les mesures de protecció adoptades en l'article 192 no exclouen a cap estat membre d'introduir mesures més restrictives [12].

[9] Art. 4 del Tractat de la Unió Europea i Tractat de Funcionament de la Unió Europea-TFUE, la Conferència intergubernamental que ha adoptat el Tractat de Lisboa, *DOUE,* núm. 83, de 30 de març de 2010.
[10] Art. 191. del Tractat de la Unió Europea i Tractat de Funcionament de la Unió Europea-TFUE
[11] Art. 192. del Tractat de la Unió Europea i Tractat de Funcionament de la Unió Europea-TFUE
[12] Art. 193. del Tractat de la Unió Europea i Tractat de Funcionament de la Unió Europea-TFUE

2.2. Competències estatals d'Espanya en aviació

En competències d'aviació, qui té la competència exclusiva és l'estat Español. L'article 149.1.20 de la Constitució Espanyola li atribueix ple control sobre l'espai aeri, el trànsit i el transport aeri, així com totes les infraestructures d'interès general [13].

Pel que fa a la matèria ambiental, el mateix article 149.1.23 de la CE estableix que és l'estat qui té competències per marcar la legislació bàsica sobre protecció del medi ambient, sense perjudici de cap de les competències corresponents a les comunitats autònomes d'Espanya [14].

No obstant això, tot i que això està dictat a la Constitució Espanyola, l'exercici d'aquestes competències estatals en medi ambient i transport són compartides amb la Unió Europea, tal i com s'ha citat anteriorment. Per tant, qualsevol normativa o reglament que es desenvolupi dins de l'estat, ha d'estar dins del marc i els límits establerts pel dret europeu.

3. Mecanismes per controlar les emissions del sector aeronàutic

L'establiment de metes climàtiques ambicioses per a la descarbonització, van molt més enllà de declaracions estratègiques per materialitzar-se i exigeixen la creació de mecanismes concrets per garantir-ne un compliment efectiu d'aquestes.

Des de la Unió, se n'han creat molts d'aquests mecanismes, però en el cas del sector aeronàutic s'ha creat un sistema de control que integra instruments de mercat com el Sistema Europeu de Comerç d'Emissions o d'altres com el *ReFuelEU Aviation.* Mecanismes establerts dins de la política de reducció d'emissions, dins del paquet de mesures *Fit for 55* [15]*.*

3.1. Aspectes rellevants de l'*EU Emissions Trading System*

El sistema Europeu de Comerç d'Emissions, d'ara en endavant EU ETS, és un dels instruments principals del mercat de la Unió Europea per disminuir les emissions de gasos d'efecte hivernacle. Aquest mecanisme es fonamenta en el principi de *qui contamina paga* i estableix un límit màxim d'emissions per als sectors inclosos, entre els quals es troba l'aviació en els vols dins de l'Espai Econòmic Europeu.

---

[13] Art.149.1.20 de Constitució Espanyola, BOE, núm. 311, de 29 de desembre de 1978.
[14] Art.149.1.23 de Constitució Espanyola, BOE, núm. 311, de 29 de desembre de 1978.
[15] COMISSIÓ EUROPEA. "Reducing emissions from aviation", *Climate Accion*, en *https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/reducing-emissions-aviation_en?utm*, (accés 30 març).

El funcionament d'aquest mecanisme s'articula mitjançant drets d'emissió, on cada dret permet emetre una tona de CO_2[16]. Aquests drets es venen en subhastes i fins i tot poden ser objecte de negociació dins del mercat del carboni de la UE. Com més baix sigui el límit màxim establert dels EU ETS, menor també serà l'oferta de drets d'emissió disponible en el mercat de la UE, incrementant així el seu cost i per tant incentivant la reducció d'emissions [17].

El sistema va ser llançat l'any 2005 en fase pilot i s'ha anat revisant per adaptar-lo i alinear-lo amb els diferents objectius climàtics generals de la UE. Actualment, amb l'última reforma de l'any 2023, està alineat amb el Pacte Verd i el *Fit for 55*.

Per actualitzar-lo al paquet, es van introduir canvis ambiciosos amb l'objectiu d'augmentar l'ambició climàtica del sector. Entre les principals novetats es troba la reducció progressiva dels drets gratuïts d'emissió, transició amb la finalitat de la seva eliminació total i la implantació d'un sistema basat majoritàriament en subhastes.

Aquesta mesura implica que les companyies d'aviació hauran d'anar assumint progressivament el cost complet de les seves emissions i per tant incrementant la pressió econòmica per fer una transició i adoptar noves tecnologies per reduir el consum de combustibles fòssils i les emissions d'efecte hivernacle.

Una altra d'aquestes reformes és l'aplicació del marc geogràfic on s'aplica aquest sistema. Actualment és un sistema que majoritàriament només s'aplica a vols dins de l'Espai Econòmic Europeu, mentre que els vols internacionals amb tercers països es regulen mitjançant el mecanisme global CORSIA, més flexible, amb l'objectiu de compensar les emissions i no pas reduir-les.

En conjunt, aquesta reforma reforça el paper de l'EU ETS com a sistema central de la política climàtica europea en el sector aeronàutic, amb la transformació progressiva d'un sistema amb mecanismes d'adaptació gradual a un model més estricte basat en la internalització real dels costos ambientals de les emissions.

[16] COMISSIÓ EUROPEA ."About the EU ETS". *Climate Action* en *https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-markets/about-eu-ets_en* (accés 30 març)
[17] COMISSIÓ EUROPEA. "Aviation in the EU Emissions Trading System". *Climate Action* en *https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/reducing-emissions-aviation_en?utm* (Accés 30 març).

3.2. Implementació del Refuel EU

El mateix any 2023 es va aprovar el reglament denominat *ReFuelEU Aviation*. Una altra iniciativa per tal que el sector de l'aviació resulti menys contaminant i branca del paquet *Objectiu 55*. Aquesta iniciativa està orientada a reduir les emissions del sector mitjançant l'augment progressiu de l'ús de combustible d'aviació sostenible.

El reglament introdueix un sistema que harmonitza a nivell europeu la obligació dels proveïdors de combustible a garantir un percentatge mínim de combustibles sostenibles d'avions, també anomenat CAS, en el subministrament als aeroports de la UE començant amb un 2% l'any 2025 i assolint un 70% l'any 2050.

En aquests subministraments obligatoris, també s'estableix una quota específica per als combustibles sintètics, començant amb un 1,2% el 2030 i arribant a un 35% el 2050 [18].

A part dels proveïdors, el reglament també imposa mesures als operadors aeris, que han d'assegurar que únicament es proveeixen del combustible necessari per operar des dels aeroports de la UE, per evitar pràctiques com el *fuel tankering* que incrementa innecessàriament el pes de les aeronaus i per tant les emissions.

També obliga als aeroports a garantir una disponibilitat de la infraestructura necessària per a la distribució i emmagatzematge del SAF per assegurar un correcte funcionament del sistema i la seva aplicació.

3.3. Paper complementari de CORSIA i de l'ETD

A banda de l'EU ETS i *ReFuelEU Aviation,* també cal destacar el paper de CORSIA i a la proposta de revisió de l'*Energy Taxation Directive*, d'ara en endavant ETD, perquè tots dos mecanismes també pressionen al sector. Tot i que no tenen un mateix pes normatiu dins del marc europeu com els dos anteriors, també tenen un paper en la fiscalitat de la descarbonització.

El *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation* a partir d'ara anomenat CORSIA, és un mecanisme global de l'Organització d'Aviació Civil Internacional, d'ara en endavant l'OACI, per compensar les emissions del diòxid de carboni de l'aviació internacional. A diferència de l'EU ETS, que funciona dins del mercat europeu de drets d'emissió, el CORSIA es basa en la compensació de les emissions amb crèdits de carboni. Es compren crèdits de carboni perquè un altre projecte redueixi

[18] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY. "Una iniciativa per a contribuir a descarbonitzar el sector de l'aviació", *ReFuelEU Aviation* a https://www.easa.europa.eu/es/light/topics/refueleu-aviation (accés 10 abril)

o absorbeixi una quantitat equivalent de CO_2. Aquest mecanisme no s'aplica dins dels vols intraeuropeus, sinó als vols internacionals [19].

Pel que fa a *l'Energy Taxation Directive,* d'ara en endavant anomenada ETD, es tracta d'una directiva europea sobre fiscalitat de l'energia. Dins del marc del paquet *Fit for 55,* es va proposar revisar aquesta directiva per adaptar la fiscalitat als objectius climàtics de la Unió. Es planteja que el transport aeri intraeuropeu deixi d'estar exempt de la tributació en la utilització dels combustibles fòssils, el que implicaria que el querosè estigués sotmès a una càrrega fiscal. Cal destacar que a diferència de l'EU ETS o el *ReFuel Aviation,* l'ETD s'ha d'entendre com una proposta de reforma i no com un mecanisme consolidat al mateix nivell que els anteriors mecanismes ja aprovats [20].

[19] *Vid.* Hugh GARDNER, Marco BRAMBILLA, David MATHEUS, Giorgio RANDO, Stefan GREBE, Dagmar NELISSEN, Maarten DE VRIES and Stuart ROSS, "Expected impacts of Fit for 55 legislation on connectivity and mobility in Europe", *PARLAMENT EUROPEU*, https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2024/752457/IPOL_STU(2024)752457_EN.pdf (accés el 2 de maig) pp. 22.

[20] COMISSIÓ EUROPEA. "Revision of the Energy Taxation Directive". *Taxation and Customs Union* en https://taxation-customs.ec.europa.eu/taxation/excise-duties/revision-energy-taxation-directive_en (accés 25 de maig)

CAPÍTOL II – IMPACTE ECONÒMIC I SOCIAL DE LA DESCARBONITZACIÓ AL SECTOR AERONÀUTIC

Després d'haver analitzat el marc normatiu de la descarbonització del sector aeronàutic, cal observar quin impacte econòmic i social poden tenir aquestes mesures i obligacions que s'imposen i han d'implementar els principals agents del sector. Aquestes mesures anteriorment analitzades en el capítol anterior, no només estableixen fites ambientals, sinó també introdueixen nous costos estructurals per a les aerolínies, aeroports i proveïdors de combustible. També poden afectar als passatgers.

Per tant, la qüestió central d'aquest capítol no és determinar si la descarbonització és necessària, ja que aquesta ja es troba assumida dins del marc normatiu, polític i social de la Unió Europea, sinó quina serà la distribució de tots els costos que comportarà aquesta transició pel sector i qui els haurà d'assumir.

4. Impacte econòmic en els agents del sector aeronàutic

La descarbonització del sector aeronàutic no només implica un canvi ambiental, sinó també una transformació econòmica per als principals agents que intervenen en l'activitat aèria. Les mesures derivades del *Fit for 55*, l'EU ETS i *ReFuelEU Aviation* introdueixen nous costos vinculats a les emissions, al combustible sostenible, a la infraestructura i a l'adaptació tecnològica del sector.

4.1. Quantificació del cost de la descarbonització

Aquesta transformació econòmica profunda repercuteix en els principals costos que es troben als comptes d'explotació dels agents que intervenen dins de l'activitat aèria, el combustible, el preu del diòxid de carboni, les inversions en infraestructura i la renovació tecnològica. Per tant, les mesures climàtiques de la UE, no només tenen una dimensió ambiental, sinó que alhora introdueixen una nova estructura de costos que hauran d'anar assumint les aerolínies, els aeroports, els proveïdors de combustible i indirectament els passatgers.

L'informe *The Price of Fit for 55*, elaborat per *SEO Amsterdam Economics* i el *Royal Netherlands Aerospace Centre* és una de les principals fonts per quantificar i avaluar aquest impacte. L'informe parteix del model *NetCost,* un model de decisió de passatgers que estima com els increments de costos poden afectar els preus, a la demanda, les emissions i la connectivitat. Ara bé, tractant-se d'un escenari que encara s'haurà d'anar desenvolupant en els propers anys i que encara no ha passat, cal remarcar que no es tracta de dades observades, sinó d'una modelització. A més, el propi informe indica que

les seves hipòtesis es basen en la proposta de la Comissió Europea de juliol de 2021, que els valors expressats en euros de 2018 i que no incorporen l'efecte de la inflació ni modificacions legislatives que s'hagin fet posteriorment. Per això les xifres s'han d'utilitzar com a estimació orientativa i no com a quantificació definitiva del cost real [21].

Segons aquesta anàlisi detallada, el paquet de *Fit for 55* podria arribar a generar un cost anual addicional pel sector de 12,8 mil milons d'euros l'any 2030, 21,8 mil milions d'euros el 2035 i 34,4 mil milions d'euros el 2050. En termes acumulats, el cost total estimat entre l'any 2023 i 2050 arribaria a ser de 577 mil milions d'euros. Entrant més en detall dins d'aquestes xifres, el cost es reparteix entre quatre mecanismes principals, *l'EU ETS, CORSIA, ReFuelEU Aviation i* la reforma *'Energy Taxation Directive*. La distribució acumulada seria de 305 mil milions d'euros per *ReFuelEU,* 136 mil milions per l'EU ETS, 99 mil milions per l'ETD i 36 mil milions per CORSIA. Això significa que el mandat de combustibles sostenibles representaria aproximadament el 53% del cost total estimat, l'EU ETS el 24%, l'ETD el 17% i CORSIA el 6% [22].

Cost estimate (× € billion)	2030	2035	2050	Total 2023-2050
EU-ETS	6.4	7.6	1.3	136
CORSIA	<< 0. 1	0.1	4.4	36
ETD	4.0	5.1	3.3	99
ReFuelEU	2.4	9.0	25.4	305
Total	**12.8**	**21.8**	**34.4**	**577**

Taula 1: Vid. KONIJN, Stef; ADLER, Martin; BOONEKAMP, Thijs; PEERLINGS, Bram. "The Price of Fit for 55: Aviation Costs of the EU's Fit for 55 Proposal"

Si analitzem aquest repartiment de costos, podem observar que la principal pressió econòmica a llarg termini no surt del mercat de carboni, sinó l'adaptació i canvi de combustible. En el primer període de temps, l'EU ETS és el mecanisme amb un impacte econòmic més elevat, perquè les aerolínies hauran d'anar assumint progressivament el cost de les seves emissions mitjançant la compra de drets d'emissió. L'informe estima que el cost de l'EU ETS seria de 6,4 mil milions d'euros el 2030, convertint-lo en el principal cost d'aquest any. No obstant, ja a partir del 2034 el pes del *ReFuelEU Aviation*

[21] *Vid.* KONIJN, Stef; ADLER, Martin; BOONEKAMP, Thijs; PEERLINGS, Bram. "The Price of Fit for 55: Aviation Costs of the EU's Fit for 55 Proposal". *Amsterdam: SEO Amsterdam Economics i NLR* en https://www.seo.nl/wp-content/uploads/2022/09/The-price-of-Fit-for-55-note-final-SEO-NLR-D2050-project_001078.pdf (accés 29 d'abril), pp. 1- 4, Box 2.
[22] *Vid.* KONIJN, Stef; ADLER, Martin; BOONEKAMP, Thijs; PEERLINGS, Bram. "The Price of Fit for 55: Aviation Costs ...", *Opt. Cit,* pp. 5, Taula 2.

superarà ja el de l'EU ETS i ja es convertirà en el principal component de cost fins al 2050 [23].

Si s'analitza de forma crítica, aquesta evolució és lògica des d'un punt de vista econòmic. L'EU ETS encareix les emissions de CO_2, però el seu impacte pot disminuir a mesura que es vagin reduint les emissions cobertes per al sistema. En canvi, el *ReFuelEU Aviation* transforma directament el cost energètic de l'operació aèria, perquè obliga a substituir progressivament el querosè convencional per combustibles sostenibles d'aviació. Tot i que l'informe si que contempla una reducció del cost unitari del SAF amb el temps, aquesta reducció queda compensada per l'augment molt superiors del volum obligatori de combustible sostenible a adoptar. Per això el cost total de *ReFuelEU* creix de 2,4 mil milions d'euros el 2030 a 25,4 mil milions d'euros el 2050[24].

El canvi de l'EU ETS és especialment important perquè elimina progressivament els drets gratuïts d'emissió. L'estudi del Parlament Europeu explica que aquests drets gratuïts representaven anteriorment el 82% de les assignacions del sector aeri i que passen a desaparèixer completament l'any 2026. Això significa que les aerolínies hauran de pagar per tots els drets de CO_2 que hagin d'alliberar dins de l'espai europeu. Addicionalment, la reducció progressiva de l'oferta disponible de drets, començarà a pressionar el preu del carboni que farà que vagi a l'alça. Per tant, l'EU ETS no només incrementarà un cost ja existent, sinó que farà que canviï la naturalesa econòmica del sistema. Allò que abans era una assignació gratuïta a les aerolínies, ara passarà a convertir-se en un cost efectiu i a tenir en compte per les aerolínies[25].

L'impacte de CORSIA és menor en comparació amb l'EU ETS. El Parlament Europeu esmenta que els costos de CORSIA s'estimen significativament inferiors als de l'EU ETS, tot i que les estimacions depenen molt del preu assignat als crèdits de carboni. La Comissió Europea havia utilitzat en la seva avaluació d'impacte un preu d'1 euro per tona de CO_2 el 2030, *Oxera* un preu de 7 euros, i *SEO i NLR* un preu de 20 euros. Aquesta divergència evidencia que els resultats depenen molt de les hipòtesis utilitzades. Per tant, quan es diu que CORSIA representa només un 6% del cost

[23] *Vid.* KONIJN, Stef; ADLER, Martin; BOONEKAMP, Thijs; PEERLINGS, Bram. "The Price of Fit for 55: Aviation Costs ...", *Opt. Cit,* pp. 6, Figura 2
[24] *Vid.* KONIJN, Stef; ADLER, Martin; BOONEKAMP, Thijs; PEERLINGS, Bram. "The Price of Fit for 55: Aviation Costs ...", *Opt. Cit,* pp. 5, Taula 2, i p. 3, Taula 1.
[25] *Vid.* Hugh GARDNER, Marco BRAMBILLA, David MATHEUS, Giorgio RANDO, Stefan GREBE, Dagmar NELISSEN, Maarten DE VRIES and Stuart ROSS, "Expected impacts of Fit for 55 legislation on connectivity..." *Opt. Cit,* pp. 22-61.

acumulat, cal entendre que aquesta xifra és sensible al preu futur dels crèdits de carboni i al funcionament del règim internacional després de 2035 [26].

Pel que fa a l'*Energy Taxation Directive*, d'ara en endavant ETD, l'impacte també s'ha d'analitzar amb prudència. *The Price of Fit for 55* inclou una possible taxa sobre el querosè que podria arribar a 10,75€ per gigajoule el 2033, amb una aplicació progressiva des del 2023. En el model, aquesta fiscalitat generaria un cost de 4 mil milions d'euros el 2030, 5,1 mil milions el 2035 i 3,3 mil milions el 2050. Ara bé, jurídicament és una mesura més incerta, perquè l'estudi del Parlament Europeu tracta l'ETD com una reforma no adoptada dins del mateix grau de consolidació que l'EU ETS o *ReFuelEU*. Per això, en aquesta anàlisi, convé parlar de possible fiscalitat del querosè o de cost modelitzat de l'ETD, i no presentar-lo com un cost plenament vigent [27].

Totes aquestes dades permeten formular una conclusió crítica, el *Fit for 55* no genera un únic impacte homogeni sobre el sector aeri, sinó una cadena de costos diferenciada. Les aerolínies suporten directament el cost del carboni i, indirectament, el sobrecost del combustible. Els proveïdors assumeixen l'obligació d'oferir els SAF i reorganitzar el subministrament. Els aeroports han d'adaptar infraestructures i garantir condicions operatives; i finalment una part d'aquests costos pot traslladar-se als passatgers [28] .

4.2. Repercussió en l'estructura de costos de les aerolínies

Cal destacar sobretot l'impacte que tindran les aerolínies, ja que seran l'agent més afectat econòmicament per la descarbonització. Aquest gran impacte és degut a que concentren tant costos directes com costos derivats dels altres agents del sector. D'una banda, han de complir les obligacions relacionades amb les seves pròpies emissions. De l'altra, també hauran de suportar el sobrecost del nou combustible sostenible adquirit als proveïdors i també els costos aeroportuaris necessaris per adaptar les operacions.

---

[26] *Vid.* Hugh GARDNER, Marco BRAMBILLA, David MATHEUS, Giorgio RANDO, Stefan GREBE, Dagmar NELISSEN, Maarten DE VRIES and Stuart ROSS, "Expected impacts of Fit for 55 legislation on connectivity..." *Opt. Cit,* pp. 60-61.

[27] *Vid.* KONIJN, Stef; ADLER, Martin; BOONEKAMP, Thijs; PEERLINGS, Bram. "The Price of Fit for 55: Aviation Costs..." Així mateix, els autors *Vid.* GARDNER, Marco BRAMBILLA, David MATHEUS, Giorgio RANDO, Stefan GREBE, Dagmar NELISSEN, Maarten DE VRIES and Stuart ROSS, ens ho indiquen a "Expected impacts of Fit for 55 legislation..."

[28] *Vid.* Hugh GARDNER, Marco BRAMBILLA, David MATHEUS, Giorgio RANDO, Stefan GREBE, Dagmar NELISSEN, Maarten DE VRIES and Stuart ROSS, "Expected impacts of Fit for 55 legislation on connectivity..." *Opt. Cit,* pp. 61

Per tant, en ser l'últim agent abans dels passatgers, és el que carrega econòmicament amb més pes [29].

La transformació del sector afecta especialment a les despeses operatives de les companyies. El combustible i les emissions passen a estar cada cop més relacionats, ja que una aeronau amb un consum elevat no només necessita més combustible, sinó que també genera més costos econòmics relacionats amb les emissions del carboni. Això encara reforça més la importància que agafen l'eficiència energètica, la planificació dels vols, la reducció del pes de les aeronaus i l'optimització de les rutes.

L'augment de la despesa operativa conviu amb una necessitat més gran d'inversió. Les aerolínies poden reduir el consum i l'exposició als costos ambientals mitjançant la renovació de la flota, però l'adquisició o l'arrendament d'aeronaus més eficients exigeix un volum considerable de capital. La renovació de la flota europea fins al 2050 podria requerir inversions superiors als 740.000 milions d'euros en un escenari sense els objectius marcats per la UE. Amb l'escenari actual, s'hauria d'afegir una prima associada a l'adopció d'aeronaus més avançades tecnològicament de 80.000 milions d'euros . Això genera una tensió entre el curt i el llarg termini. Mantenir durant més temps una aeronau antiga evita una inversió immediata, però prolonga un consum de combustible i unes emissions més elevats. En canvi, anticipar-ne la substitució augmenta les necessitats de finançament actuals, però pot produir estalvis operatius durant la vida útil de l'aeronau[30].

La capacitat d'afrontar aquesta transformació no serà igual per a totes les companyies. Les aerolínies amb més liquiditat i millor accés al crèdit o al mercat de *lísing* tindran més facilitat per renovar les seves flotes i formalitzar contractes de subministrament de SAF a llarg termini. En canvi, les companyies amb marges reduïts, més endeutament o aeronaus antigues poden quedar atrapades en una situació desfavorable: necessiten invertir per reduir els costos operatius futurs, però la seva situació financera limita precisament la capacitat de fer-ho. The Price of Net Zero adverteix que, si el finançament

[29] *Vid.* Hugh GARDNER, Marco BRAMBILLA, David MATHEUS, Giorgio RANDO, Stefan GREBE, Dagmar NELISSEN, Maarten DE VRIES and Stuart ROSS, "Expected impacts of Fit for 55 legislation..." *Opt. Cit,* pp. 59-61

[30] *Vid.* MARTIN ADLER, BRAM PEERLINGS, THIJS BOONEKAMP, ELISABETH VAN DER SMAN, NANETTE LIM, ARNOUT JONGELING, SACHA PEL, "THE PRICE OF NET ZERO", *Amsterdam: SEO Amsterdam Economics i NLR*, https://reports.nlr.nl/server/api/core/bitstreams/eb251247-066d-4fda-869b-eaedeab289b1/content (accés el 6 de maig), pp. 10-11 i pp. 34-35

no està disponible en el moment necessari, les inversions poden ajornar-se i dificultar l'assoliment dels objectius de descarbonització [31].

Malgrat l'increment general dels costos, la descarbonització també pot generar estalvis. Les millores en la planificació dels vols, els sistemes de gestió, el manteniment de les aeronaus i la reducció de pes disminueixen el consum de combustible i les emissions. *The Price of Net Zero* considera que diverses d'aquestes actuacions poden arribar a autofinançar-se mitjançant els estalvis operatius produïts [32]. Per tant, l'impacte econòmic no s'ha d'interpretar únicament com una acumulació de noves càrregues, sinó també com un incentiu per eliminar ineficiències i modernitzar les operacions.

En conclusió, la descarbonització no només implica un augment dels costos de les aerolínies, sinó també una transformació de la manera en què aquests es distribueixen dins de l'activitat empresarial. El pes creixent dels costos ambientals i energètics obliga les companyies a prioritzar l'eficiència operativa, l'accés al finançament i la renovació tecnològica. Per aquest motiu, la capacitat d'adaptació de cada aerolínia esdevindrà un factor determinant per mantenir la seva competitivitat durant el procés de transició ecològica.

4.3. Impacte econòmic en aeroports i proveïdors de combustible.

En els aeroports, l'impacte econòmic és diferent al de la resta d'agents. No els afecta directament en el cost principal de l'EU ETS ni de CORSIA, sinó que tenen obligacions en termes d'infraestructura i de facilitació operativa. El Parlament Europeu identifica dos costos directes principals per als aeroports, l'obligació de subministrar electricitat a les aeronaus estacionades, derivada de l'*Alternative Fuels Infrastructure Regulation,* d'ara en endavant AFIR, i els costos relacionats amb la infraestructura i facilitació del subministrament de SAF[33].

Pel que fa a l'AFIR, el Parlament Europeu recull una estimació de 949 milions d'euros en costos addicionals en infraestructura per al període de 2021-2050. També indica que *Oxera* estima que els aeroports més grans podrien afrontar fins a 10 milions d'euros si

[31] *Vid*. MARTIN ADLER, BRAM PEERLINGS, THIJS BOONEKAMP, ELISABETH VAN DER SMAN, NANETTE LIM, ARNOUT JONGELING, SACHA PEL, "THE PRICE OF NET…" *Opt. Cit* pp. 43 i p. 50-51.
[32] *Vid.* MARTIN ADLER, BRAM PEERLINGS, THIJS BOONEKAMP, ELISABETH VAN DER SMAN, NANETTE LIM, ARNOUT JONGELING, SACHA PEL, "THE PRICE OF NET...", *Opt. Cit,* pp. 17-18, taula 3.4
[33] *Vid.* Hugh GARDNER, Marco BRAMBILLA, David MATHEUS, Giorgio RANDO, Stefan GREBE, Dagmar NELISSEN, Maarten DE VRIES and Stuart ROSS, "Expected impacts of Fit for 55 legislation ...", *Opt. Cit*, pp. 60, taula 7

totes les portes i posicions remotes són per a aeronaus *narrow-body,* o 15 milions si també donen servei a aeronaus *wide-body*. Això vol dir que els aeroports de categoria superior tindran costos més elevats, però també amb més capacitat per repartir-los en un volum més gran d'operacions. En canvi, els aeroports més petits, hauran d'assumir uns costos que els pot resultar més difícil d'assumir que per als grans aeroports [34].

En relació amb el SAF, tot i que els aeroports no sempre són propietaris o operadors directes de la infraestructura del subministrament de combustible, tenen un paper de facilitació cada vegada més important. L'estudi del Parlament Europeu assenyala que la disponibilitat de SAF pot convertir-se en un element de competència entre aeroports, sobretot entre aeroports regionals propers entre si. Aquell aeroport que pugui garantir subministrament de SAF pot resultar més atractiu per a aerolínies que vulguin millorar el seu perfil ambiental o complir obligacions reguladores amb menys fricció operativa. Per tant, la sostenibilitat passa a ser també un factor de competitivitat aeroportuària[35].

Aquesta situació competitiva i els costos per als aeroports, pot generar una asimetria territorial. Igual que en el cas de les aerolínies, els grans aeroports solen disposar de més infraestructura, més recursos i capacitat d'inversió i més interès per part dels proveïdors de combustible. En canvi, els aeroports més petits poden quedar en una posició menys favorable pel menor interès econòmic que puguin generar per als proveïdors.

També cal fer referència a l'efecte que tindran els proveïdors de combustible. L'estudi del Parlament Europeu indica que la principal obligació directa dels proveïdors és incorporar SAF dins la barreja de combustible subministrada als aeroports de la Unió. Això implica adquirir SAF als productors i assumir uns costos que depenen molt del tipus de combustible i de la seva ruta de producció. El mateix estudi assenyala que, encara que els SAF poden ser més competitius amb el temps, la barreja mitjana de combustible continuarà sent més cara que el querosè convencional. A més, la distribució desigual dels centres de producció pot generar costos addicionals de transport i infraestructura si el SAF ha de ser traslladat físicament fins als aeroports [36].

---

[34] *Vid.* Hugh GARDNER, Marco BRAMBILLA, David MATHEUS, Giorgio RANDO, Stefan GREBE, Dagmar NELISSEN, Maarten DE VRIES and Stuart ROSS, "Expected impacts of Fit for 55 legislation...", *Opt. Cit,* pp. 60

[35] *Vid.* Hugh GARDNER, Marco BRAMBILLA, David MATHEUS, Giorgio RANDO, Stefan GREBE, Dagmar NELISSEN, Maarten DE VRIES and Stuart ROSS, "Expected impacts of Fit for 55 legislation...", *Opt. Cit,* pp. 60

[36] *Vid.* Hugh GARDNER, Marco BRAMBILLA, David MATHEUS, Giorgio RANDO, Stefan GREBE, Dagmar NELISSEN, Maarten DE VRIES and Stuart ROSS, "Expected impacts of Fit for 55 legislation...", *Opt. Cit,* pp. 60-61

5. Afectació sobre els passatgers, demanda i connectivitat

Un cop analitzat com la descarbonització genera nous costos per als agents dels sector aeronàutic, cal veure com tots aquests costos poden arribar a traslladar-se als passatgers i per tant, afectar la demanda del transport aeri.

5.1. Trasllat dels costos al preu del bitllet i impacte en la demanda

El trasllat al preu del bitllet és el mecanisme mitjançant el qual l'impacte econòmic de les mesures ambientals deixa de ser tan sols una qüestió empresarial i passa a tenir una dimensió també social. Les aerolínies poden intentar absorbir una part dels nous costos, però també poden repercutir-los als passatgers mitjançant un augment de les tarifes. Per tant, el cost ambiental del vol no només afecta les companyies, sinó també a l'usuari final.

Ara bé, aquest trasllat no és automàtic ni necessàriament total. El percentatge de cost que acaba incorporant-se al bitllet depèn de diversos factors, com el grau de competència de la ruta, la capacitat de les aerolínies per absorbir costos, la disponibilitat de places als aeroports, el tipus de ruta i la sensibilitat dels passatgers al preu.

El que sí és destacable es que els vols dins de l'Espai Econòmic Europeu queden més exposats als mecanismes europeus perquè acumulen un major nombre d'obligacions, l'EU ETS, *ReFuelEU Aviation* i, en els estudis que la inclouen, la possible fiscalitat del querosè derivada de l'*Energy Taxation Directive*. En canvi, els vols entre la UE i tercers països només suporten una part d'aquestes obligacions, i la resta d'emissions queda vinculada principalment a CORSIA. Per això, les rutes intraeuropees tendeixen a experimentar increments de preu proporcionalment més elevats i per tant hauran de ser els usuaris europeus els que hauran d'assumir i pagar part de les mesures [37].

Aquesta diferència es veu clarament en les estimacions sobre el preu del bitllet. Segons *The Price of Fit for 55*, un vol d'anada i tornada de curta distància dins de l'Espai Econòmic Europeu, a partir d'ara anomenat EEE, podria augmentar 22,65 euros el 2030, 31,35 euros el 2035 i 25,65 euros el 2050, equivalents a increments relatius del 15,1%, 20,9% i 17,1%. En els vols de mitjana distància intra-EEE, l'increment seria de 45,30 euros el 2030, 62,70 euros el 2035 i 51,30 euros el 2050. En canvi, per als vols de llarg radi entre l'EEE i tercers països, l'increment relatiu seria molt menor el 2030, situant-se

[37] ACI EUROPE, "Assessment of the impact of the Fit for 55 policies on airports", *OXERA,* https://www.oxera.com/wp-content/uploads/2022/06/Impact-assessment-of-Fit-for-55-policies-on-the-aviation-sector_final_080622.pdf (accés 3 de maig), pp. 37-38

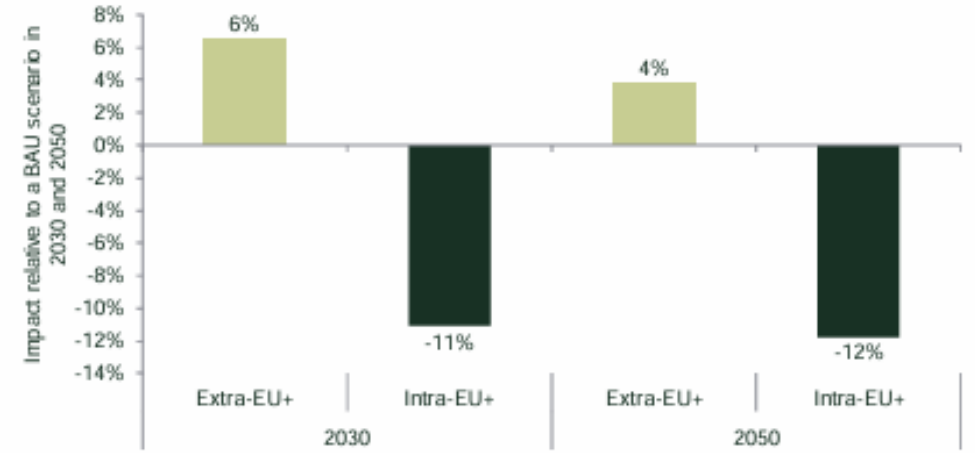
en el 2,4%, tot i que augmentaria fins al 8% el 2050 a mesura que el pes del SAF fos més important [38].

Com que l'impacte del cost afecta sobretot els vols dins de l'EEE, l'efecte a la demanda en les rutes intraeuropees serà més elevat. *Oxera* estima que la demanda en vols intra-EEE es reduiria un 11% el 2030 i un 12% el 2050 respecte d'un escenari *Business As Usual,* no pas els nivells de referència de l'any 2019. A més, l'afectació pot ser més intensa en el segment de passatgers no vinculats a viatges de negocis i en companyies de baix cost, on la reducció estimada arriba al 15,5% el 2030 i al 21,8% el 2050. Això s'explica perquè aquests passatgers i models de negoci són més sensibles al preu [39].

		Average price increase (€per passenger for return flights)		
Flight distance	Fit for 55 component	2030	2035	2050
Short-haul (1,500 km) *(Domestic or intra-EEA)*	EU-ETS	12.00	13.05	2.40
	CORSIA	0	0	0
	ETD	7.95	9.30	4.20
	ReFuelEU	2.70	9.00	19.05
	Total	**€22.65**	**€31.35**	**€25.65**
	Relative to €150 return ticket	+ 15.1%	+ 20.9%	+ 17.1%
Medium-haul (3,000 km) *(Domestic or intra-EEA)*	EU-ETS	24.00	26.10	4.80
	CORSIA	0	0	0
	ETD	15.90	18.60	8.40
	ReFuelEU	5.40	18.00	38.10
	Total	**€45.30**	**€62.70**	**€51.30**
	Relative to €300 return ticket	+ 15.1%	+ 20.9%	+ 17.1%
Long-haul (6,000 km) *(EEA ↔ non-EEA)*	EU-ETS [a)]	4.80	5.40	1.20
	CORSIA	≈ 0 [b)]	3.00	13.80
	ETD [a)]	3.60	4.20	1.80
	ReFuelEU	6.00	20.40	31.20
	Total	**€14.40**	**€33.00**	**€48.00**
	Relative to €600 return ticket	+ 2.4%	+ 5.5%	+ 8.0%

Taula 2: KONIJN, Stef; ADLER, Martin; BOONEKAMP, Thijs; PEERLINGS, Bram. "The Price of Fit for 55: Aviation Costs of the EU's Fit for 55 Proposal*".*

[38] *Vid.* KONIJN, Stef; ADLER, Martin; BOONEKAMP, Thijs; PEERLINGS, Bram. "The Price of Fit for 55: Aviation...", *Opt. Cit*, pp. 7.
[39] ACI EUROPE, "Assessment of the impact of the Fit for 55...", *Opt. Cit*, pp. 38-39.



Gràfic 1: ACI EUROPE, "Assessment of the impact of the Fit for 55 policies on airports".

No obstant això, aquesta reducció s'ha d'entendre com una moderació del creixement previst i no necessàriament com una disminució absoluta del trànsit aeri. L'impacte final dependrà del grau de trasllat dels costos, del perfil del passatger, del tipus de ruta i de l'existència d'alternatives reals de transport.

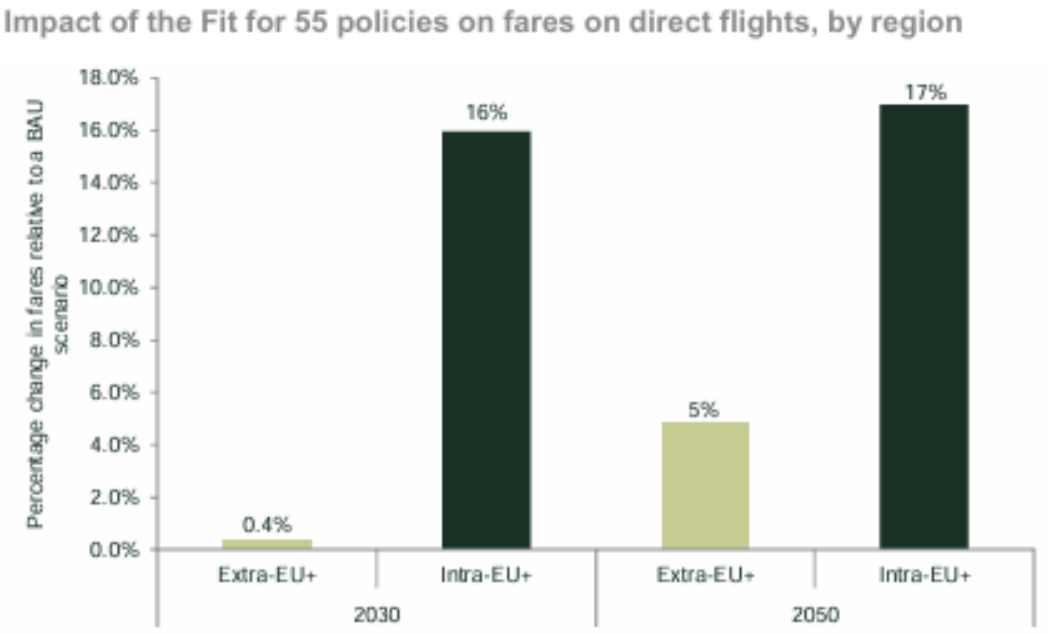
5.2. Operativitat en la connectivitat territorial

L'impacte de la descarbonització sobre la connectivitat territorial no s'ha d'analitzar només a partir del nombre total de passatgers, sinó també a partir de la qualitat i continuïtat de les connexions aèries. Una ruta pot continuar existint formalment, però perdre part de la seva utilitat si es redueixen les freqüències, si només opera en determinades temporades o si deixa d'oferir horaris adequats per a viatges de negocis, connexions internacionals o desplaçaments essencials. Per tant, l'afectació sobre la connectivitat no depèn únicament de si una ruta desapareix, sinó també de si el servei es manté amb una intensitat suficient per garantir l'accessibilitat del territori.

Tal com s'ha vist en l'apartat anterior, l'augment del preu del bitllet pot reduir la demanda respecte d'un escenari sense *Fit for 55*. Aquesta reducció de demanda pot tenir efectes operatius sobre les aerolínies, especialment en aquelles rutes amb marges més reduïts. Quan una ruta esdevé menys rendible, la companyia pot optar per reduir freqüències, utilitzar aeronaus més petites, concentrar l'oferta en temporada alta o reassignar la flota a rutes amb més rendibilitat. En aquest sentit, l'impacte sobre la connectivitat dependrà

en gran part de decisions empresarials de les aerolínies, que buscaran maximitzar la rendibilitat amb una flota limitada [40].

Els aeroports que són regionals, són especialment vulnerables a aquest procés. Els aeroports amb una proporció elevada de trànsit intraeuropeu i de companyies de baix cost com els aeroports de Girona o de Reus, poden patir un impacte més intens, ja que les seves tarifes inicials solen ser més baixes i per tant, qualsevol increment regulatori representa un percentatge més elevat del preu final. Les destinacions amb aquest tipus de trànsit, podrien experimentar una reducció de trànsit directe arribant al voltant d'un 17% el 2050, davant del 4% dels grans *hubs* [41].



Gràfic 2: 3: ACI EUROPE, "Assessment of the impact of the Fit for 55 policies on airports",

Aquesta asimetria territorial és rellevant perquè l'avió no compleix la mateixa funció a tots els territoris. En determinades rutes continentals, l'augment del preu del bitllet pot afavorir el canvi cap al ferrocarril o altres modes de transport. En canvi, en territoris insulars, perifèrics o ultraperifèrics, el transport aeri pot ser una infraestructura essencial per garantir l'accés a serveis, mercats laborals, activitat turística i connexions internacionals. Per tant, un mateix increment de preu pot tenir un impacte social molt diferent segons el territori afectat.

[40] *Vid.* Hugh GARDNER, Marco BRAMBILLA, David MATHEUS, Giorgio RANDO, Stefan GREBE, Dagmar NELISSEN, Maarten DE VRIES and Stuart ROSS, "Expected impacts of Fit for 55 legislation..." *Opt. Cit*, pp. 64-66.
[41] ACI EUROPE, "Assessment of the impact of the Fit for 55...", *Opt. Cit,* pp. 3, 40-41.

5.3. Riscos en la competitivitat europea

La competitivitat europea es pot veure afectada quan les obligacions ambientals no s'apliquen amb la mateixa intensitat a tots els operadors que competeixen en un mateix mercat. L'aviació és un sector global, però els instruments del *Fit for 55* tenen un àmbit d'aplicació territorialment limitat, l'europeu. Això pot generar una diferència de costos entre aerolínies i aeroports europeus i els seus competidors situats en tercers països.

Aquest risc és especialment visible en els vols amb escala. Un passatger que viatja entre Europa i una destinació intercontinental pot escollir entre fer connexió en un *hub* europeu o en un *hub* situat fora de la Unió. Si l'itinerari a través d'un aeroport europeu queda sotmès a més costos ambientals, mentre que una alternativa a través d'un *hub* no europeu suporta menys càrrega reguladora, el passatger pot triar la ruta més barata encara que continuï realitzant el mateix viatge [42].

Aquest risc no és només teòric, sinó que pot tenir efectes sobre el trànsit de connexió dels grans *hubs* europeus. S'estima que, en les rutes de connexió analitzades, els *hubs* de la UE podrien perdre un 4% del trànsit de connexió el 2030 i un 9% el 2050 respecte d'un escenari sense Fit for 55, mentre que els *hubs* situats fora de la UE podrien guanyar un 3% i un 5% respectivament. Això pot afectar especialment les aerolínies europees de xarxa, ja que depenen d'aquests passatgers de connexió per alimentar els vols de llarg radi i mantenir determinades freqüències internacionals [43].

A més, aquesta desviació també pot reduir parcialment l'eficàcia ambiental de les mesures. Si el passatger no deixa de volar, sinó que simplement canvia l'itinerari per connectar a través d'un aeroport no europeu, una part de les emissions es desplaça fora de l'àmbit regulador de la UE. Aquest fenomen, conegut com a *carbon leakage* o fugida de carboni, no anul·la necessàriament els estalvis d'emissions del Fit for 55, però sí que en pot reduir l'eficiència i alhora perjudicar la competitivitat dels aeroports i aerolínies europees. Per això, el repte no és reduir l'ambició climàtica, sinó evitar que aquesta generi una desviació excessiva de passatgers i emissions cap a tercers països [44].

[42] ACI EUROPE, "Assessment of the impact of the Fit for 55...", *Opt. Cit*, pp. 47-49
[43] ACI EUROPE, "Assessment of the impact of the Fit for 55...", *Opt. Cit,* pp. 48-49
[44] ACI EUROPE, "Assessment of the impact of the Fit for 55...", *Opt. Cit,* pp. 30, 51-53

6. Alternatives sostenibles de la combustió

Després d'haver analitzat els costos i impactes de la descarbonització, s'ha de valorar si existeixen alternatives capaces de reduir la dependència del querosè convencional. Actualment, les principals opcions que s'estan desenvolupant són els SAF, la propulsió elèctrica i l'ús de l'hidrogen. Aquestes alternatives pretenen contribuir a la reducció d'emissions, però no totes tenen el mateix grau de maduresa ni la mateixa capacitat d'aplicació en l'aviació comercial actual.

Els combustibles d'aviació sostenibles, són l'alternativa més aplicable a curt i mitjà termini perquè poden utilitzar-se progressivament en les aeronaus i infraestructures ja existents. EASA defineix els SAF com a combustibles alternatius sostenibles al querosè fòssil i inclou dins d'aquesta categoria els biocombustibles d'aviació i els combustibles sintètics, també anomenats *e-fuels* o *Power-to-Liquid*. Per tant, poden ajudar a reduir l'impacte ambiental sense exigir una substitució immediata de tota la flota [45].

En relació amb els motors elèctrics, poden reduir de forma dràstica les emissions directes en operació si l'electricitat utilitzada prové de fonts renovables. Al mateix temps, també poden generar menys soroll i ser més útils en aeronaus petites, d'entrenament o de curt radi. No obstant, aquest tipus de motorització encara està a l'inici del seu desenvolupament i continuen existint dificultats per augmentar la densitat energètica de les bateries, reduir-ne el pes i ampliar l'autonomia. Això actualment limita la seva aplicació en l'aviació comercial a curt termini i encara s'haurà d'esperar a mitjà i llarg termini per veure alguns fruits [46].

L'hidrogen també es presenta com una alternativa potencial, sempre que es produeixi a partir de fonts baixes en carboni. Pot utilitzar-se en piles de combustible o en combustió directa, i podria reduir de manera significativa les emissions de CO_2 en operació[47]. Igualment, la seva aplicació exigeix nous dissenys d'aeronau, sistemes d'emmagatzematge específics, infraestructura aeroportuària adaptada i un marc de certificació segur. Per això, el seu impacte serà probablement més rellevant a llarg

[45] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY. "Sustainable Aviation Fuels" *EASA.* En https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/eaer/sustainable-aviation-fuels/what-are-sustainable-aviation-fuels (accés 20 de maig)

[46] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY. "Electric propulsion" *EASA*. En https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/eaer/technology-and-design/low-carbon-emissions-aircraft/electric-propulsion (accés 20 de maig)

[47] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY. "Hydrogen-powered Aircraft". *EASA.* En https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/eaer/technology-and-design/low-carbon-emissions-aircraft/hydrogen-powered

termini i en segments concrets del mercat i, per tant, encara no es pot considerar una alternativa plenament disponible en l'aviació comercial actual.

En conclusió, aquestes alternatives poden ajudar a reduir part de l'impacte ambiental i econòmic de la descarbonització, però no permeten evitar a curt termini els costos analitzats en els apartats anteriors. Els SAF són l'opció més realista per actuar sobre la flota actual, mentre que la propulsió elèctrica i l'hidrogen tenen un potencial més limitat a més llarg termini. Per tant, la transició del sector aeronàutic no dependrà d'una única tecnologia, sinó de la combinació de combustibles sostenibles, renovació de flota, millores operatives i desenvolupament de noves formes de propulsió.

CAPÍTOL III - APORTACIONS DELS SISTEMES D'INTEL·LIGÈNCIA ARTIFICIAL A LA DESCARBONITZACIÓ AÈRIA

Després d'haver analitzat el marc jurídic de la descarbonització, els costos que pot arribar a generar sobre el sector aeronàutic i les principals alternatives sostenibles a la combustió, aquest capítol se centra en el paper que poden tenir els sistemes d'intel·ligència artificial, d'ara endavant IA, dins d'aquest procés de transició. L'aplicació de la IA al sector no s'ha d'entendre com una solució autònoma al problema climàtic de l'aviació, sinó com una eina complementària que pot ajudar a millorar l'eficiència de les operacions i a reduir part de les emissions associades al consum de combustible.

La rellevància que pot tenir la IA en el sector aeri es deu al fet que aquest genera i utilitza grans volums de dades en àmbits com les operacions de vol, el manteniment, la gestió del trànsit aeri, els aeroports i la seguretat operacional. La IA pot ajudar a processar aquestes dades, detectar patrons, anticipar riscos i donar suport a la presa de decisions. Relacionant-ho amb la descarbonització, això pot traduir-se en trajectòries més eficients, menys retards, millor planificació del manteniment i una avaluació més precisa de l'impacte ambiental de les operacions.

A més, l'aplicació de la IA en el transport aeri també presenta limitacions importants. A diferència d'altres sectors, l'aviació exigeix uns nivells molt elevats de seguretat, certificació, supervisió humana i fiabilitat tècnica. Per aquest motiu, la IA no pot introduir-se només pel seu potencial d'eficiència, sinó que ha de complir requisits relacionats amb la confiança, la robustesa, la ciberseguretat, la transparència i la responsabilitat.

Per tant, en aquest capítol s'analitza la IA des d'una perspectiva cost-benefici. D'una banda, s'estudien les seves possibles aplicacions per reduir emissions i millorar l'eficiència ambiental del sector. De l'altra, es valoren els costos i riscos que pot generar la seva implementació. L'objectiu és determinar si la IA pot contribuir de manera realista a la descarbonització del sector aeronàutic.

7. Les aplicacions de la IA com a eina de reducció d'emissions per la millora del medi ambient

La intel·ligència artificial pot contribuir a la descarbonització del sector aeronàutic, però no s'ha d'entendre com una solució directa ni substitutiva dels combustibles sostenibles, la renovació de flota o les mesures reguladores, sinó com una eina principalment complementària. La seva aportació ambiental es produeix sobretot a través de la millora de l'eficiència operativa, és a dir, reduint ineficiències que poden generar més consum de combustible, més temps de vol o més emissions associades a les operacions.

L'aplicació més tangible en termes de reducció d'emissions de la intel·ligència artificial seria l'optimització de les operacions de vol. EASA assenyala que la IA pot assistir la tripulació en tasques rutinàries i ajudar a millorar l'eficiència operativa del vol. També posa com a exemple l'optimització de trajectòries, que pot contribuir a reduir les emissions de carboni durant les operacions aèries. Això permet relacionar la IA amb una reducció indirecta d'emissions, ja que una ruta més eficient pot comportar menys temps de vol i menys consum de combustible [48].

Aquesta idea també es veu reforçada pels treballs de *Single European Sky ATM Research,* a partir d'ara anomenat SESAR, que vinculen la digitalització del sistema de gestió del trànsit aeri amb la reducció d'ineficiències operatives. SESAR assenyala que la transformació digital de *l'Air Traffic Management*, a partir d'ara anomenat ATM, ha de permetre analitzar totes les fases del vol i utilitzar tecnologies que ajudin a eliminar consums de combustible innecessaris. En concret, destaca la millora de les operacions de taxi, la reducció d'esperes i vectoritzacions en l'espai aeri terminal i l'optimització de trajectòries, totes aquestes mesures que poden generar estalvis de combustible [49].

EUROCONTROL també destaca el paper de la IA en el control del trànsit aeri. Segons aquesta organització, les eines basades en IA poden ajudar a predir patrons de trànsit, condicions meteorològiques i possibles conflictes, així com suggerir solucions òptimes als controladors. També poden contribuir a seqüenciar arribades i sortides, ajustar trajectòries per evitar congestions i optimitzar l'ús de l'espai aeri. Aquestes aplicacions

[48] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY. " Artificial Intelligence ROADMAP 2.0". *EASA* en https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/easa-artificial-intelligence-roadmap-20 (accés 24 de maig). pp. 12

[49] Single European Sky ATM Research "Smart ATM" *SESAR Joint Undertaking* en https://www.sesarju.eu/ai (accés 24 de maig).

no redueixen emissions per si mateixes, però poden fer que les operacions siguin més fluides i eficients [50].

La IA també pot ajudar a millorar l'avaluació ambiental del sector. EASA assenyala que l'anàlisi d'impactes ambientals de l'aviació, com el soroll als aeroports o les emissions dels motors en vol, és una activitat intensiva en dades i computació. Mitjançant dades meteorològiques i registradors de vol, els algoritmes de *machine learning* podrien ajudar a estimar el consum de combustible de pràcticament qualsevol vol i millorar les avaluacions d'impacte ambiental.

Una altra aplicació rellevant és el manteniment predictiu. Amb la digitalització del sector, les organitzacions de producció i manteniment gestionen cada vegada més dades, i EASA indica que la IA pot ajudar a anticipar fallades i aplicar mesures preventives abans que es produeixin incidències. Aquest ús no redueix emissions de manera tan directa com els combustibles sostenibles, però pot contribuir a una operació més eficient de la flota, evitant problemes tècnics, retards, cancel·lacions o una utilització menys òptima dels recursos disponibles [51].

A més de les emissions de CO_2, la IA també pot tenir utilitat en l'anàlisi dels efectes climàtics no-CO_2 de l'aviació, com les esteles de condensació. Les esteles poden contribuir al canvi climàtic i una possible estratègia de mitigació consisteix a modificar rutes o nivells de vol per evitar zones propenses a la seva formació. En aquest àmbit, s'han començat a utilitzar eines de *machine learning* per detectar esteles en imatges i donar suport a la predicció de zones de formació, tot i que encara existeixen incerteses sobre el seu impacte i aplicació operativa.

8. Costos i impacte de la implementació dels sistemes d'IA en el transport aeri

La implementació de sistemes d'intel·ligència artificial en el transport aeri pot generar beneficis operatius, però també comporta costos i riscos propis. No es tracta només d'incorporar una eina digital, sinó d'integrar sistemes basats en dades dins d'un sector altament regulat, on qualsevol canvi tecnològic ha de ser compatible amb la seguretat operacional. Això implica costos associats a la recopilació i tractament de dades, la

[50] *Vid.* Helena Sjöström Falk. "Digitalisation and AI in air traffic control: balancing innovation with the human element". *EUROCONTROL* en https://www.eurocontrol.int/article/digitalisation-and-ai-air-traffic-control-balancing-innovation-human-element (accés 26 de maig)
[51] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY. " Artificial Intelligence ROADMAP 2.0". *Opt. Cit.* pp. 11

integració amb sistemes existents, la formació del personal i l'adaptació dels processos interns de les aerolínies, aeroports i proveïdors de serveis de navegació aèria [52].

El primer impacte és el cost regulador i de certificació de la tecnologia. EASA assenyala que la IA pot aportar solucions d'assistència avançada, optimitzar el rendiment de les aeronaus i millorar la gestió del trànsit aeri, però també fa aflorar nous reptes que s'han d'abordar abans del seu desplegament. En particular, l'agència destaca la necessitat de preparar la certificació i aprovació de sistemes d'automatització avançada, així com d'integrar aspectes ètics com la transparència, la no discriminació o la confiança pública en els processos de supervisió [53].

Aquest cost regulador també es reflecteix en el fet que la IA afecta els processos centrals d'EASA, com la certificació, l'elaboració normativa, les aprovacions d'organitzacions i l'estandardització. Això significa que la implementació de la IA no només exigeix inversió per part de les empreses, sinó també una adaptació institucional per part de les autoritats aeronàutiques. Per tant, el desplegament de la IA en aviació pot ser més lent i costós que en altres sectors, precisament perquè ha d'encaixar amb un sistema de seguretat i supervisió molt exigent.

Un altre punt a tenir en compte és la necessitat de garantir una IA fiable. L'EASA estructura aquest concepte al voltant de diversos elements, com l'anàlisi de confiança, l'assegurament de la IA, els factors humans, la mitigació del risc de seguretat i el seguiment del cicle de vida de l'aplicació. Això implica que un sistema d'IA aplicat a l'aviació no pot valorar-se només per la seva eficiència, sinó també per la seva capacitat de ser supervisat, explicat, validat i controlat durant tot el seu funcionament [54].

Aquesta darrera exigència va de la mà del Reglament europeu d'intel·ligència artificial[55]. Aquest estableix que quan un sistema d'IA pugui tenir influència i incidència en àmbits sensibles o de risc elevat, s'exigeixen requisits estrictes, com sistemes de gestió del risc, qualitat de les dades, traçabilitat, documentació tècnica, informació clara per als usuaris, supervisió humana, robustesa, exactitud i ciberseguretat. En el transport aeri,

[52] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY. " Artificial Intelligence ROADMAP 2.0". *Opt. Cit.* pp. 4-5.
[53] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY. " Artificial Intelligence ROADMAP 2.0". *Opt. Cit.* pp. 4.
[54] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY. " Artificial Intelligence ROADMAP 2.0". *Opt. Cit.* pp. 17-19.
[55] Reglament (UE) 2024/1689 del Parlament Europeu i del Consell, de 13 de juny de 2024, pel que s'estableixen normes harmonitzades en matèria d'intel·ligència artificial i pel que es modifiquen els Reglaments (CE) nº 300/2008, (UE) nº 167/2013, (UE) nº 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1139 y (UE) 2019/2144 i les Directives 2014/90/UE, (UE) 2016/797 i (UE) 2020/1828 (Reglament d'Intel·ligència Artificial). *DOUE* núm. 1689 de 12 de juliol de 2024 .

aquests requisits són especialment rellevants perquè moltes aplicacions d'IA poden influir en decisions operatives o de seguretat [56].

És també imprescindible tenir en compte el factor humà. La IA pot ajudar pilots, controladors aeris o personal tècnic a prendre decisions més ràpides i informades, però això no significa eliminar la supervisió humana. És important que els professionals entenguin les capacitats i limitacions del sistema, puguin interpretar-ne els resultats i mantinguin la capacitat d'intervenir o corregir una decisió quan sigui necessari.

Per acabar, l'ús de la IA també té un impacte energètic. Per tant, encara que pugui ajudar a reduir el consum de combustible en les diferents activitats aeronàutiques, el seu funcionament depèn de dades, capacitat de computació i centres de dades. La *International Energy Agency* assenyala que la IA no funciona sense energia, concretament sense electricitat per als centres de dades. Per tant, el benefici mediambiental de la IA dependrà també de l'eficiència dels sistemes utilitzats i de l'origen de l'electricitat que alimenti aquesta infraestructura digital.

En conclusió, la implementació de la IA en el transport aeri pot aportar millores d'eficiència, seguretat i sostenibilitat, però no és una eina exempta de costos. El seu desplegament exigeix inversions tecnològiques, adaptació reguladora, certificació, formació, ciberseguretat i consum energètic. Per això, la IA s'hauria d'aplicar de manera progressiva i en aquells usos on els beneficis operatius i ambientals siguin prou clars per justificar els costos i riscos associats.

9. Anàlisi cost-benefici de l'aplicació de la IA en el sector aeronàutic en la descarbonització

Per poder valorar aquesta relació cost-benefici, cal distingir entre les aplicacions d'IA que poden generar un estalvi operatiu mesurable i aquelles que només introdueixen una millora tecnològica sense un efecte ambiental clar. Seguint en el marc de la descarbonització, la IA tindrà més sentit quan permeti reduir temps de vol, consum de combustible, retards, congestió o utilització ineficient de la flota. En canvi, el seu desplegament i la seva implantació serà menys justificable si els costos de desenvolupament, certificació, integració i consum energètic no es tradueixen en una reducció verificable de les emissions o dels costos operatius.

[56] COMISSIÓ EUROPEA. "European approach to artificial intelligence" *AI Act* en https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/regulatory-framework-ai (accés 28 de maig).

Aquesta valoració és especialment important perquè una de les formes més eficients i ràpides a l'actualitat per reduir les emissions dins del sector són les millores operatives. L'informe *The Price of Net Zero* estima que les millores en ATM i operacions poden arribar a reduir fins a 555 milions de tones de CO_2 amb un cost mitjà de 85 euros per tona reduïda [57]. Aquesta dada situa les millores operatives com una de les actuacions amb millor eficiència econòmica en comparació amb altres pilars de la descarbonització. Tot i que, el mateix informe també indica que els diferents pilars estan interrelacionats i que no es poden prioritzar de manera aïllada. Per tant, la IA s'ha d'entendre com una eina que pot reforçar aquest bloc operatiu, però no com una alternativa independent a la resta de mesures.

Pillar	Cost components	Total expenditures (B€)	CO_2 reduction (Mt)	Average efficiency (€/tCO_2)
Improvements in technology	• Future aircraft R&D • Fleet renewal • Infrastructure for future aircraft	938	1410	665
Improvements in ATM and operations	• Airline operations • Airspace and ATM • Ground operations at airports	47	555	85
Alternative fuels	• Drop-in SAF • Hydrogen • Renewable electricity	751	1609	467
Carbon pricing / negative emissions		152	1148	132
Total		1888	4820	392

Taula 3: *Vid.* MARTIN ADLER, BRAM PEERLINGS, THIJS BOONEKAMP, ELISABETH VAN DER SMAN, NANETTE LIM, ARNOUT JONGELING, SACHA PEL "The Price of Net Zero".

Ara bé, la seva aplicació hauria d'anar acompanyada d'indicadors concrets de seguiment. Per valorar si una eina d'IA és realment beneficiosa, seria necessari mesurar aspectes com la reducció del consum de combustible, les tones de CO_2 evitades, la disminució de retards, la millora de la puntualitat, la reducció de cancel·lacions tècniques o l'increment de l'eficiència en l'ús de l'espai aeri. Sense aquests indicadors, el risc és que la IA es presenti com una innovació ambiental sense poder demostrar un benefici real.

[57] *Vid.* MARTIN ADLER, BRAM PEERLINGS, THIJS BOONEKAMP, ELISABETH VAN DER SMAN, NANETTE LIM, ARNOUT JONGELING, SACHA PEL, "THE PRICE OF NET..." *Opt Cit.* pp. 40. Taula 4.3.

CONCLUSIONS

Aquest treball ha analitzat el procés de descarbonització del sector aeronàutic europeu amb el propòsit d'estudiar com les mesures jurídiques, econòmiques i tecnològiques impulsades per la Unió Europea poden transformar el funcionament del transport aeri europeu. S'han analitzat els principals instruments normatius aplicables al sector, els costos que poden generar sobre aerolínies, aeroports, proveïdors de combustible i passatgers, així com les alternatives sostenibles a la combustió convencional i el paper que pot tenir la intel·ligència artificial en la millora de l'eficiència operativa. A partir d'aquesta anàlisi, es formulen les conclusions següents amb l'objectiu de valorar si la descarbonització del sector aeronàutic pot desenvolupar-se d'una manera jurídicament coherent, econòmicament viable, socialment equilibrada i realista:

Primera. – Es conclou que la descarbonització del sector aeronàutic s'ha convertit en una obligació jurídica i política dins de la Unió Europea. El Pacte Verd Europeu, la Llei Europea del Clima i el paquet *Fit for 55*, han establert un full de ruta exigent i ambiciós, orientat a reduir les emissions i arribar a la neutralitat climàtica l'any 2050. La sostenibilitat ja no pot entendre's com una opció voluntària per part de les empreses per donar una bona imatge, sinó com un element central de la regulació, de competència i de la futura gestió aeronàutica.

Segona. – Es constata que la descarbonització genera un impacte i canvi profund en l'estructura de costos dels agents del sector, però sobretot els costos de les aerolínies. Aquestes han d'assumir costos vinculats a les emissions, al combustible sostenible, a la renovació de la flota, adaptació operativa i a les pujades de tarifes de la resta d'agents. Per fer front a tots aquests costos, les aerolínies hauran de prioritzar l'eficiència energètica, reducció de consums de combustible, millora operativa i reduir ineficiències per mantenir la seva competitivitat en el nou context regulador.

Tercera. – Es confirma que els costos de la transició no només afectaran al sector empresarial, sinó que també es podran traslladar als preus dels bitllets dels passatgers. Aquest increment pot tenir efectes sobre la demanda, especialment en rutes intraeuropees i dins dels segments de passatgers d'oci o de companyies *low-cost.*

Quarta. – Es conclou que la descarbonització pot generar impactes territorials desigals. Els grans *hubs* europeus tenen més capacitat per absorbir costos i diversificar rutes, mentre que els aeroports regionals, insulars o perifèrics poden resultar més vulneragles davant una pèrdua de connexions. És per això que la transició hauria de tenir en compte

no només la reducció d'emissions, sinó també una preservació d'una connectivitat territorial mínima i equilibrada.

Cinquena. – Es constata que les alternatives sostenibles a la combustió convencional poden ajudar a reduir l'impacte ambiental del sector, però encara no estan preparades per substituir la tecnologia i consum de querosè a curt termini o mitjà termini. Els *SAF* son l'opció més viable actualment per la substitució progressiva a l'aviació comercial i és per tant per la que s'ha apostat políticament.

Sisena. - Es confirma que la intel·ligència artificial pot tenir un paper important com a eina de suport a la descarbonització operativa del sector aeronàutic. La IA pot contribuir a optimitzar trajectòries, millorar la gestió del trànsit aeri i reforçar l'avaluació ambiental de les operacions. Tot i això, també es conclou que la seva implementació pot comportar costos i riscos que han de ser valorats. La seva aplicació exigeix seguretat, certificació, supervisió humana, ciberseguretat i consum energètic, així com també uns KPIs per valorar el seu impacte.

Setena. – Es proposa que la política europea de descarbonització del sector aeronàutic faci un seguiment exhaustiu econòmic, territorial i social de l'impacte de les mesures reguladores. La Unió Europea hauria de revisar de forma periòdica l'efecte dels costos sobre les aerolínies, aeroports, passatgers i connectivitat per corregir possibles conseqüències no previstes sobre els diferents agents i territoris. Aquest seguiment permetria garantir que els mecanismes mantinguin la seva eficàcia ambiental i al mateix temps evitar que es generin pèrdues excessives de competitivitat, connectivitat o equilibri territorial.

BIBLIOGRAFIA

ACI EUROPE, “Assessment of the impact of the Fit for 55 policies on airports”, *OXERA,* https://www.oxera.com/wp-content/uploads/2022/06/Impact-assessment-of-Fit-for-55-policies-on-the-aviation-sector_final_080622.pdf

EASA. “Artificial Intelligence ROADMAP 2.0”. en https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/easa-artificial-intelligence-roadmap-20

Hugh GARDNER, Marco BRAMBILLA, David MATHEUS, Giorgio RANDO, Stefan GREBE, Dagmar NELISSEN, Maarten DE VRIES and Stuart ROSS, “Expected impacts of Fit for 55 legislation on connectivity and mobility in Europe”, *PARLAMENT EUROPEU*, https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2024/752457/IPOL_STU(2024)752457_EN.pdf

KONIJN, Stef; ADLER, Martin; BOONEKAMP, Thijs; PEERLINGS, Bram. “The Price of Fit for 55: Aviation Costs of the EU's Fit for 55 Proposal”. *Amsterdam: SEO Amsterdam Economics i NLR* en https://www.seo.nl/wp-content/uploads/2022/09/The-price-of-Fit-for-55-note-final-SEO-NLR-D2050-project_001078.pdf

Martin ADLER, Bram PEERLINGS, Thijs BOONEKAMP, Elisabeth VAN DER SMAN, NANETTE LIM, Arnout JONGELING, Sacha PEL, “THE PRICE OF NET ZERO”, *Amsterdam: SEO Amsterdam Economics i NLR*, https://reports.nlr.nl/server/api/core/bitstreams/eb251247-066d-4fda-869b-eaedeab289b1/content

LEGISLACIÓ

Espanyola:

Art.149.1.20 de Constitució Espanyola, *BOE*, núm. 311, de 29 de diciembre de 1978.

Art.149.1.23 de Constitució Espanyola, BOE, núm. 311, de 29 de diciembre de 1978.

Europea:

Art. 4 del Tratado de la Unión Europea y Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea -TFUE, la Conferencia intergubernamental que ha adoptado el Tratado de Lisboa, *DOUE,* núm. 83, de 30 de marzo de 2010.

Art. 191. del Tratado de la Unión Europea y Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea -TFUE.

Art. 192. del Tratado de la Unión Europea y Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea -TFUE.

Art. 193. del Tratado de la Unión Europea y Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea -TFUE.

Reglamento (UE) 2024/1689 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de junio de 2024, por el que se establecen normas armonizadas en materia de inteligencia artificial y por el que se modifican los Reglamentos (CE) nº 300/2008, (UE) nº 167/2013, (UE) nº 168/2013, (UE) 2018/858, (UE) 2018/1139 y (UE) 2019/2144 y las Directivas 2014/90/UE, (UE) 2016/797 y (UE) 2020/1828 (Reglamento de Inteligencia Artificial). *DOUE* núm. 1689 de 12 de julio de 2024.

ALTRES DOCUMENTS

Taula 1: Vid. KONIJN, Stef; ADLER, Martin; BOONEKAMP, Thijs; PEERLINGS, Bram. "The Price of Fit for 55: Aviation Costs of the EU's Fit for 55 Proposal" Amsterdam: SEO Amsterdam Economics i NLR en https://www.seo.nl/wp-content/uploads/2022/09/The-price-of-Fit-for-55-note-final-SEO-NLR-D2050-project_001078.pdf

Taula 2: KONIJN, Stef; ADLER, Martin; BOONEKAMP, Thijs; PEERLINGS, Bram. "The Price of Fit for 55: Aviation Costs of the EU's Fit for 55 Proposal". Amsterdam: SEO Amsterdam Economics i NLR en https://www.seo.nl/wp-content/uploads/2022/09/The-price-of-Fit-for-55-note-final-SEO-NLR-D2050-project_001078.pdf

Taula 3: MARTIN ADLER, BRAM PEERLINGS, THIJS BOONEKAMP, ELISABETH VAN DER SMAN, NANETTE LIM, ARNOUT JONGELING, SACHA PEL "The Price of Net Zero", Amsterdam: SEO Amsterdam Economics i NLR, https://reports.nlr.nl/server/api/core/bitstreams/eb251247-066d-4fda-869b-eaedeab289b1/content

Gràfic 1: ACI EUROPE, "Assessment of the impact of the Fit for 55 policies on airports", Oxera https://www.oxera.com/wp-content/uploads/2022/06/Impact-assessment-of-Fit-for-55-policies-on-the-aviation-sector_final_080622.pdf

Gràfic 2: ACI EUROPE, "Assessment of the impact of the Fit for 55 policies on airports", OXERA, https://www.oxera.com/wp-content/uploads/2022/06/Impact-assessment-of-Fit-for-55-policies-on-the-aviation-sector_final_080622.pdf

WEBGRAFIA

COMISSIÓ EUROPEA. “About the EU ETS”. *Climate Action*, en https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-markets/about-eu-ets_en

COMISSIÓ EUROPEA. “Aviation in the EU Emissions Trading System”. *Climate Action*, en https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/reducing-emissions-aviation_en?utm

COMISSIÓ EUROPEA. “European approach to artificial intelligence”. *AI Act*, en https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/regulatory-framework-ai

COMISSIÓ EUROPEA. “European Climate Law”. *Climate Action*, en https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_en?prefLang=es%20https://eur-lex.europa.eu/ES/legal-content/summary/european-climate-law.html

COMISSIÓ EUROPEA. “Reducing emissions from aviation”. *Climate Action*, en https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/reducing-emissions-aviation_en?utm

COMISSIÓ EUROPEA. “Revision of the Energy Taxation Directive”. *Taxation and Customs Union*, en https://taxation-customs.ec.europa.eu/taxation/excise-duties/revision-energy-taxation-directive_en

CONSELL DE LA UNIÓ EUROPEA. “Fit for 55: increasing the uptake of greener fuels in the aviation and maritime sectors”. *ReFuelEU Aviation*, en https://www.consilium.europa.eu/es/infographics/fit-for-55-refueleu-and-fueleu/

EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY. “Electric propulsion”. *EASA*, en https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/eaer/technology-and-design/low-carbon-emissions-aircraft/electric-propulsion

EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY. “European Aviation Environmental Report 2025”. *EASA*, en https://www.easa.europa.eu/en/light/topics/european-aviation-environmental-report-2025

EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY. “Hydrogen-powered Aircraft”. EASA, en https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/eaer/technology-and-design/low-carbon-emissions-aircraft/hydrogen-powered

EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY. “Sustainable Aviation Fuels”. EASA, en https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/eaer/sustainable-aviation-fuels/what-are-sustainable-aviation-fuels

EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY. “Una iniciativa para contribuir a descarbonizar el sector de la aviación”. *ReFuelEU Aviation*, en https://www.easa.europa.eu/es/light/topics/refueleu-aviation

LOMBARDO, Leo. “CO_2 emissions in aviation in the Net Zero Scenario, 2000-2030”. International Energy Agency, 2025, en https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation

SINGLE EUROPEAN SKY ATM RESEARCH. “Smart ATM”. SESAR Joint Undertaking, en https://www.sesarju.eu/ai

SJÖSTRÖM FALK, Helena. “Digitalisation and AI in air traffic control: balancing innovation with the human element”. EUROCONTROL, en https://www.eurocontrol.int/article/digitalisation-and-ai-air-traffic-control-balancing-innovation-human-element