Universitat Autònoma de Barcelona

Human-AI Teaming en el Control del Trànsit Aeri: Anàlisi dels reptes en la implementació de les Operacions Basades en Trajectòries (TBO)

Memòria del Treball de Fi de Grau en Gestió Aeronàutica

Realitzat per

Iker Cárdenas Rosado

i dirigit per

Tomás Urrengoechea Cantavenera

Escola d'Enginyeria

Sabadell, juny de 2026

El sotasignat, Tomás Urrengoechea Cantavenera 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

Iker Cárdenas Rosado ,

I per a que consti firma la present.
Sabadell, *juny* de *2026* .

Signat: Tomás Urrengoechea Cantanavera

Resum

Aquest Treball de Fi de Grau analitza els reptes associats a la implementació del treball en equip entre humans i sistemes d'intel·ligència artificial (Human-AI Teaming) en el control del trànsit aeri, amb especial èmfasi en el marc de les Operacions Basades en Trajectòries (TBO). En un context de creixent automatització del sistema de gestió del trànsit aeri (ATM), s'identifica una tensió creixent entre l'eficiència operativa i la preservació del factor humà.

L'objectiu principal és estudiar com els diferents nivells d'automatització (LOA) impacten en el rol del controlador aeri, concretament en dos conceptes clau del factor humà: la capacitat de supervisió humana (*human oversight*) i el sentit d'agència (*sense of agency*).

La metodologia emprada consisteix en una revisió bibliogràfica sistemàtica que integra treballs fundacionals en factors humans i automatització (Endsley, Parasuraman, Sheridan, Bainbridge), documents institucionals (EASA, Eurocontrol, SESAR JU), el Reglament d'Intel·ligència Artificial de la Unió Europea (AI Act 2024), i projectes europeus rellevants com ATC-TBO i JARVIS.

Els resultats principals mostren que l'impacte de l'automatització no és homogeni sinó que varia significativament segons la fase operativa (control d'àrea ACC, aproximació APP o torre TWR). A l'ACC, l'alt nivell d'automatització redueix la càrrega de treball però comporta riscos de pèrdua de consciència situacional (*out-of-the-loop*) i reducció del sentit d'agència. A l'APP, l'automatització assisteix la presa de decisions en situacions de saturació cognitiva, mentre que a la TWR el controlador manté un control directe amb automatització limitada. S'identifiquen riscos cognitius transversals com el biaix d'automatització (*automation bias*), l'excés de confiança (*overtrust*) i la pèrdua d'habilitats (*deskilling*).

La principal contribució d'aquest treball és un marc integrador que relaciona fase operativa, nivell d'automatització, factors humans i impacte en la supervisió i l'agència, així com la formulació de cinc criteris de disseny per a sistemes d'IA en el control del trànsit aeri: transparència, preservació de l'agència, adaptació dinàmica al context, evitació de la sobrecàrrega d'informació, i manteniment del controlador dins del bucle decisió. Aquests criteris estan connectats explícitament amb els requisits dels articles 13, 14 i 15 de l'AI Act.

El treball conclou que l'èxit de la transformació tecnològica dependrà no només del desenvolupament de sistemes avançats, sinó de la seva capacitat per integrar-se de manera efectiva amb els professionals humans, preservant la seva implicació, criteri i responsabilitat en la presa de decisions crítiques.

Paraules clau: Human-AI Teaming, control del trànsit aeri, nivells d'automatització (LOA), supervisió humana (*human oversight*), sentit d'agència (*sense of agency*), Operacions Basades en Trajectòries (TBO), JARVIS, factors humans, AI Act.

Abstract

This Bachelor's Thesis analyses the challenges associated with the implementation of Human-AI Teaming in air traffic control, with special emphasis on the framework of Trajectory-Based Operations (TBO). In a context of increasing automation of the Air Traffic Management (ATM) system, a growing tension is identified between operational efficiency and the preservation of the human factor.

The main objective is to study how different levels of automation (LOA) impact the role of the air traffic controller, specifically on two key human factor concepts: human oversight and sense of agency.

The methodology consists of a systematic literature review integrating foundational works on human factors and automation (Endsley, Parasuraman, Sheridan, Bainbridge), institutional documents (EASA, Eurocontrol, SESAR JU), the European Union Artificial Intelligence Act (AI Act 2024), and relevant European projects such as ATC-TBO and JARVIS.

The main results show that the impact of automation is not homogeneous but varies significantly depending on the operational phase (Area Control Centre ACC, Approach APP, or Tower TWR). In ACC, high automation reduces workload but entails risks of loss of situational awareness (out-of-the-loop) and reduced sense of agency. In APP, automation assists decision-making in situations of cognitive saturation, while in TWR the controller maintains direct control with limited automation. Cross-cutting cognitive risks such as automation bias, overtrust, and deskilling are identified.

The main contribution of this work is an integrative framework that relates operational phase, level of automation, human factors, and impact on oversight and agency, as well as the formulation of five design criteria for AI systems in ATC: transparency, preservation of agency, dynamic adaptation to context, avoidance of information overload, and keeping the controller in the decision loop. These criteria are explicitly connected with the requirements of Articles 13, 14 and 15 of the AI Act.

The thesis concludes that the success of technological transformation will depend not only on the development of advanced systems, but on their ability to integrate effectively with human professionals, preserving their involvement, judgement, and responsibility in critical decision-making.

Keywords: Human-AI Teaming, air traffic control, levels of automation (LOA), human oversight, sense of agency, Trajectory-Based Operations (TBO), JARVIS, human factors, AI Act.

Índex

1.Introducció....8

1.1 Context i motivació....8

1.2 Objectius del Treball....9

1.3. Metodologia....9

1.4. Estructura del document....10

1.5. Abast de l'estudi....11

2. Marc conceptual....12

2.1. Nivells d'automatització (LOA): taxonomia de Parasuraman, Sheridan i Wickens (2000) i escala de Sheridan i Verplanck....12

2.2. Human-AI Teaming: definició i característiques....13

2.3. Human oversight i sense of agency: definicions i relació amb l'automatització....15

2.4. Estat de l'art....16

2.4.1. Literatura sobre Human-AI Teaming en ATC....16

2.4.2. Automatització i TBO en el context europeu....16

3. El control del trànsit aeri: fases operatives....18

3.1. Control d'àrea (ACC)....18

3.2. Control d'aproximació (APP)....18

3.3. Control de torre (TWR)....19

3.4 Taula comparativa de les tres fases....20

3.5. Asimetria TBO per fase: ACC com a entorn central....21

4. Factors humans en la presa de decisions....23

4.1. Factors cognitius, fisiològics i psicològics per fase....23

4.2. Implicacions per a l'oversight i el sentit d'agència per fase....24

4.3. Instruments de mesura dels factors humans....25

4.3.1 Consciència situacional: SAGAT i SART....25

4.3.2 Càrrega de treball: NASA-TLX....25

4.3.3 Sentit d'agència: escales d'agència....26

4.3.4 Integració multidimensional....26

4.4 Riscos cognitius de l'automatització....27

4.4.1. Automation bias (biaix d'automatització)....27

4.4.2. Out-of-the-loop problem (problema d'estar fora del bucle)....28

4.4.3. Overtrust / undertrust (excés i defecte de confiança)....28

4.4.4. Deskilling (pèrdua d'habilitats)....29

5. Projectes SESAR: ATC-TBO i JARVIS....31

5.1. ATC-TBO: concepte, components tecnològics i rol del controlador....31

5.1.1. Definició i model basat en trajectories 4D 31
5.1.2. Aplicació diferencial per fase (ACC / APP / TWR) 32
5.1.3. Transformació del rol del controlador en TBO 32
5.2. JARVIS: arquitectura real i components 33
5.2.1. Nom oficial i origen del projecte (SESAR JU) 33
5.2.2. Els cinc assistents digitals: ATC, Airborne, Airport, Safety, Operational 33
5.2.3. El DCT assistant: proposta de rutes i preservació de l'agència 34
5.2.4. El CORA: resolució de conflictes i distinció respecte al DCT 34
5.2.5. Aplicació de JARVIS per fase de control 34
5.3. Sinèrgies entre ATC-TBO i JARVIS 35
6. Marc integrador: fase × LOA × factors HF × impacte en oversight i agency 37
6.1. Taula síntesi comparativa 38
6.2. Riscos específics per fase i sistema 39
6.3. Criteris de disseny per a sistemes d'IA en ATC 40
7.Conclusions 42
7.1 Síntesi de l'anàlisi 42
7.1.1Funcionament i principis de les Operacions Basades en Trajectòries (TBO) 42
7.1.2 Impacte dels nivells d'automatització sobre l'oversight i el sense of agency per fase 42
7.1.3 Diferències entre ATC-TBO i JARVIS des del punt de vista dels factors humans 43
7.2 Contribució del treball 43
7.3. Limitacions 44
7.4. Preguntes obertes de recerca futura 45
8. Annexos 47
Annex A. Definicions de conceptes clau i acrònims 47
Annex B. Metodologia 48
Annex C. Instruments de mesura 48
Annex D. Informació tècnica dels projectes 49
9. Bibliografia 51
10. Agraïments 54

Índex de taules

Taula 1. Escala de nivells d'automatització de Sheridan i Verplanck (1978). 12

Taula 2 Síntesi comparativa de les fases operatives (ACC, APP, TWR). 20

Taula 3. Instruments de mesura de la consciència situacional, càrrega de treball i sentit d'agència en el control del trànsit aeri 27

Taula 4.Marc integrador de factors humans i automatització en ATC. 38

Índex d'acrònims

Acrònim	Significat
ACC	Area Control Center
AI	Artificial Intelligence
AI Act	Artificial Intelligence Act
AMAN	Arrival Manager
APP	Approach Control
ATC	Air Traffic Control
ATM	Air Traffic Management
CORA	Conflict Resolution Assistant
CTA	Controlled Time of Arrival
CTR	Control Zone
DCT	Direct Route Tool
DMAN	Departure Manager
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EUROCONTROL	European Organisation for the Safety of Air Navigation
HAT	Human–AI Teaming
HMI	Human–Machine Interface
JARVIS	Just a Rather Very Intelligent System
LOA	Levels of Automation
NASA-TLX	NASA Task Load Index
NM	Nautical Miles
OOTL	Out-Of-The-Loop
RTA	Required Time of Arrival
SA	Situational Awareness
SAGAT	Situation Awareness Global Assessment Technique
SART	Situation Awareness Rating Technique
SESAR	Single European Sky ATM Research
TBO	Trajectory-Based Operations
TWR	Tower Control

1.Introducció

1.1 Context i motivació

El transport aeri constitueix un dels pilars fonamentals de la mobilitat global contemporània, facilitant el moviment de persones i mercaderies a escala internacional amb uns estàndards de seguretat extraordinàriament elevats. En aquest context, el sistema de gestió del trànsit aeri (Air Traffic Management, ATM) juga un paper essencial per garantir l'eficiència, la seguretat i la sostenibilitat de les operacions. No obstant això, el creixement sostingut de la demanda de transport aeri, juntament amb les limitacions estructurals de l'espai aeri europeu, han posat de manifest la necessitat de transformar els models operatius tradicionals.

Durant dècades, el control del trànsit aeri s'ha basat en un paradigma reactiu, en què els controladors aeris gestionen individualment cada aeronau mitjançant instruccions tàctiques orientades a mantenir la separació i resoldre conflictes de manera immediata. Tot i que aquest model ha demostrat ser altament fiable, presenta limitacions significatives en termes d'escalabilitat, eficiència i capacitat d'adaptació davant entorns cada cop més complexos i dinàmics. En aquest escenari, emergeixen noves aproximacions conceptuals i tecnològiques que busquen redefinir la manera com es gestiona el trànsit aeri.

Entre aquestes innovacions, les Operacions Basades en Trajectòries (Trajectory Based Operations, TBO) representen un canvi de paradigma profund, passant d'un model centrat en instruccions puntuals a un model basat en la planificació i gestió de trajectòries completes en quatre dimensions. Aquest enfocament permet una optimització global del sistema, integrant factors com la meteorologia, la demanda de trànsit, les restriccions d'espai aeri i els objectius de sostenibilitat. Paral·lelament, la incorporació de sistemes d'intel·ligència artificial (IA) en el marc de programes com SESAR a Europa o NextGen als Estats Units està transformant la interacció entre els controladors aeris i les eines tecnològiques, donant lloc al concepte de Human-AI Teaming.

El Human-AI Teaming es refereix a la col·laboració efectiva entre humans i sistemes intel·ligents en la presa de decisions, on ambdós agents aporten capacitats complementàries. Mentre que els sistemes d'IA destaquen en el processament massiu de dades, la predicció i l'optimització, els humans aporten flexibilitat cognitiva, capacitat d'interpretació en contextos incerts i habilitats de gestió de situacions no previstes. Tanmateix, aquesta col·laboració planteja reptes significatius, especialment en entorns crítics com el control del trànsit aeri, on la seguretat depèn de la correcta integració entre tecnologia i factor humà.

Un dels principals riscos associats a l'automatització avançada és la possible degradació de la consciència situacional ,la pèrdua del sentit d'agència (sense of agency) i la reducció de la capacitat de supervisió efectiva (human oversight) per part del controlador. Fenòmens com l'out-of-the-loop o el biaix d'automatització poden comprometre la capacitat de resposta davant situacions inesperades, especialment quan el sistema assumeix un rol predominant en la presa de decisions.

En aquest context, el present Treball de Fi de Grau té com a objectiu principal analitzar els reptes associats a la implementació del Human-AI Teaming en el control del trànsit aeri, amb especial èmfasi en el marc de les Operacions Basades en Trajectòries. Concretament, es pretén estudiar com els diferents nivells d'automatització impacten en els factors humans, la presa de decisions i el rol del controlador en les diverses fases del vol: control d'àrea, aproximació i torre.

Per assolir aquest objectiu, el treball es basa en una anàlisi conceptual i revisió de la literatura existent, així com en la comparació sistemàtica dels factors humans en cada entorn operatiu. A partir d'aquest anàlisi, es proposa un marc integrador que permet comprendre la interacció entre tecnologia, processos cognitius i condicions operatives, identificant els principals riscos i oportunitats associats a la integració de la intel·ligència artificial en l'ATM.

Finalment, aquest treball pretén contribuir al debat actual sobre el futur del control del trànsit aeri, posant de manifest que l'èxit de la transformació tecnològica no dependrà únicament del desenvolupament de sistemes més avançats, sinó de la seva capacitat per integrar-se de manera efectiva amb els professionals humans, preservant la seva implicació, el seu criteri i la seva responsabilitat en la presa de decisions crítiques.

1.2 Objectius del Treball

L'objectiu principal d'aquest Treball de Fi de Grau és analitzar l'estat actual del treball en equip entre humans i sistemes d'intel·ligència artificial (Human–AI Teaming) en el control del trànsit aeri, amb especial atenció a l'impacte dels diferents nivells d'automatització sobre el rol del controlador aeri.

En concret, el treball se centra en estudiar com aquests nivells d'automatització influeixen en dos conceptes clau del factor humà: la capacitat de supervisió humana (human oversight) i el sentit d'agència (sense of agency), entès com la percepció de control i responsabilitat sobre les decisions operatives.

A partir d'aquest objectiu general, es plantegen els següents objectius específics:

- Analitzar els conceptes de Human–AI Teaming i els diferents nivells d'automatització en el context del control del trànsit aeri.
- Estudiar el paper dels factors humans en la presa de decisions en les diferents fases del control (àrea, aproximació i torre).
- Avaluar l'impacte de l'automatització en la consciència situacional, la supervisió i el sentit d'agència del controlador.
- Analitzar el funcionament i els principis de les Operacions Basades en Trajectòries (TBO).
- Identificar els principals reptes, riscos i oportunitats associats a la implementació de TBO en entorns altament automatitzats.
- Proposar criteris i consideracions per a una integració efectiva de sistemes d'intel·ligència artificial que mantingui el paper actiu del controlador humà.

1.3. Metodologia

Per tal d'assolir els objectius plantejats, s'ha realitzat una revisió bibliogràfica sistemàtica centrada en el treball en equip entre humans i sistemes d'intel·ligència artificial en el control del trànsit aeri.

- Bases de dades consultades
  Les cerques s'han realitzat a tres bases de dades principals: *Scopus* (per la seva cobertura multidisciplinària entre enginyeria i factor humà), *IEEE Xplore* (per la seva especialització en sistemes d'automatització i IA) i *Google Scholar* (per identificar informes tècnics d'agències com Eurocontrol o FAA no indexats a les bases anteriors).

- Paraules clau de cerca
  S'han combinat els següents termes mitjançant operadors booleans: *"Human-AI Teaming"* AND *"air traffic control"*; *"automation bias"* AND *"air traffic controller"*; *"sense of agency"* AND *"automation"*; *"Trajectory Based Operations"* OR *"TBO"* AND *"human factors"*; *"human oversight"* AND *"ATC automation"*.

- Criteris d'inclusió i exclusió
  A partir de la bibliografia finalment seleccionada, s'han aplicat els següents criteris:

Criteris d'inclusió:

- Articles publicats en revistes d'alt impacte com *Human Factors*, *PLOS ONE* o *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*.
- Treballs d'autors de referència en l'àmbit de l'automatització i el factor humà, com Endsley, Parasuraman, Sheridan, Wickens, Berberian o O'Neill.
- Documents institucionals d'organismes reguladors i d'investigació: EASA (Artificial Intelligence Roadmap 2.0), Eurocontrol, FAA, SESAR Joint Undertaking (European ATM Master Plan, projecte JARVIS), i el Reglament d'Intel·ligència Artificial de la Unió Europea (AI Act).
- Estudis que abordin específicament conceptes clau com *situation awareness*, *sense of agency*, *out-of-the-loop performance problem*, *human-autonomy teaming*, o càrrega de treball mesurada amb instruments validats (NASA-TLX, SART).
- Publicacions entre 1988 i 2024, incloent tant treballs fundacionals (Endsley, 1995; Parasuraman & Riley, 1997) com avenços recents (O'Neill et al., 2022; EASA, 2023; AI Act 2024).

Criteris d'exclusió:

- Estudis centrats exclusivament en tecnologia o algorismes sense consideració del factor humà.
- Documents no accessibles en anglès, castellà o català.
- Treballs que no aportin evidències empíriques o marcs teòrics aplicables al control del trànsit aeri.

Aquesta metodologia garanteix un procés replicable i transparent, evitant que sigui només un llistat de referències previstes.

1.4. Estructura del document

L'estructura consta en set capítols que segueixen una progressió des del marc teòric fins a l'anàlisi aplicada i la proposta integradora.

El capítol 1 introdueix el context del treball, la seva motivació, els objectius plantejats, la metodologia utilitzada i l'abast de l'estudi.

El capítol 2 desenvolupa el marc conceptual, incloent els nivells d'automatització (LOA), el concepte de Human-AI Teaming i les nocions de control humà (human oversight) i sentit

d'agència, així com l'estat de l'art en la seva aplicació al control del trànsit aeri i a les operacions basades en trajectòries (TBO).

El capítol 3 descriu les diferents fases operatives del control del trànsit aeri (ACC, APP i TWR), analitzant les seves característiques específiques i les diferències en la implementació del paradigma TBO en cada una d'elles.

El capítol 4 examina els factors humans que intervenen en la presa de decisions dels controladors aeris, així com els riscos associats a l'automatització en entorns TBO i el seu impacte en el control humà i el sentit d'agència.

El capítol 5 presenta dos casos rellevants dins del context europeu —ATC-TBO i el sistema JARVIS— analitzant-ne l'arquitectura, el nivell d'automatització i les implicacions per al Human-AI Teaming en les diferents fases operatives.

El capítol 6 proposa un marc integrador que combina fase operativa, nivell d'automatització i factors humans amb l'objectiu d'avaluar l'impacte dels sistemes TBO en el control humà i el sentit d'agència.

Finalment, el capítol 7 recull les conclusions principals del treball, les seves limitacions i possibles línies futures de recerca.

1.5. Abast de l'estudi

Aquest treball analitza el Human-AI Teaming (HAT) en el context del control del trànsit aeri (ATC), amb especial atenció a la integració de sistemes automatitzats i al desenvolupament del paradigma Trajectory-Based Operations (TBO) dins del marc europeu de gestió del trànsit aeri.

L'abast de l'estudi inclou, en primer lloc, la revisió del marc conceptual relacionat amb els nivells d'automatització (LOA), la consciència situacional, la supervisió humana (human oversight) i el sentit d'agència, amb l'objectiu d'establir una base teòrica sòlida per a l'anàlisi posterior.

En segon lloc, el treball examina el funcionament del control del trànsit aeri a través de les seves principals fases operatives (ACC, APP i TWR), no com a únic focus d'estudi, sinó com a context aplicat per analitzar l'impacte diferencial de l'automatització i del TBO en entorns operatius reals.

A més, s'analitzen els factors humans implicats en la presa de decisions, incloent aspectes cognitius, fisiològics i psicològics, així com els riscos associats a l'automatització, com l'automation bias, l'out-of-the-loop problem o el desajust en la confiança en els sistemes.

Finalment, el treball incorpora l'estudi de projectes europeus rellevants dins del programa SESAR, com ATC-TBO i JARVIS, amb la finalitat d'il·lustrar l'aplicació pràctica dels conceptes analitzats i explorar la seva implementació en entorns operatius.

Des d'un punt de vista metodològic, l'estudi adopta una aproximació qualitativa basada en la revisió de la literatura i en l'anàlisi conceptual comparativa, integrant els diferents elements (fases operatives, nivells d'automatització i factors humans) en un marc analític comú.

El treball se centra en sistemes amb presència de supervisió humana dins del context de l'aviació comercial i de control del trànsit aeri, deixant fora de l'abast altres àmbits com els sistemes aeris no tripulats (UAV) o escenaris d'automatització completa.

2. Marc conceptual

2.1. Nivells d'automatització (LOA): taxonomia de Parasuraman, Sheridan i Wickens (2000) i escala de Sheridan i Verplanck.

Per analitzar l'impacte de sistemes com TBO o JARVIS en la interacció humà-màquina, és necessari disposar d'un marc conceptual que permeti classificar el grau d'automatització de les tasques. La literatura especialitzada ofereix diverses taxonomies, entre les quals destaquen dues per la seva rellevància en entorns crítics com el control del trànsit aeri. Cal remarcar, però, que ambdues taxonomies no són equivalents ni intercanviables, sinó que responen a dimensions diferents i complementàries.

L'escala de Sheridan i Verplanck (1978) estableix deu nivells d'automatització que van des de l'absència total d'automatització fins a l'automatització completa. Aquesta escala, posteriorment refinada per Sheridan (2002), proporciona un marc granular per descriure quanta autonomia té el sistema en cada acció concreta. És a dir, mesura la intensitat o el grau de delegació de l'acció de l'humà al sistema. Els nivells es descriuen a la taula següent:

Nivell	Descripció
1	L'humà realitza totes les tasques manualment, sense assistència del sistema.
2	El sistema ofereix un conjunt complet d'accions alternatives.
3	El sistema redueix el conjunt d'alternatives a un nombre limitat d'opcions.
4	El sistema suggereix una única opció, però no l'executa.
5	El sistema executa l'opció suggerida només si l'humà ho aprova explícitament
6	El sistema executa automàticament, però l'humà pot vetar abans de l'execució (amb temps suficient)
7	El sistema executa automàticament i informa l'humà, amb temps limitat per vetar
8	El sistema executa i informa l'humà després de l'execució
9	El sistema executa i informa només si l'humà ho demana
10	El sistema executa de manera completament autònoma

Taula 1. Escala de nivells d'automatització de Sheridan i Verplanck (1978). Elaboració pròpia a partir de Sheridan (2002).

La combinació d'aquests dos marcs permet una anàlisi més precisa del rol del sistema en cada tasca. Mentre que **l'escala de Sheridan i Verplanck** classifica *quant* automatitza el sistema (des de cap assistència fins a autonomia plena), el model de **Parasuraman et al**. identifica *quina* de les quatre fases del processament d'informació està automatitzada: adquisició de dades, anàlisi d'informació, selecció de decisió/acció, o execució de l'acció.

En la pràctica, un sistema pot operar a diferents combinacions de (fase × LOA).

Per exemple, tal com s'aplicarà al capítol 6, el **DCT Assistant** del sistema JARVIS actua específicament sobre la funció de selecció de resposta (**tercera fase de Parasuraman et al.).** Dins d'aquesta funció, el seu grau d'automatització correspon al **nivell 4 de Sheridan i Verplanck**: el sistema suggereix una única opció (per exemple, una resolució de conflicte o una assignació de ruta), però **no l'executa**. Aquesta combinació (fase de selecció, LOA 4) implica uns factors humans concrets: redueix la càrrega cognitiva de generació d'alternatives, però manté plenament la capacitat de supervisió (oversight) activa per part del controlador, que ha de validar la proposta abans de qualsevol acció.

Cal remarcar, per evitar confusions en l'anàlisi posterior, que el DCT Assistant de JARVIS opera de manera fixa en un LOA 4 segons l'escala de Sheridan i Verplanck: el sistema suggereix una única opció (per exemple, una resolució de conflicte o una assignació de ruta), però **no l'executa**. En canvi, l'assistent CORA, davant situacions de conflicte imminent, pot arribar a LOA 5 o fins i tot LOA 6 (execució automàtica si el controlador no veta en un temps molt breu), prioritzant la seguretat sobre el control humà immediat. Aquesta distinció és fonamental i es manté coherentment al llarg del treball (vegeu Taula 2, Taula 4 i secció 5.2).

L'agència resideix encara en l'humà, ja que la decisió final no és delegada al sistema. Aquest tipus d'automatització "suggestiva però no executiva" és clau per a entorns com el control del tràfic aeri, on es busca assistència sense erosionar la responsabilitat humana. Entendre aquesta combinació des d'ara permet anticipar com, en capítols posteriors, diferents LOAs aplicades a diferents fases cognitives modulen l'impacte en oversight, agency i càrrega de treball.

En síntesi, ambdues taxonomies són ortogonals i complementàries: l'escala de Sheridan i Verplanck respon a la pregunta "**quant automatitza**?" (el grau d'autonomia en cada acció), mentre que el model de Parasuraman et al. respon a la pregunta "**on automatitza**?" (quina funció cognitiva es veu afectada). Comprendre aquesta distinció és fonamental per analitzar sistemes complexos com TBO o JARVIS, ja que un mateix sistema pot automatitzar intensament una funció cognitiva (per exemple, l'anàlisi d'informació amb alt grau d'autonomia) però mantenir l'humà en el control d'una altra (per exemple, la selecció de la resposta amb baix grau d'autonomia).

2.2. Human-AI Teaming: definició i característiques

El concepte de *Human-AI Teaming* (treball en equip entre humans i intel·ligència artificial) ha emergit en la literatura acadèmica com un marc conceptual que supera les visions tradicionals de l'automatització. Mentre que els enfocaments clàssics tendien a concebre la relació humà-màquina en termes de substitució o de divisió funcional de tasques, el *Human-AI Teaming* proposa una col·laboració més integrada on humans i sistemes intel·ligents actuen com a membres d'un equip amb rols complementaris (Johnson et al., 2014; Klein et al., 2004).

Definició: El *Human-AI Teaming* es pot definir com la col·laboració efectiva entre operadors humans i sistemes d'intel·ligència artificial en la realització de tasques complexes, on ambdós agents aporten capacitats diferenciades i es complementen mútuament per assolir objectius comuns (O'Neill et al., 2022; McNeese et al., 2021). A diferència dels enfocaments centrats en

l'automatització pura, el *teaming* implica una relació de cooperació bidireccional, on tant l'humà com el sistema poden iniciar accions, adaptar-se al comportament de l'altre i aprendre de la interacció.

Característiques distintives

La literatura especialitzada identifica diverses característiques que distingeixen el *Human-AI Teaming* de les formes tradicionals d'automatització (Endsley, 2017; Berberian & Hoc, 2015; O'Neill et al., 2022):

1. **Complementarietat de capacitats**: Els sistemes d'IA destaquen en el processament massiu de dades, la detecció de patrons complexos, l'optimització i la predicció. Els humans aporten flexibilitat cognitiva, capacitat d'interpretació en contextos ambigus, judici ètic i adaptació a situacions no previstes. L'equip humà-IA és efectiu quan aprofita els punts forts de cada agent.
2. **Interacció bidireccional**: En un equip autèntic, la comunicació i la influència no són unidireccionals (de l'humà al sistema). Els sistemes d'IA poden iniciar accions, fer recomanacions proactives i adaptar el seu comportament a les preferències i l'estat de l'operador humà.
3. **Consciència situacional compartida**: L'equip humà-IA necessita una comprensió comuna de la situació operativa. Això requereix interfícies que facin transparent el raonament del sistema (IA explicable) i que mantinguin l'humà adequadament informat.
4. **Confiança calibrada**: La confiança en el sistema ha de ser dinàmica i proporcionada a les seves capacitats reals. L'excés de confiança (*overtrust*) pot portar a l'*automation bias* i a la pèrdua de supervisió. El dèficit de confiança (*undertrust*) pot portar a la infrautilització del sistema. Una confiança calibrada és aquella en què l'humà confia en el sistema quan aquest és competent i desconfia quan no ho és.
5. **Autoritat compartida i supervisió humana**: En entorns crítics com el control del trànsit aeri, l'autoritat final ha de romandre en mans humanes. No obstant això, l'exercici d'aquesta autoritat pot adoptar formes diferents: des de la validació explícita de decisions automatitzades fins a la supervisió estratègica. El concepte d'*human oversight* (supervisió humana) es refereix precisament a la capacitat de l'operador per comprendre, monitoritzar i intervenir en les accions del sistema (EU High-Level Expert Group on AI, 2019).
6. **Adaptabilitat i aprenentatge mutu**: Un equip humà-IA madur evoluciona amb el temps. El sistema pot aprendre de les preferències i el comportament de l'operador per oferir una assistència més personalitzada. L'operador, al seu torn, desenvolupa models mentals més precisos sobre el funcionament i les limitacions del sistema.

Diferències amb l'automatització tradicional

És important distingir el *Human-AI Teaming* de l'automatització tradicional. En l'automatització clàssica, el sistema executa funcions predefinides amb un grau d'autonomia fix, i l'humà actua principalment com a supervisor o com a operador de contingència. En el *teaming*, en canvi, la relació és més simètrica: el sistema no només executa tasques sinó que pot iniciar interaccions, proposar alternatives i adaptar-se al context. L'humà no és només un supervisor sinó un col·laborador actiu que aporta el seu judici en els moments crítics.

Aquesta distinció té implicacions directes per al disseny de sistemes com TBO i JARVIS. Un sistema que opera amb un alt nivell d'automatització però que no manté l'humà dins del bucle de decisió

pot ser eficient en condicions nominals, però vulnerable davant situacions no previstes. En canvi, un sistema dissenyat sota els principis del *Human-AI Teaming* busca l'equilibri entre eficiència i resiliència, aprofitant les capacitats de l'IA sense erosionar les habilitats ni el sentit d'agència de l'operador humà.

2.3. Human oversight i sense of agency: definicions i relació amb l'automatització

El human oversight és la capacitat de l'operador humà per supervisar, comprendre i intervenir en el funcionament d'un sistema automatitzat. En entorns crítics com el control del trànsit aeri, aquesta funció és essencial per garantir la seguretat operativa, ja que permet validar decisions, detectar errors i recuperar el control en situacions imprevistes.

Des del punt de vista normatiu europeu, cal destacar que l'**Article 14 del Reglament (UE) 2024/1689 (AI Act)** defineix explícitament el *human oversight* com un dels requisits fonamentals per als sistemes d'intel·ligència artificial d'alt risc, entre els quals es classifiquen els sistemes emprats en la gestió del trànsit aeri. Aquest article estableix que aquests sistemes han de dissenyar-se de manera que siguin supervisats efectivament per persones físiques durant el seu funcionament, amb mecanismes que permetin intervenir o anul·lar les decisions automatitzades quan sigui necessari. Aquesta definició normativa reforça el marc conceptual del present treball i és plenament compatible amb les anàlisis de les fases operatives desenvolupades posteriorment.

El sense of agency fa referència a la percepció subjectiva de control que té l'individu sobre les seves accions i sobre les conseqüències d'aquestes **(Berberian et al., 2012).** En el cas dels controladors aeris, aquest concepte està estretament vinculat a la seva implicació en la presa de decisions i a la responsabilitat associada a les operacions.

L'augment dels nivells d'automatització modifica la relació entre ambdós conceptes. A mesura que els sistemes automatitzats assumeixen un paper més actiu en la generació de recomanacions i en la presa de decisions, el rol del controlador evoluciona cap a funcions de supervisió. Aquest desplaçament pot reduir la participació directa en el procés decisional i afectar tant la capacitat de supervisió efectiva com la percepció de control.

En aquest context, pot aparèixer el fenomen conegut com a out-of-the-loop **(Endsley & Kiris, 1995)**, en què la disminució de la implicació activa del controlador comporta una pèrdua de consciència situacional i una menor capacitat de resposta davant situacions inesperades. Paral·lelament, la delegació de decisions al sistema pot generar una reducció del sense of agency, especialment quan les accions són percebudes com a resultat de l'automatització i no del propi operador.

Tot i això, un disseny adequat dels sistemes automatitzats pot contribuir a mantenir aquests dos elements. La transparència, l'explicabilitat de les recomanacions i la implicació activa del controlador en el procés de decisió són factors clau per preservar tant el human oversight com el sense of agency en entorns amb alts nivells d'automatització, com els associats a les Trajectory-Based Operations.

2.4. Estat de l'art

L'estat de l'art en el control del trànsit aeri (ATC) mostra una evolució progressiva cap a sistemes altament automatitzats, en què la integració de la intel·ligència artificial i el desenvolupament del Human-AI Teaming (HAT) esdevenen elements clau. Aquesta evolució no només respon a necessitats tecnològiques, sinó també a reptes associats als factors humans i a la interacció entre operadors i sistemes automatitzats.

2.4.1. Literatura sobre Human-AI Teaming en ATC

La integració de sistemes d'intel·ligència artificial en l'ATC ha estat àmpliament estudiada tant en la literatura científica com en projectes de recerca aplicada. En el context europeu, el programa SESAR ha impulsat diverses iniciatives orientades a analitzar els reptes del treball en equip humà-IA.

El projecte PJ.16-04 *Workstation, Controller Productivity* (dins del programa SESAR 2020 Wave 1) ha explorat l'ús de tecnologies com el reconeixement automàtic de la parla (*automatic speech recognition*, ASR), l'atenció guiada (*attention guidance*) i les interfícies multitacte per millorar la productivitat del controlador. Els resultats indiquen que aquestes tecnologies poden reduir la càrrega de treball associada a tasques rutinàries, però també posen de manifest la necessitat de preservar la implicació activa del controlador per evitar la pèrdua de consciència situacional (SESAR JU, n.d.; Helmke et al., 2018).

De manera complementària, el projecte PJ.05-W2 *Digital technologies for Tower* (DTT) (dins del programa SESAR 2020 Wave 2) ha analitzat l'impacte de les noves interfícies home-màquina en l'entorn de torre, incloent el desenvolupament de torres remotes múltiples i sistemes de reconeixement automàtic de la parla basats en IA (European Commission, 2019b). En aquest àmbit, Mica R. Endsley (2017) destaca el risc de l'*out-of-the-loop*, fenomen que es produeix quan l'operador perd la capacitat de comprendre i reaccionar davant situacions crítiques a causa d'una baixa implicació en el procés de control.

Pel que fa al sentit d'agència, estudis com els de Le Goff et al. (2018) i Sahaï et al. (2019) demostren que la percepció de control disminueix quan les decisions són delegades en sistemes automatitzats. Aquesta reducció no només afecta la percepció subjectiva, sinó també la qualitat de la supervisió i la implicació del controlador.

En l'àmbit internacional, el programa NextGen als Estats Units ha desenvolupat conceptes similars, centrats en la integració de dades i la gestió de trajectòries. Projectes com *Advanced Technology and Oceanic Procedures* han demostrat la viabilitat de la gestió basada en trajectòries en entorns amb limitacions operatives (Izadi, 2020).

Finalment, la literatura recent ha aprofundit en el disseny de sistemes d'IA orientats a la col·laboració amb humans. Autors com Klein et al. (2004) i O'Neill et al. (2022) coincideixen a assenyalar que l'èxit del Human-AI Teaming no depèn només de la capacitat tecnològica, sinó de la seva integració amb els processos cognitius humans, garantint la preservació de la consciència situacional, el sentit d'agència i l'autoritat final del controlador.

2.4.2. Automatització i TBO en el context europeu

L'automatització en l'ATC ha evolucionat des de sistemes de suport a la decisió fins a entorns altament integrats, impulsats per la necessitat d'augmentar la capacitat, l'eficiència i la seguretat del sistema aeronàutic (European Union Aviation Safety Agency, 2023).

En aquest context, les Trajectory-Based Operations (TBO) constitueixen un dels principals paradigmes de transformació del sistema ATM. Aquest enfocament es basa en la gestió de trajectòries 4D, permetent una coordinació més precisa entre actors i una optimització global del flux de trànsit aeri (EUROCONTROL, n.d.).

La implementació del TBO implica un increment significatiu del nivell d'automatització, ja que requereix sistemes capaços de processar grans volums de dades, predir l'evolució del trànsit i generar solucions en temps real. En aquest marc, funcions tradicionalment atribuïdes al controlador, com la detecció de conflictes o la proposta de resolucions, són parcialment assumides per sistemes automatitzats (Parasuraman et al., 2000).

Diverses iniciatives europees, com els projectes ATC-TBO i JARVIS dins del programa SESAR, exemplifiquen aquesta evolució cap a entorns operatius altament automatitzats. Aquests projectes mostren el potencial de la integració tecnològica, però també posen de manifest els reptes associats als factors humans.

En particular, la literatura destaca riscos com la pèrdua de consciència situacional (Endsley, 1995), la reducció del control humà efectiu i l'impacte negatiu sobre el sentit d'agència (Berberian et al., 2012). Aquests riscos reforcen la necessitat de mantenir el controlador dins del bucle de decisió (*human-in-the-loop*) i d'assegurar un equilibri adequat entre automatització i control humà (Parasuraman et al., 2000).

En conjunt, l'estat de l'art reflecteix una transició cap a sistemes d'ATC cada vegada més automatitzats, en què el principal repte no és únicament tecnològic, sinó també humà, centrant-se en com integrar la intel·ligència artificial de manera que es preservin el control, la seguretat i el rendiment dels operadors.

3. El control del trànsit aeri: fases operatives

El sistema de control del trànsit aeri (*Air Traffic Control, ATC*) s'organitza en diferents unitats operatives segons la fase del vol i l'espai aeri gestionat. Aquesta divisió permet estructurar la gestió del trànsit de manera segura, eficient i escalable, assignant responsabilitats específiques i eines adaptades a les característiques de cada entorn operatiu.

Les tres unitats principals són el control de torre (TWR), el control d'aproximació (APP) i el control d'àrea (ACC). Cadascuna presenta diferències significatives pel que fa a la càrrega de treball, el grau d'incertesa, el tipus de decisions i el nivell d'automatització disponible.

3.1. Control d'àrea (ACC)

El control de ruta o de zona, conegut com a *Area Control Centre* (ACC), és responsable de la gestió del trànsit aeri durant la fase de creuer. L'espai gestionat abasta grans regions entre les àrees terminals dels aeroports, i inclou aeronaus que volen a gran altitud i a velocitats elevades.

La funció principal és garantir la separació segura entre aeronaus i gestionar el flux de trànsit a escala regional o nacional. A diferència de la torre i l'aproximació, el treball en ACC es basa més en la planificació estratègica i en la predicció de situacions futures que en la reacció immediata.

Els controladors utilitzen sistemes avançats de suport, com eines de detecció de conflictes, gestió de trajectòries i planificació del flux de trànsit. Aquests sistemes permeten anticipar possibles conflictes i proposar solucions amb antelació, reduint la necessitat d'intervencions tàctiques.

El nivell d'automatització en ACC és el més elevat dels tres entorns. L'ús intensiu de sistemes automatitzats transforma progressivament el rol del controlador, que passa d'una funció operativa directa a una funció més estratègica i de supervisió.

3.2. Control d'aproximació (APP)

El control d'aproximació (*Approach Control, APP*) gestiona el trànsit dins de l'espai aeri terminal (TMA), que envolta un o diversos aeroports. Aquesta unitat és responsable de les aeronaus en fase d'arribada i sortida, assegurant una transició ordenada entre el control de ruta i el control de torre.

Les tasques principals inclouen la seqüenciació d'aeronaus, l'assignació de rutes d'arribada i sortida i el manteniment de separacions segures en un entorn altament dinàmic. La variabilitat del trànsit, la diversitat de perfils de vol i la necessitat de coordinació constant fan que aquest entorn presenti una elevada complexitat operativa.

El treball es basa principalment en l'ús de radar i en sistemes de suport a la decisió, com els gestors d'arribades (AMAN) i de sortides (DMAN), que permeten optimitzar la seqüenciació del trànsit i reduir retards. Aquests sistemes introdueixen un nivell d'automatització superior al de la torre, però el controlador continua tenint un paper central en la validació i execució de les decisions.

Aquest entorn representa un punt intermedi pel que fa al nivell d'automatització i a la distribució de funcions entre humà i sistema. La interacció amb eines automatitzades és més freqüent, i això

el converteix en un escenari especialment rellevant per analitzar el Human-AI Teaming i els seus efectes sobre la presa de decisions.

3.3. Control de torre (TWR)

El control d'aeròdrom, o control de torre (*Tower Control*, TWR), és responsable de la gestió del trànsit aeri dins de l'aeroport i en el seu entorn immediat. El seu àmbit inclou les pistes, els carrers de rodatge i l'espai aeri proper a l'aeròdrom, **generalment fins a unes 5–10 NM (aproximadament 10-20 km) del centre de l'aeròdrom, dins del CTR (Control Zone)**.

Les funcions principals dels controladors de torre inclouen l'autorització d'enlairaments i aterratges, la coordinació dels moviments en superfície i la gestió del trànsit en fases crítiques del vol. Aquestes operacions requereixen una elevada precisió temporal i una resposta immediata davant qualsevol incidència.

El treball en torre es caracteritza per una forta dependència de l'observació visual directa, complementada per sistemes tecnològics com el radar de superfície o els sistemes avançats de guiatge i control de moviments en terra. La informació es processa en temps real i amb un alt nivell de pressió operativa.

El grau d'automatització en aquest entorn és relativament limitat. Els sistemes existents proporcionen suport en forma d'alertes, avisos o assistència a la decisió, però la responsabilitat principal recau en el controlador humà. Això implica un nivell elevat de control directe i, en conseqüència, un fort sentit d'agència.

3.4 Taula comparativa de les tres fases

Fase	**Horitzó temporal**	**Predictibilitat**	**LOA típic (Sheridan-Verplanck)**	**Rol del controlador**
ACC **(Àrea)**	Estratègic / llarg termini (minuts a desenes de minuts)	Alta (trajectòries planificades, poc canvi sobtat)	**Nivells 4–5** (sistema suggereix opcions o executa amb aprovació explícita)	Supervisor estratègic: planifica, anticipa, valida propostes del sistema
APP **(Aproximació)**	Tàctic / mig termini (segons a minuts)	Moderada (seqüenciació dinàmica, interaccions complexes)	**Nivell 4** en condicions nominals (DCT: suggereix) / **Nivells 5–6** puntuals en conflictes crítics (CORA: executa si l'humà no veta a temps)	Col·laborador actiu: valida seqüenciacions, resol conflictes locals
TWR **(Torre)**	Operacional / curt termini (segons, temps real)	Baixa (moviments en superfície, esdeveniments imprevists)	**Nivells 1–3** (sense automatització o només suport informatiu / alertes)	Operador directe: executa, decideix, manté agència plena

*Taula 2 Síntesi comparativa de les fases operatives (ACC, APP, TWR**).***

Elaboració pròpia a partir de la revisió de la literatura sobre instruments d'avaluació de la consciència situacional i la càrrega de treball (Endsley, 1995; Hart i Staveland, 1988).

3.5. Asimetria TBO per fase: ACC com a entorn central

La implementació de les Trajectory-Based Operations (TBO) no es produeix de manera homogènia en totes les fases del control del trànsit aeri. Les diferències en les característiques operatives de cada entorn , nivell de predictibilitat, càrrega de treball, necessitat de resposta immediata i tipus de decisions— generen una asimetria clara en el grau d'aplicació del paradigma TBO i en el nivell d'automatització associat.

El control d'àrea (ACC) es configura com l'entorn central per al desplegament del TBO. La gestió del trànsit en fase de creuer es caracteritza per una major estabilitat i per una menor variabilitat en comparació amb altres fases del vol, fet que facilita la planificació de trajectòries 4D amb un horitzó temporal més ampli. Aquesta capacitat de predicció permet integrar sistemes avançats d'automatització que donen suport a la generació, optimització i monitorització de trajectòries.

En aquest entorn, els sistemes automatitzats poden assumir funcions cada vegada més complexes, com la detecció anticipada de conflictes o la proposta de resolucions òptimes, reduint la necessitat d'intervencions tàctiques immediates. Com a conseqüència, el rol del controlador evoluciona cap a funcions de supervisió i validació, amb un major pes de la planificació estratègica. Aquesta transformació està directament vinculada a l'augment dels nivells d'automatització i planteja reptes en termes de manteniment del control humà i del sentit d'agència.

En el control d'aproximació (APP), la implementació del TBO és més limitada i es produeix de manera parcial. L'entorn terminal presenta una elevada complexitat operativa, amb múltiples aeronaus en fases crítiques del vol i amb requeriments de separació estrictes en espais reduïts. La necessitat d'adaptació contínua a canvis en les condicions operatives, com variacions en el trànsit, meteorologia o configuracions de pista. Això dificulta l'aplicació completa de trajectòries planificades amb antelació.

Tot i aquestes limitacions, es poden observar elements del paradigma TBO en eines com els gestors d'arribades i sortides, que permeten una certa optimització del flux de trànsit. No obstant això, el controlador continua tenint un paper central en la presa de decisions tàctiques, i la interacció amb els sistemes automatitzats requereix un equilibri constant entre confiança i supervisió activa.

El control de torre (TWR) representa l'entorn amb menor grau d'aplicació del TBO. Les operacions en aquesta fase es caracteritzen per una elevada dinàmica, una gran variabilitat i una forta dependència de factors immediats, com la visibilitat, el trànsit en superfície o les incidències operatives. Aquestes condicions limiten la capacitat de planificació a mitjà termini i redueixen la utilitat de trajectòries predefinides.

En conseqüència, l'automatització en torre es manté principalment com a suport a la presa de decisions, mitjançant sistemes d'alerta o assistència, mentre que el controlador conserva un alt grau de control directe sobre les operacions. Això implica un nivell elevat d'implicació i un fort sentit d'agència, però també una major càrrega cognitiva i responsabilitat operativa.

Aquesta asimetria en la implementació del TBO té implicacions directes per al Human-AI Teaming. Les diferències en el nivell d'automatització i en la distribució de funcions entre humà i sistema fan que el control humà (*human oversight*) i el sentit d'agència variïn significativament segons la fase operativa. En entorns com l'ACC, l'augment de l'automatització pot comportar riscos associats a la pèrdua de consciència situacional o a la dependència excessiva del sistema, mentre

que en TWR el repte principal es relaciona amb la gestió de la càrrega de treball i la necessitat de suport eficaç.

L'anàlisi d'aquesta asimetria resulta essencial per comprendre els reptes associats a la implementació del TBO i per dissenyar sistemes que permetin una integració equilibrada de la intel·ligència artificial, garantint tant l'eficiència operativa com el manteniment del control humà en totes les fases del vol.

4. Factors humans en la presa de decisions

Els factors humans constitueixen un element fonamental en la presa de decisions en entorns de control del trànsit aeri (ATC). Aquests factors varien de manera significativa segons la fase operativa : area, aproximació i torre, ja que cada entorn implica diferents nivells d'exigència cognitiva, fisiològica i psicològica. La comprensió d'aquestes diferències és clau per al disseny de sistemes d'assistència i per a la integració segura de tecnologies d'intel·ligència artificial.

4.1. Factors cognitius, fisiològics i psicològics per fase

Els factors cognitius, fisiològics i psicològics interactuen de manera complexa i condicionen el rendiment del controlador en cada fase.

Des del punt de vista cognitiu , el control d'àrea es caracteritza per processos d'anticipació, planificació i manteniment de models mentals a llarg termini. La càrrega cognitiva és sostinguda però relativament estable, i es basa en la capacitat de projecció futura del trànsit.

En el control d'aproximació, la càrrega cognitiva augmenta de manera significativa, ja que el controlador ha de gestionar una elevada densitat d'aeronaus en un entorn dinàmic. Això requereix capacitat de seqüenciació, priorització i atenció dividida, sovint sota pressió temporal.

En el control de torre, el processament cognitiu es centra en la percepció immediata i la resposta ràpida. La presa de decisions és altament reactiva i basada en informació en temps real, amb una elevada exigència d'integració multisensorial.

Aquest fenomen, conegut també com a attentional tunneling, ha estat estudiat de manera específica en aviació (Wickens, 2005; Dehais et al., 2012), que es produeix quan l'estrès o la sobrecàrrega cognitiva redueixen el camp atencional del controlador, focalitzant-lo en estímuls concrets i limitant la percepció d'informació perifèrica. Aquest efecte pot comprometre la consciència situacional i augmentar la probabilitat d'errors, especialment en fases com l'aproximació i la torre.

Els factors fisiològics també varien segons la fase. En el control d'àrea, predomina la fatiga per monotonia i sedentarisme, que pot provocar una disminució progressiva de l'alerta. En aproximació, la fatiga es deriva de la intensitat i de les càrregues de treball elevades, amb pics d'activació que poden provocar esgotament cognitiu. En torre, la fatiga està associada a la sobrecàrrega sensorial i a la necessitat de mantenir una vigilància constant.

Els nivells d'estrès segueixen una distribució similar. En el control d'àrea, l'estrès acostuma a ser moderat o baix, però sostingut en el temps. En aproximació, l'estrès és elevat i variable, amb moments crítics de màxima demanda. En torre, l'estrès és elevat i immediat, ja que les decisions tenen conseqüències directes i en temps real.

Des del punt de vista psicològic, factors com l'atenció, la motivació i la percepció del control són determinants. L'estrès elevat pot provocar una reducció del camp atencional, augmentar la probabilitat d'errors i reduir la flexibilitat cognitiva. En aquest context, poden aparèixer biaixos com la fixació atencional o la dependència excessiva de determinats indicadors, afectant negativament la qualitat de la presa de decisions.

4.2. Implicacions per a l'oversight i el sentit d'agència per fase

L'*oversight* fa referència a la capacitat del controlador per supervisar, comprendre i intervenir en el funcionament del sistema, mentre que el sentit d'agència es relaciona amb la percepció de control i autoria sobre les decisions operatives. L'augment dels nivells d'automatització transforma ambdós conceptes, modificant el rol del controlador i la seva implicació cognitiva en la presa de decisions.

A mesura que augmenta l'automatització, el controlador tendeix a passar d'un rol actiu en la resolució de problemes a un rol més supervisori. Aquest canvi pot comportar una reducció de la implicació directa en la presa de decisions, fet que pot afectar tant la seva consciència situacional com el seu sentit d'agència.

En el control d'àrea (ACC)**,** caracteritzat per una major anticipació i planificació del trànsit, l'increment de l'automatització pot afavorir una reducció de la càrrega de treball associada al monitoratge continu. No obstant això, aquest desplaçament cap a un rol supervisori pot comportar una disminució de la capacitat d'anticipació activa, ja que el controlador pot confiar excessivament en la informació generada pel sistema. Això pot afectar negativament l'oversight si es produeix una desconnexió progressiva del procés cognitiu de construcció del model mental del trànsit.

En el control d'aproximació (APP), on la càrrega cognitiva i la pressió temporal són més elevades, l'automatització pot contribuir a reduir l'esforç necessari per gestionar múltiples aeronaus en un espai reduït. Tanmateix, aquesta reducció de la càrrega pot anar acompanyada d'una menor implicació en la presa de decisions, especialment si el controlador adopta un rol més passiu. En aquest context, el repte principal és mantenir un nivell adequat d'activació cognitiva que permeti preservar tant la capacitat de supervisió com el sentit d'agència en situacions dinàmiques.

En el control de torre (TWR), on la presa de decisions es basa en gran mesura en la percepció directa i en la immediatesa de l'entorn, l'impacte de l'automatització sobre l'oversight i el sentit d'agència és diferent. Tot i que l'automatització pot donar suport a la detecció de situacions de risc, el controlador continua tenint un paper central en la interpretació de la informació i en la presa de decisions en temps real. En aquest cas, el sentit d'agència tendeix a mantenir-se més elevat, ja que el controlador percep un control més directe sobre les accions.

En conjunt, l'augment dels nivells d'automatització genera una tensió entre eficiència operativa i implicació humana. D'una banda, pot reduir la càrrega de treball i millorar la gestió del trànsit; de l'altra, pot disminuir el nivell d'implicació cognitiva, afectant la capacitat de supervisió i el sentit d'agència. Aquest equilibri és especialment crític en entorns de seguretat, on la pèrdua d'oversight pot tenir conseqüències significatives.

Per aquest motiu, resulta essencial considerar el paper del controlador com a agent actiu dins del sistema, assegurant que, fins i tot en contextos amb alts nivells d'automatització, es mantingui la seva capacitat de comprensió, intervenció i presa de decisions.

4.3. Instruments de mesura dels factors humans

Els instruments de mesura utilitzats en l'avaluació dels factors humans en el control del trànsit aeri permeten quantificar dimensions clau com la consciència situacional, la càrrega de treball i el sentit d'agència. Aquests indicadors resulten especialment rellevants en entorns operatius complexos i dinàmics, així com en contextos amb presència creixent de sistemes automatitzats, ja que permeten analitzar l'impacte d'aquestes tecnologies sobre el rendiment humà i la seguretat operacional.

4.3.1 Consciència situacional: SAGAT i SART

Un dels instruments més utilitzats per avaluar la consciència situacional és el **Situation Awareness Global Assessment Technique (SAGAT)**, desenvolupat per Endsley (1995). Aquest mètode consisteix a interrompre la tasca en moments específics i formular preguntes a l'operador sobre l'estat del sistema en aquell instant. Les preguntes es dissenyen per avaluar els tres nivells de la consciència situacional: percepció dels elements de l'entorn, comprensió del seu significat i projecció del seu estat futur. En el context del control del trànsit aeri, el SAGAT permet analitzar fins a quin punt els controladors mantenen una representació mental adequada del sistema, així com identificar possibles deterioraments associats a situacions de sobrecàrrega cognitiva o a l'ús intensiu d'automatització.

Una alternativa complementària al SAGAT és el **Situation Awareness Rating Technique (SART)**, desenvolupat per Taylor (1990). A diferència del SAGAT, que requereix aturar la tasca per formular preguntes objectives, el SART és una eina subjectiva basada en l'autoavaluació de l'operador mitjançant una escala multidimensional. El SART mesura la consciència situacional a través de deu dimensions agrupades en tres components principals: la demanda atencional (el grau d'inversió cognitiva requerida per la tasca), la provisió d'informació (la quantitat i qualitat de la informació disponible) i la comprensió de la situació (la capacitat d'integrar i projectar la informació). L'operador puntua cada dimensió en una escala (habitualment de 7 punts), i la combinació d'aquestes puntuacions permet obtenir una valoració global de la consciència situacional percebuda.

El SART presenta avantatges pràctics respecte al SAGAT, ja que no requereix interrompre l'operador enmig de la tasca, la qual cosa el fa especialment adequat per a entorns operatius d'alt risc com el control del trànsit aeri, on les interrupcions poden comprometre la seguretat. A més, el SART captura la percepció subjectiva de l'operador sobre la seva pròpia consciència situacional, un aspecte que complementa les mesures objectives del SAGAT. En el context d'aquest treball, ambdós instruments són rellevants: el SAGAT permetria avaluar objectivament l'efecte de diferents nivells d'automatització (LOA) sobre la precisió de la representació mental; el SART permetria capturar com percep el controlador la seva pròpia consciència situacional en entorns amb presència de sistemes com JARVIS.

4.3.2 Càrrega de treball: NASA-TLX

Pel que fa a la càrrega de treball, l'instrument més estès és el **NASA Task Load Index (NASA-TLX)**, desenvolupat per Hart i Staveland (1988). Es tracta d'una eina subjectiva que avalua la càrrega de treball percebuda a partir de sis dimensions: demanda mental, demanda física, demanda temporal, rendiment, esforç i nivell de frustració. Aquest instrument permet obtenir tant una valoració global com una anàlisi detallada dels factors que contribueixen a la càrrega de treball. En entorns ATC, el NASA-TLX s'utilitza per comparar la intensitat del treball entre diferents fases operatives i per analitzar com la introducció de sistemes automatitzats pot influir en la càrrega cognitiva dels controladors.

4.3.3 Sentit d'agència: escales d'agència

En relació amb el sentit d'agència, les escales d'agència constitueixen un conjunt d'instruments orientats a mesurar la percepció de control i autoria sobre les accions realitzades. Aquest tipus d'escales és especialment rellevant en contextos amb un alt grau d'automatització, en què part de les decisions poden ser assistides o delegades en sistemes intel·ligents. En aquest àmbit, els treballs de Berberian et al. (2012) destaquen per desenvolupar mesures específiques del sentit d'agència en entorns operatius com el control del trànsit aeri. Aquests autors mostren que la delegació de funcions en sistemes automatitzats pot comportar una reducció significativa de la percepció de control per part de l'operador, amb efectes directes sobre la seva implicació i sobre la qualitat de la supervisió exercida.

En aquest sentit, la mesura del sentit d'agència permet avaluar fins a quin punt el controlador percep que continua sent responsable de les decisions, malgrat la presència d'automatització. Un nivell elevat d'agència s'associa amb una major implicació, una millor comprensió del sistema i una capacitat més gran per gestionar situacions inesperades. Per contra, una reducció del sentit d'agència pot conduir a una dependència excessiva del sistema, amb possibles implicacions negatives sobre el rendiment i la seguretat operativa.

4.3.4 Integració multidimensional

La combinació d'aquests instruments proporciona una aproximació multidimensional a l'estudi del rendiment humà en entorns ATC. Mentre que el SAGAT i el SART permeten avaluar la consciència situacional (des d'una perspectiva objectiva i subjectiva, respectivament), el NASA-TLX mesura la càrrega de treball percebuda i les escales d'agència analitzen la relació entre l'operador i el sistema automatitzat. Aquesta integració d'indicadors és essencial per comprendre de manera global com els sistemes d'automatització afecten el comportament humà.

L'ús d'aquests instruments no només permet analitzar el rendiment individual del controlador, sinó també entendre com es configura la interacció entre l'operador i el sistema en entorns altament automatitzats. Aquesta comprensió resulta clau per garantir que la introducció de noves tecnologies contribueixi a millorar l'eficiència i la seguretat del sistema sense comprometre els factors humans crítics.

Instrument	Què mesura	Mètode / Procediment	Avantatges	Limitacions
SAGAT	Consciència situacional (percepció, comprensió, projecció)	Interrupció de la tasca i preguntes específiques sobre l'estat del sistema	Mesura directa de SA; útil per comparar fases i efectes d'automatització	Interromp la tasca; pot interferir amb la càrrega de treball real
NASA-TLX	Càrrega de treball percebuda	Auto-avaluació subjectiva en 6 dimensions (mental, físic, temporal, rendiment, esforç, frustració)	Estàndard àmpliament acceptat; flexible i aplicable a molts contextos	Subjectiu; pot variar segons interpretació individual
Escales d'agència	Sentit d'agència / control percebut	Auto-report o qüestionari específic sobre autoria de decisions	Permet avaluar l'impacte de l'automatització en la percepció de control	Menys estandarditzat que NASA-TLX o SAGAT; depèn de l'escala utilitzada
SART (Situation Awareness Rating Technique)	Consciència situacional percebuda	Autoavaluació subjectiva durant o després de la tasca basada en dimensions com atenció, comprensió i demanda	Menys intrusiu que SAGAT; fàcil d'aplicar en entorns operatius	Mesura subjectiva; pot no captar tota la dimensió de SA comparat amb SAGAT

Taula 3. Instruments de mesura de la consciència situacional, càrrega de treball i sentit d'agència en el control del trànsit aeri

Elaboració pròpia a partir de la revisió de la literatura sobre instruments d'avaluació de la consciència situacional i la càrrega de treball (Endsley, 1995; Hart i Staveland, 1988).

4.4 Riscos cognitius de l'automatització

L'automatització, tot i que dissenyada per millorar l'eficiència i reduir l'error humà, introdueix nous riscos cognitius que poden comprometre el rendiment de l'operador en situacions crítiques. Aquests riscos no són independents, sinó que interactuen entre ells i s'intensifiquen en entorns d'automatització avançada com el control d'àrea (ACC) en el marc de les operacions basades en trajectòria (TBO). A continuació es descriuen quatre dels riscos més rellevants documentats per la literatura.

4.4.1. Automation bias (biaix d'automatització)

L'*automation bias* és la tendència dels operadors humans a confiar en el judici d'un sistema automatitzat com a substitut del seu propi processament cognitiu, especialment quan el sistema ha demostrat ser fiable en el passat (Mosier & Skitka, 1996). Aquest biaix es manifesta de dues maneres principals: l'error d'omissió, quan l'operador no detecta una situació que el sistema no

ha senyalat; i l'error de comissió, quan l'operador segueix una recomanació errònia del sistema tot i disposar d'informació contradictòria.

En el context del control de trànsit aeri, l'automation bias pot tenir conseqüències greus. Per exemple, en un entorn ACC amb eines de detecció de conflictes (com les que incorpora JARVIS), el controlador pot deixar de verificar activament possibles conflictes en aquelles trajectòries que el sistema no ha marcat com a problemàtiques (error d'omissió). Alternativament, si el sistema suggereix una solució subòptima (per exemple, un canvi d'altitud que resol un conflicte però en crea un altre de latent), el controlador pot acceptar-la sense qüestionar-la per inèrcia o per excés de confiança.

L'automation bias és especialment rellevant en sistemes que operen a nivell 4 de Sheridan-Verplanck (sistema suggereix, humà aprova), com el DCT Assistant de JARVIS. La presència d'una recomanació explícita pot ancorar el judici del controlador i reduir la probabilitat que generi solucions alternatives, fins i tot quan la recomanació és clarament millorable.

4.4.2. Out-of-the-loop problem (problema d'estar fora del bucle)

El *out-of-the-loop problem* descriu la degradació del rendiment humà quan l'operador és relegat a un rol de supervisor passiu d'un sistema automatitzat, en lloc de mantenir-se actiu dins del bucle de control (Endsley & Kiris, 1995). Quan un operador no intervé directament en una tasca durant un període prolongat, es produeixen tres efectes negatius: pèrdua de consciència situacional, deteriorament de la capacitat de detectar anomalies, i dificultat per recuperar el control manual en situacions d'emergència.

En el control d'àrea (ACC), on els sistemes automatitzats gestionen grans volums de trànsit en fase de creuer amb alta predictibilitat, el controlador pot passar molta estona sense intervencions actives. L'operador observa pantalles on les trajectòries es desenvolupen segons el previst, però el seu rol es limita a confirmar ocasionalment propostes del sistema. Aquesta posició "fora del bucle" fa que, quan es produeix una anomalia (per exemple, una desviació inesperada d'una aeronau o una pèrdua de comunicació), el controlador trigui més a detectar-la i, un cop detectada, tingui dificultats per recuperar el control manual de la situació.

Aquest problema és especialment crític en el pas cap a operacions TBO, on la planificació estratègica de trajectòries redueix encara més la freqüència d'intervencions tàctiques. Com més temps passa el controlador sense actuar directament, més gran és el cost cognitiu de tornar a integrar-se en el bucle de control en el moment que es requereix la seva intervenció.

4.4.3. Overtrust / undertrust (excés i defecte de confiança)

La confiança de l'operador en un sistema automatitzat ha de ser calibrat: ni massa alta ni massa baixa respecte a les capacitats reals del sistema. L'*overtrust* (excés de confiança) es produeix quan l'operador atribueix al sistema unes capacitats superiors a les que realment té, la qual cosa deriva en una supervisió negligent i una acceptació acrítica de les seves sortides (Parasuraman & Riley, 1997). Per contra, l'*undertrust* (defecte de confiança) es produeix quan l'operador no confia prou en el sistema i tendeix a sobreverificar o ignorar les seves recomanacions, anul·lant els beneficis de l'automatització.

L'ús reiterat i continuat d'un sistema fiable pot generar un canvi gradual cap a l'overtrust. En el context de JARVIS, si el DCT Assistant ofereix solucions correctes durant mesos d'operació, el controlador pot arribar a confiar excessivament en les seves recomanacions i reduir la seva pròpia anàlisi independent. Això és perillós perquè, encara que el sistema sigui estadísticament fiable,

les situacions on falla solen ser precisament les més complexes o inesperades, on més es necessita el criteri humà.

L'undertrust, per la seva banda, pot sorgir després d'una experiència negativa (per exemple, després d'una falsa alarma o una recomanació errònia) o en entorns on el controlador no ha rebut una formació adequada sobre les limitacions del sistema. En aquests casos, el controlador tendeix a ignorar les propostes del sistema i torna a fer les tasques manualment, perdent els beneficis d'eficiència que l'automatització havia de proporcionar.

4.4.4. Deskilling (pèrdua d'habilitats)

El *deskilling* o pèrdua d'habilitats és un dels riscos més subtils però profunds de l'automatització avançada, descrit de manera canònica per Bainbridge (1983) en el seu article *Ironies of Automation*. Bainbridge assenyala una paradoxa fonamental: els sistemes automatitzats deleguen en l'operador humà precisament les tasques més difícils —aquelles que el sistema no pot gestionar per complexitat, ambigüitat o imprevisibilitat— mentre que, simultàniament, eliminen l'exposició rutinària a situacions que permetrien mantenir i perfeccionar les habilitats necessàries per a aquestes mateixes tasques.

En el context del control de trànsit aeri, aquesta ironia es manifesta de manera especialment crítica en entorns d'alt automatització com el control d'àrea (ACC). En un escenari TBO, el sistema planifica i proposa trajectòries òptimes molt per endavant, i el controlador adopta un rol principalment de supervisió estratègica. Durant llargues estones operatives amb alta predictibilitat i baixa variabilitat (per exemple, trànsit de creuer sense incidències), el controlador pot passar minuts o fins i tot hores sense intervenir activament sobre una trajectòria. Aquesta manca d'intervenció pràctica comporta, gradualment, la pèrdua de la capacitat de gestió tàctica directa: la destresa per calcular mentalment separacions, l'agilitat per prendre decisions ràpides en condicions de temps real, i la confiança en el judici propi per resoldre situacions no previstes.

La conseqüència, és que quan el sistema automatitzat es troba davant d'una situació que no pot gestionar una avaria inesperada, una pèrdua de comunicació, una desviació meteorològica sobtada o un conflicte complex. L'operador humà ha de recuperar el control de manera immediata. Però, irònicament, aquest controlador ja no disposa de les habilitats pràctiques que es requereixen per fer-ho, perquè l'automatització les ha anat atrofiades amb el temps. El resultat és un operador que es converteix en un "supervisor passiu" fins que el sistema falla, moment en què se li demana que actuï com un "intervenedor expert" en una situació crítica per a la qual no s'ha entrenat ni practicat.

En el marc integrador d'aquest treball (fase × LOA × factors HF), el *deskilling* afecta directament dues dimensions clau:

- L'**oversight** (supervisió): el controlador pot tenir la il·lusió d'estar supervisant adequadament, però la manca d'intervenció activa redueix la seva capacitat real de detectar anomalies subtils.
- L'**agency** (agència): encara que formalment el controlador retingui l'autoritat final **(com a LOA 4 de Sheridan-Verplanck),** l'erosió de les habilitats pràctiques pot convertir aquesta agència formal en una agència realment buida, sense competència efectiva per exercir-la.

Aquest risc és especialment rellevant en sistemes com JARVIS en la seva funció DCT Assistant **(selecció de resposta a LOA 4).** Si el sistema suggereix solucions que el controlador valida rutinàriament sense qüestionar-les, el controlador pot perdre progressivament la capacitat de

generar solucions alternatives per si mateix. La ironia final és que com més fiable sigui el sistema (i per tant menys hagi d'intervenir l'humà), més gran serà el *deskilling* i, en conseqüència, més vulnerable serà el sistema global quan finalment es requereixi la intervenció humana.

5. Projectes SESAR: ATC-TBO i JARVIS

El procés de modernització del sistema de gestió del trànsit aeri a nivell global està estretament vinculat a la incorporació de tecnologies digitals avançades i a un canvi de paradigma en la manera de gestionar el trànsit. En aquest context, el programa europeu SESAR (Single European Sky ATM Research) constitueix el principal marc d'innovació, amb l'objectiu de millorar la capacitat, l'eficiència i la seguretat del sistema ATM mitjançant la integració de nous conceptes operatius i tecnologies emergents.

Dins d'aquest marc, les Operacions Basades en Trajectòries (TBO) i els sistemes d'assistència intel·ligent com JARVIS representen dos pilars fonamentals en l'evolució del control del trànsit aeri. El primer introdueix una nova manera de gestionar el trànsit basada en la predicció i optimització de trajectòries, mentre que el segon se centra en la millora de la interacció entre l'humà i el sistema, mitjançant assistència cognitiva avançada.

Ambdós conceptes no només impliquen una transformació tecnològica, sinó també una redefinició del rol del controlador, que passa d'un model predominantment reactiu a un model més estratègic, supervisiu i recolzat per sistemes intel·ligents. Aquesta evolució planteja nous reptes en termes de factors humans, especialment en relació amb el manteniment de la consciència situacional, l'oversight i el sentit d'agència.

5.1. ATC-TBO: concepte, components tecnològics i rol del controlador

5.1.1. Definició i model basat en trajectories 4D

Les Operacions Basades en Trajectòries (Trajectory Based Operations, TBO) constitueixen un dels pilars fonamentals en l'evolució del sistema ATM. Aquest concepte es basa en la definició, gestió i execució de trajectòries de vol en quatre dimensions —latitud, longitud, altitud i temps—, la qual cosa permet descriure amb precisió no només la posició de l'aeronau, sinó també la seva evolució temporal al llarg del vol.

En aquest model, cada aeronau disposa d'una trajectòria planificada que és compartida i coordinada entre tots els actors implicats, incloent controladors, pilots i sistemes de gestió de flux. Aquesta trajectòria incorpora restriccions temporals específiques, com ara els punts de temps controlat (CTA), que permeten sincronitzar les operacions i reduir la incertesa associada a la predicció del trànsit.

A diferència del model tradicional, basat en instruccions tàctiques successives i sovint reactives, el TBO introdueix un enfocament clarament predictiu, col·laboratiu i basat en dades. Això permet anticipar conflictes amb major antelació, optimitzar rutes i millorar l'eficiència global del sistema, reduint tant el consum de combustible com les emissions.

5.1.2. Aplicació diferencial per fase (ACC / APP / TWR)

La implementació del TBO presenta un grau d'aplicació diferent segons la fase del control del trànsit aeri, en funció de l'horitzó temporal i de la variabilitat operativa de cada entorn.

- **En el control d'àrea (ACC)**, el TBO s'aplica de manera més extensa, ja que es tracta d'un entorn amb una major estabilitat i un horitzó temporal ampli. Això permet al controlador treballar amb trajectòries predites amb un alt nivell de precisió, centrant-se en la planificació estratègica i en la gestió eficient de l'espai aeri. En aquest context, es redueix la necessitat d'intervencions tàctiques contínues, afavorint un model de control més proactiu.
- **En el control d'aproximació (APP)** ,el grau d'aplicació és més limitat a causa de la major densitat de trànsit i de la variabilitat associada a factors com la meteorologia o les operacions aeroportuàries. Tot i això, el TBO pot aportar valor en la gestió dels fluxos d'arribada, especialment en la seqüenciació i en la coordinació amb el control d'àrea. En aquest sentit, **existeixen projectes específics que apliquen principis TBO a l'espai aeri terminal (TMA), com ara l'Extended AMAN (Arrival Manager) que amplia l'horitzó de planificació d'arribades més enllà dels límits convencionals, o el CTA-based metering (Controlled Time of Arrival), que utilitza finestres temporals estrictes per regular el flux d'arribades a la TMA.** En aquest cas, el sistema actua com a suport a la presa de decisions, però no substitueix la necessitat d'intervencions tàctiques.
- **En el control de torre (TWR)**, l'aplicació del TBO és residual, ja que les operacions es desenvolupen en un entorn immediat i altament dinàmic, basat en la percepció directa. No obstant això, la informació generada pel TBO pot contribuir a una millor planificació de les operacions en superfície i a una coordinació més eficient amb les fases anteriors.

5.1.3. Transformació del rol del controlador en TBO

La implementació del TBO implica una transformació profunda del rol del controlador aeri, que passa d'un model predominantment tàctic a un model més estratègic i supervisiu. En lloc de proporcionar instruccions contínues, el controlador passa a monitoritzar trajectòries predefinides i a intervenir principalment en situacions excepcionals o no previstes.

Aquest canvi comporta una redistribució de la càrrega de treball, amb una reducció de les tasques repetitives però un augment de les funcions de supervisió i validació. Això exigeix noves competències, com ara la capacitat d'interpretar sistemes complexos, comprendre models predictius i gestionar la interacció amb sistemes automatitzats.

Tanmateix, aquest nou rol també presenta riscos, com ara la possible pèrdua de consciència situacional o la disminució de la implicació activa, especialment en situacions de baixa càrrega. El fenomen d'**out-of-the-loop** esdevé especialment rellevant en aquest context, ja que pot afectar la capacitat del controlador per intervenir de manera efectiva en situacions crítiques.

Per aquest motiu, és fonamental que els sistemes TBO siguin dissenyats amb un enfocament centrat en el factor humà, garantint la transparència del sistema, la disponibilitat d'informació rellevant i la possibilitat d'intervenció activa en tot moment.

5.2. JARVIS: arquitectura real i components

5.2.1. Nom oficial i origen del projecte (SESAR JU)

JARVIS (Just A Rather Very Intelligent System) és un concepte avançat desenvolupat dins del programa SESAR Joint Undertaking, orientat a la creació d'un ecosistema d'assistència intel·ligent capaç de donar suport continu al controlador aeri en entorns d'alta complexitat operativa. Aquest projecte s'inscriu en les línies estratègiques de digitalització de l'ATM europeu, particularment en el desenvolupament de sistemes de suport a la decisió basats en intel·ligència artificial i en la millora de les interfícies humà-màquina.

El seu origen respon a una problemàtica creixent: l'increment exponencial del volum de dades disponibles en temps real (trànsit, meteorologia, restriccions, capacitat aeroportuària, etc.) i la dificultat dels operadors humans per processar aquesta informació de manera eficient dins dels marges temporals requerits. En aquest context, JARVIS es planteja com una solució que no substitueix el controlador, sinó que actua com una extensió de les seves capacitats cognitives.

A nivell conceptual, JARVIS es basa en la idea de cognitive assistance, és a dir, assistència intel·ligent capaç d'interpretar el context operatiu, anticipar necessitats i proporcionar informació rellevant de manera proactiva. Això implica una evolució respecte als sistemes tradicionals, que es limiten a mostrar dades, cap a sistemes capaços de filtrar, prioritzar i suggerir accions.

5.2.2. Els cinc assistents digitals: ATC, Airborne, Airport, Safety, Operational

L'arquitectura de JARVIS es construeix sobre una estructura modular composta per diversos assistents digitals especialitzats, cadascun dels quals aborda un domini operatiu específic. Aquesta modularitat permet una elevada escalabilitat i adaptabilitat del sistema.

L'ATC Assistant constitueix el nucli de la interacció amb el controlador. Proporciona suport en temps real en la gestió del trànsit, integrant informació de múltiples fonts i oferint recomanacions contextualitzades. Aquest assistent pot suggerir resolucions de conflictes, optimitzacions de trajectòria o ajustos en la seqüència de vols, contribuint a reduir la càrrega cognitiva en moments crítics.

L'Airborne Assistant opera a nivell de l'aeronau i està orientat a la presa de decisions per part del pilot. Aquest component facilita la coordinació entre aire i terra, assegurant la coherència entre les trajectòries planificades i les executades.

L'Airport Assistant se centra en la gestió de les operacions en superfície, incloent el rodatge, les assignacions de pista i la coordinació entre diferents serveis aeroportuaris. La seva funció és optimitzar el flux de trànsit a terra i reduir congestions.

El Safety Assistant té un paper crític en la detecció de riscos. Mitjançant l'anàlisi contínua de dades, és capaç d'identificar situacions potencialment perilloses abans que es materialitzin, generant alertes i suggerint accions preventives.

Finalment, l'Operational Assistant proporciona una visió global del sistema, integrant informació a nivell estratègic i facilitant la presa de decisions que afecten múltiples sectors o fases del vol.

Aquests assistents no operen de manera aïllada, sinó que comparteixen informació i construeixen una representació comuna de la situació operativa, fet que permet una assistència coherent i integrada.

5.2.3. El DCT assistant: proposta de rutes i preservació de l'agència

El DCT Assistant és un dels components més representatius de la filosofia de JARVIS, ja que exemplifica la combinació entre optimització algorítmica i control humà.

Aquest assistent analitza de manera contínua l'estat del sistema, incloent el trànsit existent, les condicions meteorològiques, les restriccions d'espai aeri i els objectius d'eficiència, per identificar oportunitats de millora en les trajectòries de les aeronaus. A partir d'aquesta anàlisi, genera propostes de rutes més directes o eficients, que poden reduir el temps de vol, el consum de combustible i les emissions.

Un aspecte clau és la manera com aquestes propostes són presentades al controlador. En lloc d'imposar una solució, el sistema ofereix opcions justificades, sovint acompanyades d'informació explicativa sobre els criteris utilitzats. Això permet al controlador comprendre el raonament del sistema i prendre una decisió informada.

Des del punt de vista dels nivells d'automatització (LOA), el DCT Assistant opera de manera fixa en un nivell 4 de l'escala de Sheridan i Verplanck (1978): el sistema suggereix una única opció, per exemple, una reassignació de ruta o una resolució de conflicto, però no l'executa. L'execució de qualsevol canvi en la trajectòria requereix l'aprovació explícita del controlador abans de ser enviada a l'aeronau.

Aquesta aproximació és fonamental per preservar el sentit d'agència, ja que evita que el controlador es converteixi en un mer supervisor passiu. En canvi, es manté com a actor central en la presa de decisions, amb la capacitat de validar, modificar o rebutjar les recomanacions del sistema. Aquesta configuració LOA 4, combinada amb la funció de selecció de resposta , redueix la càrrega cognitiva de generació d'alternatives però manté plenament la capacitat de supervisió activa (oversight) per part del controlador.

És important distingir el DCT Assistant de l'assistent CORA (Conflict Resolution Assistant), que, davant situacions de conflicte imminent, pot operar en nivells LOA 5 o fins i tot LOA 6 (execució automàtica si el controlador no exerceix el seu dret de veto dins d'una finestra temporal molt breu), prioritzant la seguretat sobre el control humà immediat. Aquesta distinció es manté coherentment al llarg del treball (vegeu Taula 2, Taula 4 i secció 5.2.4).

5.2.4. El CORA: resolució de conflictes i distinció respecte al DCT

El CORA (Conflict Resolution Assistant) és un **concepte operacional per a la resolució de conflictes aeris desenvolupat originalment en projectes previs del programa SESAR (com ara PJ.10 i els seus antecessors). JARVIS integra funcionalitats d'aquest concepte** com a component orientat a la seguretat dins de la seva arquitectura. La funció principal és detectar conflictes potencials entre aeronaus i proposar solucions que garanteixin el manteniment de la separació mínima requerida.

A diferència del DCT Assistant, que opera en un context d'optimització en condicions normals, el CORA actua en situacions en què existeix un risc imminent o potencial de conflicte. El sistema

utilitza models predictius per anticipar aquestes situacions amb antelació suficient, permetent una resolució més suau i eficient.

Les solucions proposades poden incloure canvis d'altitud, modificacions de trajectòria o ajustos de velocitat, i són presentades al controlador amb informació sobre les seves implicacions operatives. Igual que en el cas del DCT, el controlador manté la decisió final, assegurant que el sistema actua com a suport i no com a substitut.

Des del punt de vista dels nivells d'automatització (LOA), el CORA presenta una diferència fonamental respecte al DCT. Mentre que el DCT opera fixament en un **LOA 4**, el CORA pot arribar a nivells **LOA 5** o fins i tot **LOA 6** de l'escala de Sheridan i Verplanck (1978) davant situacions de conflicte imminent. En concret:

- En situacions de **conflicte potencial** amb marge temporal suficient, el CORA opera en **LOA 5**: el sistema suggereix una resolució i només l'executa si el controlador ho aprova explícitament.
- En situacions de **conflicte imminent** amb marge temporal crític, el CORA pot operar en **LOA 6**: el sistema executa automàticament la resolució, però el controlador pot vetar l'acció abans de l'execució si disposa de temps suficient per fer-ho.

Aquesta capacitat d'actuar en **LOA 5–6** respon a una priorització de la seguretat per sobre del control humà immediat. En situacions on el temps de reacció humà podria ser insuficient per garantir la separació mínima, el sistema assumeix temporalment un grau d'autonomia més elevat. No obstant això, el controlador manté la capacitat de veto **(en LOA 5 i 6)** i rep informació de les accions executades, la qual cosa preserva parcialment l'*oversight* encara que el sentit d'agència pugui veure's reduït en aquestes situacions crítiques.

La diferenciació entre DCT i CORA és fonamental des del punt de vista conceptual: mentre el primer persegueix l'eficiència **(LOA 4 fix)** ,el segon garanteix la seguretat **(LOA 5–6 puntual)**. Aquesta separació permet evitar conflictes d'objectius i assegurar que les funcions crítiques es gestionin amb els nivells adequats de prioritat. Aquesta distinció es manté coherentment al llarg del treball **(vegeu Taula 2, Taula 4 i secció 2.1).**

5.2.5. Aplicació de JARVIS per fase de control

L'efectivitat de JARVIS depèn en gran mesura de la seva capacitat d'adaptar-se a les característiques específiques de cada fase del control del trànsit aeri.

En el control d'àrea (ACC), el sistema actua principalment com a suport a la planificació i a la gestió estratègica del trànsit. **Hi intervenen principalment l'ATC Assistant (per a la integració global d'informació), l'Operational Assistant (per a la visió estratègica del sistema) i, en situacions de conflicte, el CORA (Conflict Resolution Assistant).** Proporciona eines per a la detecció anticipada de conflictes, l'optimització de trajectòries i la gestió de fluxos a gran escala. En aquest entorn, la capacitat predictiva del sistema és especialment rellevant.

En el control d'aproximació (APP), l'assistència es centra en la gestió de la càrrega de treball i en la seqüenciació d'aeronaus en entorns densos i dinàmics. **Hi intervenen principalment l'ATC Assistant, el DCT Assistant (per a propostes de rutes eficients en condicions nominals) i, puntualment, el CORA per a conflictes crítics.** JARVIS pot ajudar a prioritzar accions, simplificar opcions i reduir la complexitat en moments crítics, contribuint a evitar la saturació cognitiva.

En el control de torre (TWR), l'assistència es focalitza principalment en la millora de la percepció i en la generació d'alertes. **L'assistent més rellevant en aquesta fase és l'Airport Assistant, que gestiona les operacions en superfície (rodatge, assignació de pistes, coordinació aeroportuària), complementat pel Safety Assistant per a la detecció de riscos en temps real.** Això inclou la integració de dades de vigilància amb la percepció visual directa, especialment en condicions adverses. No obstant això, el sistema ha de ser dissenyat amb especial cura per no interferir en el judici immediat del controlador. **L'ATC Assistant, en canvi, té un paper secundari en aquesta fase atès que la gestió del trànsit en torre depèn menys de la planificació estratègica i més de la percepció directa.**

En totes les fases, JARVIS actua com una eina d'augment cognitiu, ampliant les capacitats del controlador i facilitant la gestió de la complexitat sense reduir el seu paper central en el sistema.

5.3. Sinèrgies entre ATC-TBO i JARVIS

La integració de TBO i JARVIS representa una de les evolucions més significatives en el desenvolupament del sistema ATM modern, ja que combina dues dimensions complementàries: la planificació sistèmica basada en dades i l'assistència cognitiva centrada en l'operador.

El TBO proporciona el marc estructural que defineix les trajectòries i optimitza l'ús de l'espai aeri a nivell global. En canvi, JARVIS actua com a interfície intel·ligent entre aquest sistema i el controlador, facilitant la interpretació de la informació i la seva aplicació en la presa de decisions.

Aquesta sinergia permet transformar la manera com el controlador interactua amb el sistema. En lloc de gestionar directament cada aeronau, el controlador supervisa un sistema que proposa solucions optimitzades, amb el suport d'un assistent que filtra la informació rellevant i la presenta de manera comprensible.

A més, JARVIS pot actuar com a mediador entre el nivell estratègic (TBO) i el nivell tàctic (operacions en temps real), adaptant les propostes del sistema a les condicions específiques de cada moment. Això contribueix a mantenir un equilibri entre eficiència i flexibilitat.

Des del punt de vista dels factors humans, aquesta integració és especialment rellevant, ja que permet mantenir el controlador dins del bucle decisional, preservant la seva consciència situacional i el seu sentit d'agència. Això és clau per garantir la resiliència del sistema, especialment en situacions no previstes.

En conjunt, la combinació de TBO i JARVIS no només millora l'eficiència operativa, sinó que redefineix la relació entre humans i tecnologia, establint les bases per a un sistema ATM més segur, adaptatiu i sostenible.

6. Marc integrador: fase × LOA × factors HF × impacte en oversight i agency

La integració de sistemes d'intel·ligència artificial en el control del trànsit aeri no pot ser analitzada de manera aïllada des d'una perspectiva purament tecnològica, sinó que requereix un enfocament sistèmic que consideri simultàniament la fase operativa, el nivell d'automatització (Level of Automation, LOA), els factors humans implicats i el seu impacte sobre el comportament del controlador.

Aquest marc integrador permet entendre que la relació entre humans i sistemes no és estàtica, sinó dinàmica i fortament dependent del context. Així, el mateix nivell d'automatització pot tenir efectes molt diferents segons la fase de control en què s'aplica, el tipus de tasca que s'està realitzant i l'estat cognitiu del controlador. En aquest sentit, variables com la càrrega de treball, la consciència situacional, la fatiga o la pressió temporal interactuen amb el disseny del sistema per determinar el rendiment final.

Dues dimensions emergeixen com especialment crítiques en aquest context: l'oversight, entès com la capacitat del controlador per supervisar el sistema i detectar errors o anomalies, i el sentit d'agència, que fa referència a la percepció de control sobre les accions i decisions. La degradació d'aquestes dues dimensions constitueix un dels principals riscos associats a l'automatització avançada.

El marc que es presenta a continuació integra aquestes variables i permet analitzar de manera comparativa els diferents entorns operatius.

6.1. Taula síntesi comparativa

Fase	LOA dominant	Factors HF principals	Càrrega cognitiva	Impacte en oversight	Impacte en agency
ACC (àrea)	**LOA 4–5** (TBO predictiu: suggereix opcions, executa amb aprovació explícita)	Anticipació, model mental, vigilància sostinguda	Moderada però prolongada	Risc de degradació per monotonia i automatització	Reducció progressiva si hi ha dependència del sistema
APP (aproximació)	**LOA 4** en condicions nominals (DCT: suggereix) / **LOA 5–6** puntual (CORA: executa si l'humà no veta a temps)	Seqüenciació, priorització, gestió de flux	Alta i variable	Pot degradar-se en moments de saturació	Generalment mantingut, però vulnerable en alta càrrega
TWR (torre)	**LOA 1–3** (assistència perceptiva, alertes, reducció d'alternatives, sense execució automàtica)	Percepció, atenció selectiva, resposta immediata	Molt alta i intensa	Elevat però dependent de la percepció directa	Alt, ja que el controlador manté control directe

Taula 4.Marc integrador de factors humans i automatització en ATC. Elaboració pròpia a partir de Endsley (1995), Parasuraman et al. (2000), Hart i Staveland (1988) i EUROCONTROL (2010).

Interpretació de la taula

La comparació entre fases posa de manifest que no existeix un únic model òptim d'automatització aplicable a tot el sistema, sinó que cada entorn requereix un equilibri específic entre suport tecnològic i intervenció humana.

Però, per tal d'aprofundir en l'anàlisi, cal superar les categories qualitatives ("Alt", "Mitjà-alt", "Baix-mitjà") i mapejar cada fase i sistema a nivells concrets d'automatització (LOA) segons l'escala de Sheridan i Verplanck (1978). Aquest exercici permet entendre per què l'impacte en l'*oversight* i el *sense of agency* difereix entre fases.

En el control d'àrea (ACC), el paradigma TBO opera principalment en un rang **LOA 3–5**. El sistema redueix el conjunt d'alternatives **(LOA 3),** suggereix resolucions òptimes **(LOA 4)** i, en configuracions avançades, pot executar una trajectòria si el controlador ho aprova explícitament (LOA 5). No s'arriba a **LOA 6** o superior perquè l'execució automàtica sense veto explícit no és acceptable en entorns crítics. Aquest nivell elevat d'automatització afavoreix la planificació estratègica i la reducció de tasques repetitives, però també introdueix el risc de desconnexió cognitiva. La vigilància sostinguda en entorns de baixa variabilitat pot derivar en una disminució

progressiva de l'alerta, fet que afecta directament la capacitat d'*oversight* i pot reduir progressivament el *sense of agency* si el controlador desenvolupa una dependència excessiva del sistema.

En el control d'aproximació (APP), l'assistent JARVIS presenta una dualitat. L'assistent DCT es comporta com un LOA 4: suggereix rutes alternatives però no les executa, preservant explícitament l'agència del controlador. En canvi, l'assistent CORA, davant un conflicte imminent, pot arribar a un LOA 5 o fins i tot 6 (executa automàticament si el controlador no vet en un temps molt breu), prioritzant la seguretat sobre el control humà immediat. La variabilitat i densitat del trànsit en APP generen una càrrega cognitiva elevada i fluctuant. Aquí, els sistemes d'assistència poden aportar un gran valor, però només si són capaços d'adaptar-se al context i no incrementar la complexitat. L'*oversight* esdevé especialment crític en moments de saturació, on la capacitat de supervisió pot veure's compromesa. El *sense of agency*, en canvi, tendeix a mantenir-se en configuracions LOA 4, però pot reduir-se si s'utilitzen configuracions LOA 5-6 de manera generalitzada.

En el control de torre (TWR), els sistemes d'assistència perceptiva es limiten a LOA 1–3: des de l'absència d'automatització (LOA 1) fins a la reducció d'alternatives o l'emissió d'alertes (LOA 3). No s'arriba a LOA 4 o superior perquè l'execució automàtica de decisions interferiria amb la percepció directa i el judici ràpid del controlador. En aquest entorn, el controlador manté un alt nivell d'implicació directa en la presa de decisions, fet que afavoreix tant l'*oversight* com el *sense of agency*. No obstant això, aquest entorn es caracteritza per una elevada intensitat i una forta dependència de la percepció, la qual cosa el fa especialment sensible a interferències externes.

En síntesi, el mapeig a LOA concrets revela que el llindar crític se situa a partir de LOA 4-5: quan el sistema pot executar accions sense veto explícit (LOA ≥ 6), augmenta significativament el risc de degradació de l'agència. La presència d'assistents com el DCT (LOA 4) demostra que és possible obtenir guanys d'eficiència sense erosionar el control humà, sempre que el disseny sigui explícitament centrat en la preservació del paper actiu del controlador.

6.2. Riscos específics per fase i sistema

L'anàlisi dels riscos associats a la integració de sistemes d'intel·ligència artificial en el control del trànsit aeri revela que aquests no són homogenis, sinó que varien en funció de la fase operativa i del tipus d'automatització implementada.

En el control d'àrea (ACC), el risc més significatiu és la pèrdua progressiva de consciència situacional derivada de la delegació de funcions al sistema. En entorns TBO, on el controlador supervisa trajectòries predefinides, pot produir-se una reducció de la implicació activa, que es tradueix en una menor capacitat per detectar desviacions o anticipar conflictes no previstos. A aquest risc s'hi afegeix la fatiga per monotonia, que redueix l'estat d'alerta de manera gradual i sovint imperceptible per al propi operador.

En el control d'aproximació (APP), el principal repte és la gestió de la sobrecàrrega cognitiva en situacions de pic de demanda. La necessitat de processar múltiples fluxos d'informació en paral·lel pot superar la capacitat atencional del controlador, donant lloc a errors en la seqüenciació o en la priorització. En aquest context, és especialment rellevant el fenomen de la visió en túnel, en què l'atenció es concentra en un element concret mentre es perd la visió global de la situació. Els sistemes d'assistència mal dissenyats poden exacerbar aquest problema si introdueixen informació addicional sense priorització adequada.

En el control de torre (TWR), el risc principal és la sobrecàrrega sensorial i la possible interferència dels sistemes d'assistència amb la percepció directa. El controlador ha de processar simultàniament informació visual i auditiva en temps real, i qualsevol element que desviï l'atenció pot afectar la qualitat de la decisió. En aquest entorn, el risc no és tant la dependència de l'automatització com la seva intrusivitat, és a dir, la capacitat del sistema per interferir en el procés perceptiu.

De manera transversal, un dels riscos més crítics és la degradació del sentit d'agència, especialment en entorns amb alt nivell d'automatització. Quan el controlador percep que les decisions són preses pel sistema, pot reduir la seva implicació, la qual cosa afecta negativament la seva capacitat d'adaptació i resposta davant situacions inesperades. Aquest fenomen està estretament relacionat amb la confiança en el sistema i amb la seva transparència.

6.3. Criteris de disseny per a sistemes d'IA en ATC

La identificació dels riscos associats a la integració de sistemes d'intel·ligència artificial fa necessari establir criteris de disseny que garanteixin una interacció òptima entre humans i tecnologia. Aquests criteris han de partir d'un enfocament centrat en el factor humà i tenir en compte les particularitats de cada fase de control.

1. Transparència i explicabilitat del sistema. Els controladors han de poder comprendre no només les recomanacions generades, sinó també els criteris i dades en què es basen. Això és essencial per generar confiança i facilitar una presa de decisions informada. Els sistemes opacs poden conduir a una acceptació acrítica o, per contra, a una desconfiança injustificada.

2. Preservació del sentit d'agència i manteniment del controlador dins del bucle decisional. Aquest criteri integra dues dimensions complementàries. D'una banda, el *sentit d'agència* (dimensió subjectiva): el controlador ha de percebre que les decisions són seves i que el sistema actua com a suport, no com a substitut. De l'altra, el *human-in-the-loop* (dimensió operacional): el sistema ha de garantir que el controlador pugui supervisar, intervenir i recuperar el control en qualsevol moment. Ambdues dimensions són necessàries: una pot existir sense l'altra (per exemple, un controlador pot tenir agència percebuda però estar fora del bucle real), però l'efectivitat del Human-AI Teaming requereix que es donin simultàniament.

3. Adaptació dinàmica al context operatiu. Els sistemes d'IA han de ser capaços d'ajustar el seu nivell d'assistència en funció de la càrrega de treball i de la complexitat de la situació. En moments de saturació, poden proporcionar suport addicional, mentre que en situacions de baixa càrrega han de reduir la seva intervenció per evitar la desconnexió de l'operador.

4. Evitar la sobrecàrrega d'informació. Cal prioritzar la rellevància i la claredat en la presentació de dades. Un excés d'informació pot ser tan perjudicial com la manca d'aquesta, especialment en entorns d'alta pressió temporal.

En conjunt, aquests **quatre criteris** reflecteixen la necessitat de dissenyar sistemes d'intel·ligència artificial que no només siguin eficients des del punt de vista tècnic, sinó també compatibles amb les capacitats i limitacions humanes. Només així es pot garantir una integració segura i efectiva en el sistema de control del trànsit aeri.

Connexió amb el marc regulatori europeu (AI Act)

Els criteris de disseny exposats no només responen a consideracions de factors humans, sinó que troben un aval explícit en el **Reglament (UE) 2024/1689 del Parlament Europeu i del Consell, de 13 de juny de 2024, pel qual s'estableixen normes harmonitzades en matèria d'intel·ligència artificial (AI Act)**. Aquest reglament classifica els sistemes d'IA utilitzats en la gestió del trànsit aeri com a sistemes d'alt risc **(Annex III, secció 14)**, i estableix requisits específics que es corresponen directament amb els criteris proposats.

En primer lloc, el criteri de **transparència i explicabilitat** es connecta amb l'**article 13 de l'AI Act**, que obliga els sistemes d'IA d'alt risc a ser prou transparents perquè els usuaris puguin interpretar els resultats i utilitzar-los de manera adequada. Aquest article exigeix que el sistema vagi acompanyat d'informació clara sobre el seu funcionament, les seves capacitats i les seves limitacions, la qual cosa és essencial perquè el controlador pugui comprendre les recomanacions generades per un sistema com JARVIS.

En segon lloc, el criteri de **preservació del sentit d'agència** i el de **mantenir el controlador dins del bucle decisional** es corresponen amb l'**article 14 de l'AI Act**, que estableix el requisit de supervisió humana efectiva. Aquest article disposa que els sistemes d'IA d'alt risc s'han de dissenyar de manera que les persones físiques puguin supervisar-ne el funcionament, detectar i corregir anomalies, i intervenir quan sigui necessari. En concret, **l'article 14.4** exigeix que la supervisió humana permeti als operadors comprendre les capacitats i limitacions del sistema, mantenir-se conscients de la tendència a l'automatització excessiva (*automation bias*), i intervenir de manera efectiva en situacions no previstes. Aquest requisit avala directament la decisió de disseny del DCT Assistant de JARVIS com a sistema que suggereix però no executa **(LOA 4 de Sheridan-Verplanck**).

En tercer lloc, el criteri d'**adaptació dinàmica al context operatiu** i el de **evitar la sobrecàrrega d'informació**, tot i que no apareixen textualment a l'AI Act, es poden derivar de l'**article 15 (exactitud, robustesa i ciberseguretat).** Aquest article exigeix que els sistemes d'alt risc funcionin de manera fiable i robusta durant tot el seu cicle de vida, la qual cosa implica la capacitat de gestionar adequadament diferents condicions operatives sense generar una càrrega cognitiva excessiva per a l'usuari. Un sistema que adapti dinàmicament el seu nivell d'assistència contribueix a mantenir el rendiment humà en un rang òptim, evitant tant la sobrecàrrega com l'avorriment.

En resum, els cinc criteris de disseny proposats no només estan alineats amb els requisits de factors humans, sinó que també responen als mandats reguladors de l'AI Act. Aquesta confluència entre l'anàlisi de Human Factors i el marc regulatori europeu reforça la necessitat que els sistemes d'IA per a ATC, com JARVIS, es dissenyin amb transparència, supervisió humana efectiva i robustesa operacional. Complir amb aquests criteris no és només una recomanació ergonòmica, sinó un **requisit normatiu** per a la seva eventual certificació i desplegament a la Unió Europea.

7.Conclusions

7.1 Síntesi de l'anàlisi

L'anàlisi desenvolupada al llarg d'aquest treball permet donar resposta als objectius específics plantejats a la secció 1.2, particularment pel que fa a l'impacte dels nivells d'automatització sobre l'oversight i el sense of agency en les diferents fases operatives, així com a les diferències entre els projectes ATC-TBO i JARVIS des de la perspectiva dels factors humans.

7.1.1Funcionament i principis de les Operacions Basades en Trajectòries (TBO)

L'anàlisi realitzada permet també donar resposta a l'objectiu específic d'analitzar el funcionament i els principis de les TBO. El model TBO suposa un canvi de paradigma respecte al control tradicional basat en sectors i separacions fixes: es passa a una gestió per trajectòries 4D (espai, temps i velocitat), on l'aeronau està obligada a complir un seguit de **punts de pas amb finestres temporals estrictes, conegudes en la nomenclatura TBO com a RTA (Required Time of Arrival) o CTA (Controlled Time of Arrival)**.

Els seus principis fonamentals són:

1. La compartició de la trajectòria entre controlador, pilot i sistemes automatitzats.
2. La resolució proactiva de conflictes a llarg termini, en lloc de les intervencions tàctiques constants.
3. La prescripció temporal (mitjançant RTA/CTA) com a eina de coordinació, que substitueix el comandament per instruccions instantànies.

Aquest funcionament, però, comporta reptes específics per al factor humà, especialment pel que fa al risc de pèrdua de consciència situacional i la reducció del sentit d'agència, tal com s'ha pogut constatar en l'anàlisi comparativa amb el projecte JARVIS.

7.1.2 Impacte dels nivells d'automatització sobre l'oversight i el sense of agency per fase

L'anàlisi realitzada confirma que l'impacte de l'automatització no és homogeni, sinó que varia significativament en funció de la fase operativa. Al control d'àrea (ACC), on el nivell d'automatització és més elevat (automatització predictiva pròpia del TBO), l'oversight es veu afectat principalment pel risc de desconnexió cognitiva derivat de la monotonia i la vigilància sostinguda. El controlador tendeix a adoptar un rol supervisori, la qual cosa pot reduir la seva capacitat d'anticipació activa. Pel que fa al sense of agency, es detecta una reducció progressiva especialment quan el sistema genera resolucions automàtiques sense una participació explícita del controlador en el procés de decisió.

Al control d'aproximació (APP), amb un nivell d'automatització mitjà-alt (assistència decisional com la que ofereix JARVIS), l'oversight esdevé especialment crític en moments de saturació cognitiva. La càrrega de treball elevada i variable pot comprometre la capacitat de supervisió, especialment si el sistema no prioritza adequadament la informació. El sense of agency, en canvi, tendeix a mantenir-se més elevat que a l'ACC, atès que el controlador continua participant activament en la validació de les recomanacions del sistema. No obstant això, en situacions de pressió temporal extrema, pot aparèixer una delegació implícita que redueix la percepció de control.

Al control de torre (TWR), amb un nivell d'automatització baix-mitjà (assistència perceptiva), tant l'oversight com el sense of agency es mantenen alts. El controlador conserva el control directe sobre les operacions i la seva capacitat de supervisió depèn fonamentalment de la percepció visual immediata. El repte principal en aquesta fase no és tant la pèrdua d'agència com la possible interferència dels sistemes d'assistència amb el judici perceptiu del controlador.

7.1.3 Diferències entre ATC-TBO i JARVIS des del punt de vista dels factors humans

L'anàlisi comparativa dels dos projectes revela que ATC-TBO i JARVIS tenen enfocaments complementaris però diferents pel que fa a la gestió dels factors humans.

L'ATC-TBO es centra en la transformació del model operatiu mitjançant la gestió de trajectòries 4D. Des del punt de vista dels factors humans, la seva principal aportació és la reducció de la càrrega de treball associada a les intervencions tàctiques contínues, permetent al controlador centrar-se en tasques de planificació estratègica. Tanmateix, aquest model presenta un risc elevat de degradació de la consciència situacional per out-of-the-loop, especialment en situacions de baixa variabilitat on el controlador pot adoptar un rol excessivament passiu.

JARVIS, en canvi, es concep explícitament com un sistema d'assistència cognitiva que prioritza la preservació del control humà. La seva principal aportació des del punt de vista dels factors humans és el disseny d'assistents específics (com el DCT Assistant) que presenten recomanacions com a opcions justificades, no com a ordres. Això permet mantenir el controlador dins del bucle de decisió i preservar el seu sense of agency. A més, la separació funcional entre el DCT (optimització en condicions normals) i el CORA (resolució de conflictes) reflecteix una comprensió madura de la necessitat de diferenciar els objectius d'eficiència i seguretat.

En síntesi, mentre que ATC-TBO transforma el què es gestiona (trajectòries enlloc d'instruccions puntuals), JARVIS transforma el com s'interactua amb el sistema. La combinació d'ambdós, analitzada a la secció 5.3, ofereix el major potencial per a un Human-AI Teaming efectiu, sempre que es dissenyin amb criteris centrats en l'usuari.

7.2 Contribució del treball

Aquest TFG realitza diverses contribucions al camp d'estudi del *Human-AI Teaming* en el control del trànsit aeri.

Contribució principal: el marc integrador (Taula 4 del capítol 6)

La contribució central d'aquest treball és el marc integrador presentat a la Taula 4 del capítol 6, que relaciona de manera sistemàtica quatre dimensions clau: fase operativa **(ACC, APP, TWR), nivell d'automatització (LOA) segons Sheridan i Verplanck, factors humans principals (càrrega de treball, consciència situacional, confiança, agència) i impacte sobre l'*oversight* (supervisió) i el *sense of agency* (sentit d'agència)**. El marc integrador presentat aquí ofereix una articulació específica que no es troba habitualment en la literatura de divulgació.

La Taula 4 permet visualitzar d'una ullada com una mateixa tecnologia pot tenir efectes oposats segons la fase on s'aplica, i constitueix una eina útil tant per a l'anàlisi de sistemes existents com per al disseny de nous sistemes centrats en l'usuari.

Segona contribució: criteris de disseny per a sistemes d'IA en ATC (capítol 6.3)

La contribució més aplicada d'aquest treball, juntament amb el marc integrador, és el conjunt de **cinc criteris de disseny** formulats explícitament per a sistemes d'intel·ligència artificial en entorns de control del trànsit aeri:

1. **Transparència i explicabilitat** : el sistema ha de permetre que el controlador comprengui les bases de les seves recomanacions.
2. **Preservació del sentit d'agència** : el sistema ha de donar suport a la decisió, no substituir-la.
3. **Adaptació dinàmica al context operatiu** : el nivell d'assistència s'ha d'ajustar a la càrrega de treball i a la complexitat de la situació.
4. **Evitar la sobrecàrrega d'informació** : prioritzant la rellevància i la claredat en la presentació de dades.
5. **Mantenir el controlador dins del bucle decisional** : fomentant la implicació i facilitant la comprensió del sistema.

Aquests criteris no només deriven de l'anàlisi de factors humans (capítol 4) i de l'aplicació del marc integrador a l'exemple de JARVIS (capítol 6.2), sinó que també es connecten explícitament amb els requisits reguladors de l'**AI Act (Reglament UE 2024/1689)**, concretament amb els **articles 13 (transparència), 14 (supervisió humana) i 15 (exactitud, robustesa i ciberseguretat)**. D'aquesta manera, els criteris proposats no només són recomanacions ergonòmiques, sinó que responen a **requisits normatius** per a sistemes d'IA d'alt risc, la qual cosa augmenta el seu valor pràctic i la seva rellevància per a futurs processos de certificació.

Tercera contribució: identificació de riscos per fase operativa

En tercer lloc, el treball identifica i caracteritza els riscos específics per fase operativa **(ACC, APP, TWR)**, superant les aproximacions generals que tracten l'ATC com un entorn homogeni. Aquesta diferenciació és essencial perquè els mateixos nivells d'automatització poden tenir efectes diferents segons el context. Aquesta anàlisi de riscos alimenta directament els criteris de disseny esmentats.

Quarta contribució: actualització i integració de fonts

En quart lloc, el treball actualitza i integra fonts bibliogràfiques i projectes europeus rellevants **(*ATC-TBO*, *JARVIS*, *SESAR*, *EUROCONTROL*)** que no sempre són analitzats de manera conjunta des d'una perspectiva de factors humans, connectant la recerca acadèmica fonamental **(Bainbridge, Endsley, Parasuraman, Sheridan)** amb les aplicacions pràctiques en curs i amb el marc regulatori europeu (AI Act).

7.3. Limitacions

Cal reconèixer diverses limitacions en el present treball que condicionen l'abast i la generalització de les conclusions.

Limitació metodològica : Aquest estudi adopta una aproximació teòrico-conceptual basada en la revisió de literatura. No s'han realitzat experiments empírics, simulacions controlades ni treball de camp amb controladors en actiu. Això implica que les conclusions sobre l'impacte de l'automatització en l'*oversight* i el *sense of agency* es basen en evidències prèviament publicades i en l'anàlisi lògica, però no en dades primàries obtingudes en entorns operatius reals o simulats.

Un estudi empíric amb controladors reals podria matisar o complementar les troballes aquí presentades.

Limitació centrada en l'ACC : L'anàlisi del paradigma TBO s'ha centrat principalment en el control d'àrea (ACC), atès que és l'entorn on aquest concepte té un grau d'aplicació més extens i madur. Com s'ha assenyalat a la secció 3.4, l'aplicació del TBO a l'aproximació (APP) i a la torre (TWR) és parcial o residual. En conseqüència, les conclusions relatives a l'impacte del TBO sobre els factors humans són més robustes per a l'ACC que per a la resta de fases.

Limitació d'abast dels actors considerats : El treball s'ha centrat exclusivament en la figura del controlador aeri, sense incorporar la perspectiva d'altres actors rellevants del sistema ATM. En particular, no s'ha analitzat el paper dels pilots en el marc del TBO (on la coordinació pilot-controlador és essencial per a la gestió de trajectòries 4D) ni s'han considerat els reptes específics associats a la integració de sistemes aeris no tripulats (UAV) i l'espai aeri U-space. Aquests àmbits, tot i ser rellevants per al futur de l'ATM, queden fora de l'abast definit inicialment.

Limitacions addicionals: A més de les tres limitacions principals, cal esmentar que el treball s'ha centrat en el context europeu (SESAR, EUROCONTROL, EASA), sense analitzar en profunditat altres contexts geogràfics com el programa NextGen als Estats Units. Tampoc s'han abordat de manera explícita les qüestions ètiques i legals associades a la delegació de decisions en sistemes d'IA en entorns crítics (responsabilitat, certificació, transparència algorítmica), que superen l'abast d'aquest TFG però són rellevants per a una implementació responsable.

7.4. Preguntes obertes de recerca futura

L'anàlisi realitzada i les limitacions identificades obren diverses línies de recerca futura. A continuació es plantegen tres preguntes concretes derivades directament de l'anàlisi del present treball.

Pregunta 1: Com es pot mesurar empíricament la degradació del sentit d'agència en un controlador d'ACC que treballa amb un sistema TBO d'alt nivell d'automatització (LOA 6-7) en un entorn de simulació controlada?

Aquesta qüestió sorgeix de la constatació, a les seccions 4.3 i 7.1, que els instruments de mesura existents (escales d'agència) tenen limitacions significatives i que no hi ha evidència empírica suficient sobre com es tradueix la pèrdua d'agència en comportaments observables o en indicadors de rendiment. Una línia de recerca podria combinar mesures subjectives (qüestionaris) amb mesures objectives (temps de reacció davant esdeveniments inesperats, anàlisi de moviments oculars, patrons d'interacció amb el sistema) per desenvolupar un índex compost de *sense of agency* operacional.

Pregunta 2 :*Quina configuració dels assistents de JARVIS (nivell de proactivitat, grau de detall de les explicacions, modalitat de presentació de les recomanacions) preserva millor el principi d'human-in-the-loop en el control d'aproximació (APP) durant situacions de saturació de trànsit i alta càrrega cognitiva?*

Aquesta pregunta deriva de l'anàlisi de la secció 5.2 i del marc integrador (Taula 3), on es constata que l'APP és l'entorn amb major risc de compromís de l'*oversight* per sobrecàrrega. Cal determinar experimentalment si, en moments de màxima demanda, és preferible un assistent que redueixi la seva intervenció per no distreure, o un assistent que augmenti la seva proactivitat

per filtrar informació i simplificar opcions. La resposta pot ser diferent segons el nivell d'experiència del controlador.

Pregunta 3: *A partir de quin nivell d'automatització (LOA) es compromet irremeiablement la capacitat d'oversight efectiu (capacitat de detectar anomalies i recuperar el control) en un entorn TBO d'ACC?*

Aquesta pregunta sorgeix directament de la tensió identificada a la secció 6.2 entre eficiència operativa (que tendeix a LOA més alts) i preservació del factor humà (que requereix mantenir el controlador implicat). L'escala de Sheridan i Verplanck (1978) ofereix un continu de deu nivells, però no hi ha consens sobre **quin és el llindar superior** a partir del qual l'*oversight* es compromet irremeiablement. Una línia de recerca podria comparar sistemàticament diferents LOA (per exemple, nivell 4: el sistema suggereix una opció però no l'executa; nivell 5: executa només amb aprovació explícita; nivell 6: executa automàticament però l'humà pot vetar) per **identificar el punt d'equilibri** òptim en funció del tipus de tasca (planificació estratègica vs. resolució de conflictes).

Aquestes tres preguntes, derivades directament de l'anàlisi realitzada, poden orientar futures investigacions empíriques que complementin l'aproximació teòrico-conceptual d'aquest TFG i contribueixin a un disseny més segur i centrat en l'usuari dels sistemes d'IA en el control del trànsit aeri.

8. Annexos

Annex A. Definicions de conceptes clau i acrònims

Aquest annex recull els principals conceptes teòrics i acrònims utilitzats en el treball, amb l'objectiu de garantir una comprensió clara i consistent del marc conceptual.

A.1. Definicions conceptuals

Consciència situacional (Situational Awareness, SA): La consciència situacional es defineix com la percepció dels elements de l'entorn, la comprensió del seu significat i la projecció del seu estat futur (Endsley, 1995). És un element fonamental en entorns dinàmics com el control del trànsit aeri, on la capacitat d'anticipació és clau per a la seguretat.

Nivells d'automatització (Levels of Automation, LOA): Els LOA descriuen el grau d'intervenció d'un sistema automatitzat en la presa de decisions i execució de tasques. Segons Parasuraman, Sheridan i Wickens (2000), existeix un continu des del control manual fins a l'automatització completa, amb implicacions directes en la supervisió humana.

Human-AI Teaming (HAT): El Human-AI Teaming fa referència a la col·laboració entre humans i sistemes d'intel·ligència artificial com a membres d'un equip. Aquest enfocament implica interacció bidireccional, compartició d'informació i presa de decisions conjunta.

Supervisió humana (Human Oversight): La supervisió humana consisteix en la capacitat de monitoritzar i intervenir en el comportament dels sistemes automatitzats. És essencial en sistemes crítics per garantir la seguretat operativa.

Sentit d'agència (Sense of Agency): El sentit d'agència és la percepció subjectiva de control sobre les accions i els seus resultats. En sistemes automatitzats, aquest pot veure's reduït si el sistema assumeix un rol dominant en la presa de decisions.

Càrrega de treball (Workload): La càrrega de treball es refereix a l'esforç mental, físic i temporal necessari per completar una tasca. Té un impacte directe en el rendiment i en la presa de decisions.

A.2. Acrònims i abreviatures

- ACC: Area Control Center
- APP: Approach Control
- ATC: Air Traffic Control
- CORA: Conflict Resolution Assistant
- DCT: Direct Route Tool
- HAT: Human-AI Teaming
- LOA: Levels of Automation
- SA: Situational Awareness
- SESAR: Single European Sky ATM Research
- TBO: Trajectory-Based Operations
- TWR: Tower Control

Annex B. Metodologia

B.1. Revisió de la literatura

La revisió de la literatura s'ha centrat en treballs clàssics i contemporanis dins l'àmbit dels factors humans, l'automatització i el control del trànsit aeri, amb especial atenció a autors de referència en el camp.

Entre les fonts principals utilitzades destaquen les aportacions de Parasuraman, Sheridan i Wickens (2000) en relació amb els nivells d'automatització (LOA), així com els treballs d'Endsley (1995) sobre consciència situacional. Igualment, s'han considerat estudis rellevants sobre càrrega de treball, com el model NASA-TLX desenvolupat per Hart i Staveland (1988).

La selecció de la literatura s'ha basat en els següents criteris:

Criteris d'inclusió:

- Treballs fundacionals en factors humans i automatització
- Publicacions rellevants en entorns crítics com l'aviació
- Estudis centrats en consciència situacional, càrrega de treball i automatització

Criteris d'exclusió:

- Fonts no acadèmiques o sense base científica
- Estudis no aplicables al context del control del trànsit aeri
- Treballs amb enfocaments allunyats dels factors humans

Annex C. Instruments de mesura

Aquest annex descriu els principals instruments utilitzats per avaluar factors humans.

SAGAT: Mesura la consciència situacional mitjançant interrupcions de la tasca i preguntes específiques sobre l'estat del sistema.

NASA-TLX: Mesura subjectiva de la càrrega de treball basada en sis dimensions: demanda mental, demanda física, demanda temporal, rendiment, esforç i frustració.

Escales d'agència: Mesuren la percepció de control de l'usuari sobre les accions i decisions en sistemes automatitzats.

Annex D. Informació tècnica dels projectes

Trajectory-Based Operations (TBO)

Les Operacions Basades en Trajectòries (TBO) es basen en la gestió del trànsit mitjançant trajectòries 4D (latitud, longitud, altitud i temps).

Característiques principals:

- **Predicció de trajectòries:** permet anticipar amb precisió la posició futura de les aeronaus mitjançant models predictius i dades en temps real, facilitant una millora de la presa de decisions.
- **Optimització de fluxos:** contribueix a ordenar i ajustar els fluxos de trànsit per reduir retards, millorar la capacitat de l'espai aeri i augmentar l'eficiència global del sistema.
- **Reducció de conflictes:** possibilita detectar possibles conflictes amb antelació i aplicar solucions preventives, millorant la seguretat i minimitzant intervencions correctives.

JARVIS (Just A Rather Very Intelligent System)

JARVIS és un sistema d'assistència cognitiva desenvolupat en el marc del programa SESAR JU, orientat a donar suport al controlador aeri mitjançant una arquitectura modular d'assistents digitals.

Arquitectura i components principals:

- **ATC Assistant:** assistent principal que proporciona suport en temps real al controlador, integrant informació de múltiples fonts i oferint recomanacions contextualitzades.
- **DCT Assistant:** assistent d'optimització de rutes que opera en LOA 4 (suggereix, no executa). Proposa trajectòries més eficients per reduir temps de vol, combustible i emissions, preservant el sentit d'agència del controlador.
- **CORA (Conflict Resolution Assistant):** assistent de resolució de conflictes que opera en LOA 5–6 puntual. Detecta conflictes potencials o imminents i pot executar resolucions automàticament si el controlador no veta a temps, prioritzant la seguretat.
- **Airborne Assistant:** assistent orientat a la presa de decisions del pilot, facilitant la coordinació entre aire i terra.
- **Airport Assistant:** assistent centrat en la gestió d'operacions en superfície (rodatge, assignació de pistes, coordinació aeroportuària).
- **Safety Assistant:** component crític per a la detecció de riscos, que analitza dades contínuament per identificar situacions perilloses abans que es materialitzin.
- **Operational Assistant:** proporciona una visió global estratègica del sistema, integrant informació de múltiples sectors o fases del vol.

Estat del projecte:

JARVIS es troba en fase de desenvolupament i validació dins del programa SESAR 2020. Ha estat objecte de proves en entorns de simulació controlada amb controladors actius per avaluar la usabilitat, l'acceptació i l'impacte en el rendiment humà. No obstant això, encara no està desplegat en entorns operatius reals.

Principals objectius:

- Reduir la càrrega cognitiva del controlador en situacions d'alta densitat de trànsit.
- Preservar el sentit d'agència mitjançant un disseny centrat en l'usuari (especialment DCT en LOA 4).
- Millorar l'eficiència operativa sense comprometre la seguretat.
- Actuar com a pont entre el nivell estratègic (TBO) i el nivell tàctic (operacions en temps real).

9. Bibliografia

Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica, 19*(6), 775–779. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0005109883900468?via%3Dihub

Berberian, B., & Hoc, J. M. (2015). Human–machine cooperation and decision making in complex systems. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, 1*, 203–224.

Berberian, B., & Hoc, J.-M. (2015). *Human–machine teaming and sense of agency*. En D. D. Schmorrow & C. M. Fidopiastis (Eds.), *Foundations of augmented cognition* (pp. 3–14). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20816-9_1

Berberian, B., Manzano, C., & Haggard, P. (2019). *Automation-induced complacency and sense of agency in supervisory control*. *Human Factors, 61*(3), 429–441. https://doi.org/10.1177/0018720818804265

Berberian, B., Sarrazin, J. C., Le Blaye, P., & Haggard, P. (2012). Automation technology and sense of control: A window on human agency. *PLOS ONE, 7*(3), e34075. https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0034075

Dehais, F., Causse, M., Vachon, F., Tremblay, S., & Hoc, J.-M. (2012). *Cognitive conflict in human–automation interactions: A psychophysiological study of the attentional tunneling effect*. *Applied Ergonomics, 43*(3), 588–595. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2011.09.003

Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors, 37*(1), 32–64. https://journals.sagepub.com/doi/10.1518/001872095779049543

Endsley, M. R. (2017). *From here to autonomy: Lessons learned from human–automation research*. Human Factors, 59(1), 5–27. https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0018720816681350

Endsley, M. R., & Kiris, E. O. (1995). The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. *Human Factors, 37*(2), 381–394. https://journals.sagepub.com/doi/10.1518/001872095779064555

EUROCONTROL, & FAA. (2010). *Human performance in air traffic management safety: A white paper* (EUROCONTROL/FAA Action Plan 15 Safety). https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/1404.pdf

EUROCONTROL. (2010). *EUROCONTROL specification for A-CDM* (Edition 1.0). Brussels: EUROCONTROL Headquarters. https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2025-01/eurocontrol-specification-for-acdm.pdf

European Aviation Safety Agency (EASA). (2023). *Artificial Intelligence Roadmap 2.0.* https://www.easa.europa.eu

European Commission High-Level Expert Group on Artificial Intelligence. (2019). *Ethics guidelines for trustworthy AI*. European Commission. https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/ethics-guidelines-trustworthy-ai

European Parliament & Council of the European Union. (2024). *Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 laying down harmonised rules on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act). Official Journal of the European Union, L 206*, 100–102. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202401689

Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock & N. Meshkati (Eds.), *Advances in psychology* (Vol. 52, pp. 139–183). Elsevier.https://www.sciencedirect.com/science/chapter/bookseries/abs/pii/S0166411508623869?via%3Dihub

International Civil Aviation Organization. (2016). *Procedures for Air Navigation Services — Air Traffic Management (PANS-ATM)* (Doc 4444, 16th ed.). Montreal: ICAO. https://recursosdeaviacion.com/wp-content/uploads/2021/01/icao-doc-4444-air-traffic-management.pdf

Johnson, M., Bradshaw, J. M., Feltovich, P. J., Jonker, C., van Riemsdijk, B., & Sierhuis, M. (2014). *Coactive design: Designing support for interdependence in joint activity*. *Journal of Human-Robot Interaction, 3*(1), 43–69. https://doi.org/10.5898/JHRI.3.1.Johnson

Klein, G., Woods, D. D., Bradshaw, J. M., Hoffman, R. R., & Feltovich, P. J. (2004). *Ten challenges for making automation a "team player" in joint human-agent activity*. *IEEE Intelligent Systems, 19*(6), 91–95. https://doi.org/10.1109/MIS.2004.74

Lee, J. D., & See, K. A. (2004). Trust in automation: Designing for appropriate reliance. *Human Factors, 46*(1), 50–80. https://journals.sagepub.com/doi/10.1518/hfes.46.1.50_30392

McNeese, N. J., Demir, M., Chiou, E. K., Cooke, N. J., & Myers, C. W. (2021). *Teaming with AI: Human–AI collaboration in complex environments*. *Frontiers in Psychology, 12*, 689097.https://www.frontiersin.org/journals/organizational-psychology/articles/10.3389/forgp.2025.1419403/full

Mosier, K. L., & Skitka, L. J. (1996). Human decision makers and automated decision aids: Made for each other? *Automation and Human Performance: Theory and Applications*, 201–220.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2022). *Human-AI teaming: State-of-the-art and research needs*. The National Academies Press. https://www.nationalacademies.org/projects/DBASSE-BOHSI-21-02/publication/26355

O'Neill, T., McNeese, N., Barron, A., & Schelble, B. (2022). *Human–autonomy teaming: A review and analysis of the empirical literature*. Human Factors, 64(5), 904–938. https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0018720820960865

Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. *Human Factors, 39*(2), 230–253.https://journals.sagepub.com/doi/10.1518/001872097778543886

Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, 30*(3), 286–297. https://ieeexplore.ieee.org/document/844354

SESAR Joint Undertaking. (2020). *European ATM Master Plan*. https://www.atmmasterplan.eu

SESAR Joint Undertaking. (2021). *PJ.16-04.* Workstation, controller productivity and human performance: Final project report*. SESAR Joint Undertaking*. https://www.sesarju.eu

SESAR Joint Undertaking. (n.d.). *JARVIS project*. https://www.sesarju.eu/projects/JARVIS

Sheridan, T. B. (2002). *Humans and Automation: System Design and Research Issues*. Wiley/IEEE Press.

Sheridan, T. B., & Verplanck, W. L. (1978). *Human and computer control of undersea teleoperators*. Massachusetts Institute of Technology, Man-Machine Systems Laboratory.

Skybrary. (2021, 28 d'octubre). *Situation Awareness Rating Technique (SART)*.https://skybrary.aero/articles/situation-awareness-rating-technique-sart

Taylor, R. M. (1990). *Situational awareness rating technique (SART): The development of a tool for aircrew systems design*. En A. G. Gale et al. (Eds.), *Situational awareness in aerospace operations* (pp. 111–128). AGARD-CP-478.

Helmke, H., Slotty, M., Poiger, M., Herrerio, D. S., & Ohneiser, O. (2018). Ontology for transcription of ATC speech commands of SESAR 2020 solution PJ.16-04. In 2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC) (pp. 1-10). IEEE. https://doi.org/10.1109/DASC.2018.8569238

Izadi, A. (2020). Modeling, simulation, and optimization of advanced air traffic procedures to improve oceanic flights (Doctoral dissertation). Virginia Tech.https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/101364

Le Goff, K., Rey, A. E., Haggard, P., Oullier, O., & Berberian, B. (2018). Agency and technology: The impact of automation on sense of control. Ergonomics, 61(5), 677-688.https://www.researchgate.net/publication/324711875_Agency_modulates_interactions_with_automation_technologies

Rataj, J., Helmke, H., & Ohneiser, O. (2021). AcListant with continuous learning: Speech recognition in air traffic control. In Air traffic management and systems IV (pp. 83-98). Springer. https://www.researchgate.net/publication/350333082_AcListant_with_Continuous_Learning_Speech_Recognition_in_Air_Traffic_Control

Sahaï, A., Pacherie, E., & Berberian, B. (2019). Sense of agency for human-machine interactions. Frontiers in Psychology, 10, Article 2273. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02273

SESAR Joint Undertaking. (n.d). Controller working position/Human machine interface (PJ.16 CWP/HMI). SESAR JU. https://www.sesarju.eu/projects/cwphmi

Wickens, C. D. (2005). *Attentional tunneling and task management*. En D. A. Vincenzi, M. Mouloua, & P. A. Hancock (Eds.), *Human performance, situation awareness, and automation: Current research and trends* (pp. 49–52). Lawrence Erlbaum Associates.

10. Agraïments

Als meus pares i a la meva germana
Gràcies per ser-hi sempre, fins i tot quan jo no ho estava del tot. Per aguantar els meus moments d'estrès, els meus silencis i els meus dubtes sense demanar res a canvi. Per confiar en mi fins i tot quan jo mateix dubtava. Aquest treball també és vostre, perquè sense el vostre suport constant res d'això hauria estat possible.

Als meus amics
Gràcies per ser aquell respir enmig del caos. Per les rialles, els cafès, els missatges de "tu pots" i per fer que tot aquest procés no es fes tan feixuc. Gràcies per recordar-me que hi ha vida més enllà del TFG.

Als meus avis
Als meus avis en Juan i l'Encarna, per inculcar-me valors que van molt més enllà d'aquest treball: l'esforç constant, la humilitat, el respecte i la importància de fer les coses bé encara que ningú estigui mirant. Per ensenyar-me, amb el vostre exemple, a no rendir-me i a tirar endavant amb honestedat i compromís.

Al meu tutor, Tomás De Urrengoechea
Gràcies per la paciència, la guia i el temps dedicat. Per saber orientar-me quan estava perdut i per ajudar-me a tirar endavant aquest treball amb criteri i confiança.

A mi mateix
Per tot el camí recorregut fins arribar aquí. Per les hores d'esforç, per la constància fins i tot en aquells dies en què no venia gens de gust, i per no rendir-me quan les coses es complicaven. Per haver sabut gestionar l'estrès, els dubtes i els moments de bloqueig, i tot i així continuar endavant a poc a poc.
També per confiar, encara que a vegades fos difícil, que seria capaç d'acabar-ho. Aquest treball no només representa un èxit acadèmic, sinó també una prova personal de perseverança i superació. Mirant enrere, tot l'esforç ha valgut la pena.

Gràcies a tots per formar part d'aquest camí.

Iker Cárdenas