UAB
Universitat Autònoma de Barcelona

Impacte de les noves tecnologies del cockpit: glass cockpit, automatització i la seva influència en el rol del pilot

Comparació entre Airbus A320 (CEO/NEO) i Boeing 737 (NG/MAX)

Memòria del Treball Fi de Grau en Gestió Aeronàutica

Realitzat per
Edgar Martinez Blanquez

Dirigit per
Sergi Manzano Teixido

Escola d'Enginyeria

Sabadell, Juny de 2026

El sotasignat, Sergi Manzano Teixidó director 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

Edgar Martinez Blanquez

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

MANZANO TEIXIDO SERGI - 46417091D

Digitally signed by MANZANO TEIXIDO SERGI - 46417091D
Date: 2026.06.25 20:16:40 +02'00'

Signat: Sergi Manzano Teixidó

FITXA RESUM – TREBALL DE FI DE GRAU DE L'ESCOLA D'ENGINYERIA

Títol del Treball de Fi de Grau: Impacte de les noves tecnologies del cockpit: glass cockpit, automatització i la seva influència en el rol del pilot - Comparació entre Airbus A320 (CEO/NEO) i Boeing 737 (NG/MAX)	
Autor/a: Edgar Martinez Blanquez	**Data**: Juny 2026
Tutor/a(s): Sergi Manzano	
Titulació: Grau en Gestió Aeronàutica	
Paraules clau (mínim 3): Català: Automatització, glass cockpit, factors humans, seguretat operacional, càrrega de treball, interfície home-màquina (HMI), Airbus A320, Boeing 737. Castellano: Automatización, glass cockpit, factores humanos, seguridad operacional, carga de trabajo, interfaz hombre-máquina (HMI), Airbus A320, Boeing 737. English: Automation, glass cockpit, human factors, operational safety, workload, human-machine interface (HMI), Airbus A320, Boeing 737.	
Resum del Treball de Fi de Grau (extensió màxima 100 paraules): Català: Aquest treball analitza l'impacte de la modernització del cockpit en l'aviació comercial, centrant-se en la transició cap al glass cockpit, l'augment de l'automatització i la transformació del rol del pilot. A través d'una comparació tècnica entre l'Airbus A320 (CEO/NEO) i el Boeing 737 (NG/MAX), s'examinen diferències de filosofia de disseny, nivells d'automatització, interfícies home-màquina i implicacions operatives. L'estudi incorpora documentació oficial, bibliografia tècnica i una entrevista a un pilot amb experiència en ambdues famílies d'aeronaus. Castellano: Este trabajo analiza el impacto de la modernización del cockpit en la aviación comercial, centrándose en la transición hacia el glass cockpit, el aumento de la automatización y la transformación del rol del piloto. A través de una comparación técnica entre el Airbus A320 (CEO/NEO) y el Boeing 737 (NG/MAX), se examinan diferencias de filosofía de diseño, niveles de automatización, interfaces hombre-máquina e implicaciones operativas. El estudio incorpora documentación oficial, bibliografía técnica y una entrevista a un piloto con experiencia en ambas familias de aeronaves. English: This project analyzes the impact of cockpit modernization in commercial aviation, focusing on the transition toward the glass cockpit, the increase in automation, and the transformation of the pilot's role. Through a technical comparison between the Airbus A320 (CEO/NEO) and the Boeing 737 (NG/MAX), differences in design philosophy, levels of automation, human-machine interfaces, and operational implications are examined. The study incorporates official documentation, technical literature, and an interview with a pilot experienced in both aircraft families.	

Índex

1.INTRODUCCIÓ I PLANTEJAMENT DEL TREBALL..... 10
1.1 Context i justificació del treball..... 10
1.2 Objectius de la investigació..... 11
1.3 Pregunta de recerca..... 11
1.4 Metodologia..... 12
1.5 Estructura del treball..... 12
2.EVOLUCIÓ TECNOLÒGICA EN L'AVIACIÓ COMERCIAL..... 13
2.1 Evolució dels sistemes de l'avió..... 13
2.2 Digitalització de l'aviònica..... 16
Aparició de l'aviònica digital..... 16
Integració de sistemes..... 16
Introducció de sistemes com EFIS i FMS..... 17
Sistemes de navegació avançats..... 17
2.3 Tendència cap a l'automatització..... 18
Evolució dels sistemes automàtics..... 18
Autopilot i autothrust..... 18
Fly-by-wire i increment de la complexitat tecnològica..... 19
Eficiència operativa..... 20
Seguretat operacional..... 20
Reducció de tripulació..... 20
3.MODERNITZACIÓ DEL COCKPIT I APARICIÓ DEL GLASS COCKPIT..... 22
3.1 Cockpit analògic..... 22
3.2 Aparició dels primers sistemes digitals (EFIS i FMS)..... 24
3.3 Aparició del glass cockpit..... 25
3.4 Sistemes principals..... 28
3.5 Avantatges i limitacions estructurals..... 31
4. AUTOMATITZACIÓ I FILOSOFIES DE DISSENY EN LA INDÚSTRIA AERONÀUTICA..... 33
4.1. Conceptes d'automatització: Nivells d'intervenció i autoritat..... 33
Nivells d'automatització..... 33
Autoritat del sistema vs pilot..... 34
Interacció humà-màquina..... 34
4.2.Enfocament d'Airbus..... 35
Tecnologia Fly-by-Wire (FBW) amb control per sidestick..... 36
Proteccions de l'envolupant de vol..... 36
Filosofia de protecció del sistema i la subordinació humana..... 37
4.3.Enfocament de Boeing..... 39
5.IMPLEMENTACIÓ DE LES NOVES TECNOLOGIES EN AERONAUS COMERCIALS..... 43
5.1.Airbus A320 (CEO vs NEO)..... 43
5.2.Boeing 737 (NG vs MAX)..... 46

6.IMPACTE DE LA MODERNITZACIÓ I EVOLUCIÓ DEL ROL DEL PILOT (ANÀLISI PRÀCTICA)..... 50
6.1. De pilot manual a gestor de sistemes (Càrrega de treball i automatització). 50
6.2. Consciència situacional i dependència de l'automatització.....51
6.3. Seguretat operacional i nous reptes.....51
6.4. El futur de la professió: Single Pilot i autonomia..... 52
7.CONCLUSIONS..... 54
8. REFERÈNCIES I CITES FOTOGRÀFIQUES..... 57
Annex: Entrevista a pilot de Boeing 737 i Airbus A320..... 61

Índex de figures i taules

Figura 1. Cabina del De Havilland Comet 4C, versió final.....13
del primer avió comercial de reacció. Font: Schultz (2010).....13
Figura 2. Tipus de trajectòries: Convencional, RNAV i RNP.....17
Font: Macías, R. P. (2016).....17
Figura 3. Cockpit Cessna 172 Font: Pucci, M. (2008).....22
Figura 4. Cockpit Boeing 737-200.....22
Font: Ryabtsev, S. (2009).....22
Figura 5. Cockpit híbrid Boeing 737-500. Font: Krebs (2008).....24
Figura 6. Horitzó artificial de reserva analogic. Font: Honeywell Aerospace (s.f.)....25
Figura 7. Horitzó artificial de reserva digital. Font: Funforme3 (2018).....25
Figura 8. Primary Flight Display d'Airbus A320.....27
Font: FlyByWire Simulations (n.d.).....27
Figura 9. Navigation Display d'Airbus A320. Font: IVAO (n.d.).....29
Figura 10. ECAM d'Airbus. Nivel de Vuelo 350. (2021).....31
Figura 11. EICAS de Boeing. SkyBrary. (s.f.).....31
Figura 12. Sidestick d'Airbus A318 d'Air France. Font: Ossadzow (2004).....37
Taula 1. Resum de les lleis de vol (Flight Laws)
d'Airbus i el seu nivell de protecció.....39
Figura 13. Yoke de Boeing 737NG. Font: Hulko (2025).....41
Taula 2. Resum dels estats d'automatització en Boeing.....42
Figura 14. Versió inicial del cockpit de l'Airbus A320 Font: Airbus (2019).....44
Figura 15. Versió actual del cockpit de l'Airbus A320. Font: Airbus (s.f.).....44
Figura 16. Cockpit de Boeing 737 NG. Font: Beltyukov (2011).....46
Figura 17. Cockpit de Boeing 737 MAX. Font: Funforme3 (2018).....47
Figura 18. Comparació entre motors i puntes d'ala de.....48
B737NG i B737 MAX. Font: Leeham News (2025).....48

Glossari de sigles i acrònims

AP (Autopilot): Pilot Automàtic.

A/THR (Autothrust): Impulsió Automàtica / Sistema de control automàtic de la potència dels motors.

CEO (Current Engine Option): Opció de Motor Actual (versions tradicionals de la família Airbus A320).

CO2 (Carbon Dioxide): Diòxid de Carboni.

CRT (Cathode Ray Tube): Tub de Raigs Catòdics (pantalles antigues de televisió o monitor).

CRM (Crew Resource Management): Gestió de Recursos de la Tripulació.

EASA (European Union Aviation Safety Agency): Agència de la Unió Europea per a la Seguretat Aèria.

ECAM (Electronic Centralised Aircraft Monitor): Monitor Electrònic Centralitzat de l'Aeronau (sistema propi d'Airbus).

EFIS (Electronic Flight Instrument System): Sistema Electrònic d'Instruments de Vol.

EICAS (Engine Indicating and Crew Alerting System): Sistema d'Indicació de Motor i Alerta a la Tripulació (sistema propi de Boeing).

E/WD (Engine/Warning Display): Pantalla de Motors i Advertències (part de l'ECAM d'Airbus).

FAA (Federal Aviation Administration): Administració Federal d'Aviació.

FBW (Fly-by-Wire): Vol per fil / Guiatge per ordres elèctriques.

FMS (Flight Management System): Sistema de Gestió de Vol.

GPS (Global Positioning System): Sistema de Posicionament Global.

GS (Ground Speed): Velocitat respecte a Terra.

HMI (Human-Machine Interface): Interfície Humà-Màquina.

HSI (Horizontal Situation Indicator): Indicador de Situació Horitzontal (instrument analògic).

IAS (Indicated Airspeed): Velocitat de l'Aire Indicada.

ILS (Instrument Landing System): Sistema d'Aterratge Instrumental.

INS (Inertial Navigation System): Sistema de Navegació Inercial.

ISIS (Integrated Standby Instrument System): Sistema Integrat d'Instruments de Reserva.

LCD (Liquid Crystal Display): Pantalla de Cristall Líquid.

LED (Light Emitting Diode): Díode Emissor de Llum.

MAX: Nom comercial de la darrera generació del Boeing 737 (fa referència a la màxima optimització del model).

MCAS (Maneuvering Characteristics Augmentation System): Sistema d'Augment de les Característiques de Maniobra (sistema crític del B737 MAX).

MFD (Multi-Function Display): Pantalla Multifunció.

ND (Navigation Display): Pantalla de Navegació.

NDB (Non-Directional Beacon): Radiofar No Directiu.

NEO (New Engine Option): Opció de Nou Motor (versions modernes de la família Airbus A320).

NG (Next Generation): Pròxima Generació (nom de la tercera generació del Boeing 737: -600, -700, -800, -900).

PBN (Performance-Based Navigation): Navegació Basada en Prestacions.

PFD (Primary Flight Display): Pantalla Principal de Vol.

RNAV (Area Navigation): Navegació d'Àrea.

RNP (Required Navigation Performance): Rendiment de Navegació Requerit.

SD (System Display): Pantalla de Sistemes (part de l'ECAM d'Airbus).

TAS (True Airspeed): Velocitat Vertadera de l'Aire.

TCAS (Traffic Collision Avoidance System): Sistema d'Evitació de Col·lisions de Trànsit Aeri.

VHF (Very High Frequency): Freqüència Molt Alta.

VOR (VHF Omnidirectional Range): Radiofar Omnidireccional VHF.

1.INTRODUCCIÓ I PLANTEJAMENT DEL TREBALL

1.1 Context i justificació del treball

En les darreres dècades, l'aviació comercial ha experimentat una significativa evolució impulsada per la incorporació de noves tecnologies a les aeronaus, una de les àrees que més ha experimentat aquesta evolució és el cockpit. La transició des de cabines analògiques cap a entorns digitals, coneguts com a glass cockpit, juntament amb un alt nivell d'automatització, ha modificat profundament la manera com els pilots interactuen amb l'aeronau. Aquest treball busca analitzar l'impacte d'aquesta evolució tecnològica en el rol del pilot, prenent com a referència les dues famílies d'avions més utilitzades en l'aviació comercial actual: l'Airbus A320 i el Boeing 737, comparant tant les seves versions més antigues com les més modernes.

La introducció del glass cockpit i dels sistemes automatitzats ha permès millorar l'eficiència operativa, la seguretat operacional i la gestió de la càrrega de treball dels pilots. No obstant això, aquestes tecnologies també han generat canvis rellevants en la filosofia de disseny dels fabricants, especialment entre Airbus i Boeing, que adopten enfocaments diferents pel que fa a la interacció entre pilot i sistema. Mentre que Airbus prioritza la protecció activa mitjançant sistemes que poden limitar determinades accions del pilot, Boeing manté una filosofia basada en l'autoritat final del pilot, amb sistemes que informen però no impedeixen l'acció.

En aquest context, resulta necessari analitzar com aquests canvis tecnològics influeixen en el dia a dia dels pilots, tant en la presa de decisions com en la gestió de la seguretat i en la seva funció dins del cockpit.

1.2 Objectius de la investigació

Aquest treball presenta un objectiu principal general i diversos objectius específics. El principal objectiu és analitzar l'impacte dels avenços tecnològics de les cabines en les funcions del pilot en l'aviació comercial. Per assolir aquest objectiu es plantegen els següents objectius específics:

- Estudiar l'evolució des de sistemes analògics fins a sistemes digitals (*Glass cockpit*)
- Analitzar el concepte d'automatització i la seva aplicació en avions comercials moderns
- Comparar les diferents filosofies de disseny i automatització dels principals fabricants, Boeing i Airbus
- Analitzar les diferències entre versions dels dos models d'avió més utilitzats en l'aviació comercial, Airbus A320 CEO/A320 NEO i Boeing 737 NG/MAX
- Avaluar l'impacte d'aquestes tecnologies en la càrrega de treball, la presa de decisions i la seguretat operacional del pilot.

1.3 Pregunta de recerca

En quina mesura l'evolució cap al glass cockpit i l'increment de l'automatització han transformat les funcions del pilot en l'aviació comercial actual, en relació amb la presa de decisions, la seguretat i la càrrega de treball?

Aquesta pregunta de recerca permet orientar l'anàlisi del treball cap a la comprensió dels canvis en les tasques operatives del pilot dins d'un entorn cada vegada més automatitzat. D'aquesta manera, planteja la necessitat d'avaluar fins a quin punt aquests avenços tecnològics, a part de modificar les tasques operatives, també modifiquen el paper del pilot cap a una funció de supervisió, gestor de sistemes i responsable de la seguretat del vol.

1.4 Metodologia

Aquest treball es desenvoluparà mitjançant una metodologia qualitativa basada en una revisió bibliogràfica i una anàlisi comparativa. La revisió bibliogràfica permetrà establir el marc teòric sobre l'evolució del glass cockpit, l'automatització i la interacció pilot-sistema en l'aviació comercial. A partir d'aquest marc, es realitzarà una comparació entre els models Airbus A320 (CEO/NEO) i Boeing 737 (NG/MAX) per analitzar les diferències en la implementació tecnològica del cockpit i el seu impacte en el rol del pilot. De manera complementària, es realitzarà una entrevista a un pilot comercial amb experiència en els quatre models que s'analitzaran al treball, amb l'objectiu de reforçar i contrastar les conclusions obtingudes a partir de la part teòrica.

1.5 Estructura del treball

El treball s'estructura en diversos apartats. En primer lloc, es presenta el marc introductori que inclou el context, la justificació, els objectius del treball i la metodologia utilitzada.

Seguidament, s'analitza l'evolució tecnològica en l'aviació comercial, amb especial atenció al desenvolupament dels sistemes de l'aeronau i la seva progressiva digitalització.

A continuació, es desenvolupa la modernització del cockpit, especialment en la transició cap al glass cockpit i la integració de sistemes digitals, així com també les seves principals característiques i limitacions.

Posteriorment, s'estudien les diferents filosofies d'automatització i disseny utilitzades per Boeing i Airbus, analitzant les diferències en la interacció entre pilot i sistema i realitzant una anàlisi comparativa entre models representatius (A320 i B737).

Finalment, s'avalua l'impacte d'aquestes innovacions en les funcions del pilot, com la presa de decisions, la càrrega de treball i la seguretat operacional.

2.EVOLUCIÓ TECNOLÒGICA EN L'AVIACIÓ COMERCIAL

L'evolució tecnològica en el sector aeronàutic ha comportat una transformació progressiva dels sistemes de les aeronaus, des de solucions mecàniques i analògiques fins a entorns altament digitalitzats i integrats.

Aquesta evolució, a part de millorar la fiabilitat i el rendiment dels avions, també ha incrementat significativament la complexitat dels sistemes a bord.

En aquest apartat s'analitza aquesta evolució des d'un punt de vista tècnic, abordant el desenvolupament dels sistemes de l'avió, la digitalització de l'aviònica i la progressiva integració de l'automatització en l'operació, analitzant quins canvis han suposat per als pilots.

2.1 Evolució dels sistemes de l'avió

Pel que fa als sistemes de l'avió que permeten el funcionament i el control de l'aeronau, s'analitzarà la seva evolució a partir dels primers avions comercials, el desenvolupament dels sistemes mecànics i les millores en motors, aerodinàmica i sistemes.

En primer lloc, els primers avions comercials es caracteritzen per una gran dependència de sistemes mecànics i instruments analògics sense automatització. La tripulació havia de gestionar manualment la majoria de tasques operatives com els controls de vol, la navegació i la supervisió de sistemes, això implicava una elevada càrrega de treball amb una major possibilitat d'error humà.



Figura 1. Cabina del De Havilland Comet 4C, versió final *del primer avió comercial de reacció.* Font: Schultz (2010).

D'altra banda en els principis de l'aviació comercial els sistemes dels avions presentaven limitacions importants en relació amb la precisió i la integració de la informació, ja que cada instrument funcionava de manera independent, i això complicava el tenir una visió global de l'estat i dels paràmetres de l'aeronau. Per aquesta manca d'integració els pilots estaven obligats a interpretar múltiples fonts d'informació a la vegada.

Posteriorment, es va produir un desenvolupament progressiu en els sistemes mecànics i hidràulics, que va permetre millorar el control de l'aeronau reduint la càrrega de treball de la tripulació i incrementar la seguretat operativa disminuint el risc de fallades crítiques durant el vol. Inicialment, els sistemes mecànics funcionaven a partir d'un sistema de connexions físiques directes, com cables i politges que connectaven les superfícies de control de l'avió amb els comandaments del pilot, i per tant els pilots havien d'aplicar força física per controlar l'avió i això feia que en avions grans fos dur de controlar i amb menys precisió. Amb la introducció dels sistemes hidràulics la força dels moviments que s'aplicaven sobre els controls es podia amplificar mitjançant la pressió de fluids permetent als pilots controlar l'avió amb un menor esforç físic (Federal Aviation Administration, 2016).

Paral·lelament es van anar introduint millores en els sistemes de navegació i de comunicació de manera que s'aconseguia una gestió més segura i eficient de les rutes i una millor coordinació amb els serveis de control de trànsit aeri. Inicialment, la navegació es basava en referències visuals i en radioajudes bàsiques com el NDB (*Non-Directional Beacon*) que consisteix en el sistema més antic, basat en senyals d'ona mitjana, era poc precís i sensible a interferències. Posteriorment es va introduir el VOR (*VHF Omnidirectional Range*) que consisteix en una radioajuda molt més precisa que permetia al pilot determinar el radial, és a dir, la direcció magnètica des de l'estació emissora fins a l'avió mitjançant senyals VHF. Seguidament van aparèixer solucions més avançades com els sistemes de navegació inercial (INS), que permetien calcular la posició amb acceleròmetres i giroscopis sense dependre de radioajudes. El següent avenç ja es el que s'ha seguit utilitzant fins avui dia i tracta de sistemes basats en satèl·lits com el GPS, que ofereixen una precisió i una fiabilitat molt elevades en comparació als sistemes anteriors. Pel que fa a la comunicació es van introduir grans millores passant de sistemes més limitats a comunicacions per ràdio estructurades i més fiables que permetien una millor coordinació amb els serveis de control de trànsit aeri per adoptar una gestió més segura i eficient de les rutes aèries (Walsh, 2024).

Finalment es van donar avenços en els motors, específicament amb la introducció del motor a reacció que va suposar un gran canvi en l'aviació comercial. Anteriorment a aquests, els avions utilitzaven generalment motors de pistó amb hèlix que presentaven limitacions de velocitat i altitud. Els motors de reacció van permetre augmentar la velocitat de les aeronaus, l'altitud de vol i l'abast, és a dir es va poder augmentar el rang operatiu permetent operar rutes més llargues. A més, els motors a reacció presentaven una major eficiència a grans altituds i una major fiabilitat, i aquest canvi va contribuir a l'expansió de rutes intercontinentals (AviationGroup, n.d.).

2.2 Digitalització de l'aviònica

La digitalització de l'aviònica dels avions va suposar un punt d'inflexió en el desenvolupament tecnològic de les aeronaus comercials. A partir de la dècada dels 70 es van començar a substituir els sistemes analògics independents per equips digitals amb la capacitat de processar informació de manera més precisa, fiable i integrada. Aquesta transició va permetre reduir la dependència d'instruments electromecànics i va donar pas a l'aparició d'una nova generació de sistemes capaços de gestionar grans volums de dades en temps real.

Aparició de l'aviònica digital

Els primers sistemes digitals van introduir ordinadors a bord que tenien la capacitat de processar i monitoritzar la informació procedent de múltiples sensors. A diferència dels instruments analgics que funcionaven de manera aïllada, l'avinica digital aconseguia combinar i presentar dades de manera coherent i estructurada. Segons la FAA amb aquesta evolució es va poder millorar la precisió, la fiabilitat i la capacitat de diagnòstic dels sistemes de vol. Aquest canvi va ser un dels principals motius pels quals va començar la substitució progressiva dels instruments tradicionals per pantalles electròniques i sistemes computacionals més avançats.

Integració de sistemes

Un dels avenços més importants en aquesta evolució va ser la integració de sistemes, la qual va permetre centralitzar informació que anteriorment es trobava repartida per diferents fonts d'informació. Aquesta integració va facilitar una visió global de l'estat de l'avió, la detecció d'anomalies, va millorar la consciència situacional del pilot i va reduir la càrrega de treball. La coordinació entre sistemes de navegació, control de vol i rendiment va incrementar la coherència de les dades i va permetre una gestió més eficient de les operacions. Aquest procés d'integració va ser una de les bases en el desenvolupament dels *cockpits* moderns i per a la posterior aparició del *glass cockpit* que podem trobar en els avions més moderns actualment.

Introducció de sistemes com EFIS i FMS

La digitalització dels sistemes de l'aeronau va permetre incorporar sistemes avançats com *l'Electronic Flight Instrument System* (EFIS), que substitueix els diferents instruments analògics tradicionals per pantalles que integren la informació dels instruments, de navegació i d'altres paràmetres importants de manera configurable. Habitualment les pantalles s'organitzen en un primary Flight Display (PFD) i un *Multi-Function Display* (MFD), els quals ofereixen una presentació més clara i flexible, adaptada a les necessitats operatives de cada fase de vol (Skybrary, n.d.-b). Al mateix temps, el Flight Management System (FMS) que és considerat el cervell electrònic de l'avió, va esdevenir el nucli central de la gestió del vol, integrant dades de navegació, rutes i rendiment per calcular trajectòries òptimes i coordinar els diferents sistemes a bord. El FMS va transformar la manera en la qual es planifica i es supervisa el vol sent de gran importància en el desenvolupament dels cockpits digitals moderns (Skybrary, n.d.-d).

Sistemes de navegació avançats

Anteriorment a la introducció de la navegació àerea, les rutes dels avions es definien seguint radioajudes terrestres com NDB o VOR explicades en el punt 2.1, això obligava que les trajectòries de les rutes fossin menys directes i estiguessin limitades pels punts físics on s'ubicaven aquestes instal·lacions. Amb la incorporació del GPS es van poder superar aquestes restriccions i va fer possible l'adopció de la navegació àerea RNAV, la qual utilitza punts virtuals de manera que les rutes són molt menys limitants i més eficients al ser flexibles. Amb aquesta evolució va aparèixer el RNP, que és un subtipus avançat de RNAV més precís i controlat que s'utilitza en procediments específics. El RNP va afegir la capacitat de monitoratge i alerta de la pròpia precisió de navegació, d'aquesta manera, es va incrementar la seguretat i va permetre aproximacions més avançades. Aquests procediments habitualment es gestionen des del *Flight Management System* (FMS), el qual integra les dades de navegació i té la capacitat d'executar trajectòries definides digitalment. La combinació de la navegació per satèl·lit, RNAV i RNP constitueix avui un dels pilars fonamentals de l'aviació comercial moderna, i són els sistemes que s'utilitzen actualment en el dia a dia (Hispaviación, n.d.).

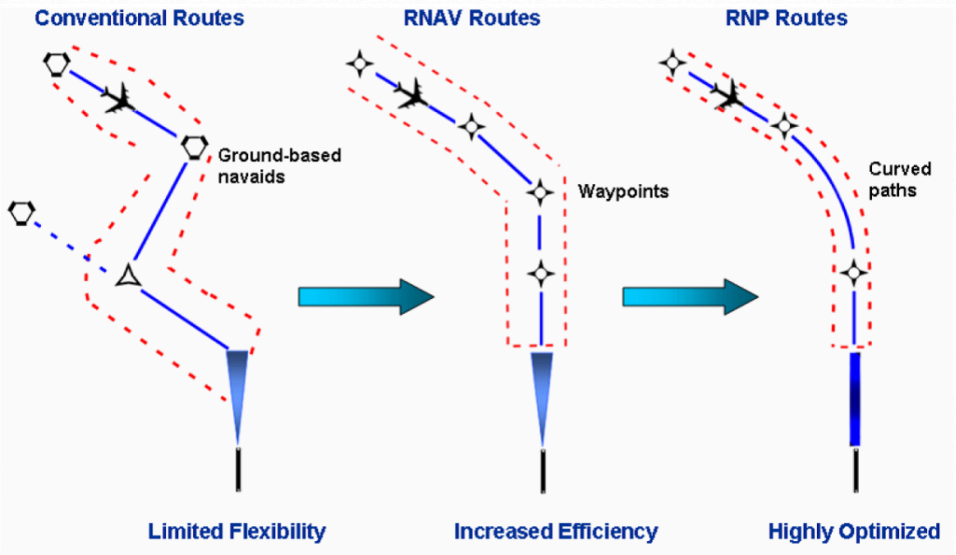

Figura 2. *Tipus de trajectòries: Convencional, RNAV i RNP.*
Font: Macías, R. P. (2016)

2.3 Tendència cap a l'automatització

Evolució dels sistemes automàtics

Amb la progressiva digitalització dels sistemes de bord es va poder introduir funcions automàtiques, és a dir, es va buscar automatitzar tasques que fins a aquell moment depenien únicament de la intervenció manual del pilot. Inicialment, els sistemes automàtics tenien un abast limitat i cobrien tasques senzilles com mantenir paràmetres bàsics com el rumb o l'altitud, però amb el temps es van anar desenvolupant sistemes amb capacitats més avançades que permetien gestionar tasques més importants i, fins i tot, fases completes de vol. Aquesta evolució va establir les bases de l'automatització que trobem actualment, amb sistemes que poden supervisar, optimitzar i ajustar de forma contínua i precisa diferents paràmetres de vol.

Autopilot i autothrust

Els sistemes *autopilot* i *autothrust* són dos dels pilars més importants de l'automatització en l'aviació comercial. Per una costat, *l'autopilot* també conegut com a pilot automatic s'encarrega de controlar l'actitud de l'aeronau, la trajectòria i la navegació a través de modes diferents que s'adapten a cada fase de vol. D'altra

banda, *l'autothrust* té la funció de regular i ajustar automàticament la potència dels motors per poder mantenir paràmetres com la velocitat o la taxa d'ascens desitjada.

Tot i el seu alt nivell de precisió, és important comentar que aquests sistemes no operen de forma completament autònoma, el pilot ha de seleccionar els modes de funcionament corresponents per a cada fase de vol. El FMS calcula la ruta i els perfils previstos a partir de la informació que el pilot ha introduït prèviament (Skybrary, n.d.-d), però són els modes que activa el pilot els que determinen si *l'autopilot* i *l'autothrust* segueixen les dades proporcionades pel sistema o les instruccions seleccionades manualment. D'aquesta manera, s'aconsegueix que l'automatització no substitueixi la presa total de decisions, sino que executi les ordres que estableix el pilot. Això ha fet que el seu rol evolucioni progressivament cap a una funció de supervisió i de gestió d'aquests sistemes automàtics.

Fly-by-wire i increment de la complexitat tecnològica

Amb la introducció del *fly-by-wire* va haver-hi un gran canvi en la manera en què es transmeten les ordres de control. Abans d'aquest sistema, els comandaments estaven connectats directament a les superfícies de control mitjançant cables, politges o sistemes hidràulics, per tant els moviments del pilot i la força que aplicava es transmetien de forma mecànica. Amb l'aparició del *fly-by-wire* es van substituir les connexions físiques per senyals electrònics que són processats pels ordinadors a bord (AN Aviation Services, 2017). Quan el pilot manipula els controls de l'aeronau, els sensors envien senyals elèctrics als ordinadors els quals interpreten l'ordre i fan actuar les superfícies de control com serien els alerons o el timó de direcció. Amb aquest canvi es va permetre aplicar lleis de control que limiten, filtren o modifiquen les ordres del pilot per mantenir l'avió dins dels marges de seguretat de manera que creix la precisió i la protecció del vol (Skybrary, n.d.-c). No obstant això, aquesta arquitectura va augmentar la complexitat tecnològica de la cabina ja que els pilots a part de comprendre el comportament de l'aeronau, ara també havien d'entendre la lògica amb què els sistemes automàtics interpreten i executen les seves ordres. Aquest canvi va obrir la porta a noves filosofies d'automatització que han marcat el desenvolupament dels avions moderns.

2.4 Impacte tecnològic en l'operació

Amb els avenços tecnològics incorporats durant les darreres dècades s'han observat unes conseqüències directes en diferents aspectes com en la manera de planificar, la de gestionar i la d'executar el vol. Aquest impacte es veu reflectit especialment en els següents tres àmbits: l'eficiència operativa, la seguretat i l'organització de la tripulació.

Eficiència operativa

Gràcies a la introducció de sistemes digitalitzats i automatitzats s'han optimitzat les rutes, reduint els desviaments i ajustant el consum de combustible segons les diferents condicions reals del vol. Amb l'ajuda d'eines com el *Flight Management System* (FMS) i la navegació basada en satèl·lits han permès millorar l'operació de l'avió, facilitant perfils d'ascens, creuer i descensos amb més precisió gràcies als quals es contribueix a una operació més eficient i a una reducció dels costos operatius.

Seguretat operacional

La integració de sistemes, la incorporació de pantalles digitals i les proteccions automàtiques han incrementat significativament la consciència situacional dels pilots a la cabina reduint la probabilitat d'errors humans, que són els causants aproximadament del 70% dels accidents aeris (Aviación INEC, n.d.). Sistemes com el fly-by-wire, les alertes de configuració o els avisos de situacions perilloses com la proximitat amb el terreny, conflictes de trànsit o de pèrdues de sustentació han permés detectar ràpidament possibles perills i corregir aquests riscos de manera més ràpida millorant la fiabilitat global del vol.

Reducció de tripulació

La digitalització de les dades i instruments i la supervisió automàtica dels sistemes van eliminar la necessitat de l'enginyer de vol, que era primordial en avions més antics com el De Havilland DH.106 Comet que apareix en el punt 2.1. Les tasques de l'enginyer de vol van passar a ser gestionades per ordinadors que s'encarregaven de monitoritzar paràmetres com els motors, els sistemes hidràulics,

elèctrics o el combustible. Aquest canvi va permetre reduir la quantitat de tripulació necessària a la cabina per operar el vol amb seguretat. A partir d'aquest canvi l'avió va passar a operar-se amb només dos pilots, establint el model de tripulació que es continua utilitzant en l'aviació comercial actual.

3.MODERNITZACIÓ DEL COCKPIT I APARICIÓ DEL GLASS COCKPIT

3.1 Cockpit analògic

El *cockpit* analògic va ser present a la gran majoria d'aeronaus comercials fins a finals del segle XX. Es caracteritzava per una disposició basada en instruments electromecànics independents, és a dir, cada instrument té la seva pròpia funció i no hi ha integració entre ells. Aquesta configuració habitualment coneguda com a *steam gauge cockpit* (cabina de rellotges analògics) feia que el pilot hagués d'estar revisant contínuament múltiples instruments distribuïts pel panell frontal, cada un aportant informació indispensable per poder volar amb seguretat. Els principals instruments indicaven els paràmetres bàsics com la velocitat, l'altitud, la velocitat vertical, el rumb i la posició de l'avió en referència a l'horitzó.

A causa de la fragmentació de la informació, la càrrega de treball visual i cognitiva era elevada, sobretot en fases crítiques del vol com l'enlairament i l'aproximació o a l'hora de gestionar emergències. Per poder obtenir una visió global clara de la situació del vol el pilot havia d'integrar mentalment dades procedents de diferents fonts separades i interpretar-les de manera ràpida però precisa. Aquest procés es coneix com a scan pattern, que consisteix en el moviment constant de la vista pels diferents instruments per evitar la fixació en un sol instrument i poder tenir una imatge clara de l'estat de l'avió assegurant que tots els paràmetres es mantinguin dins dels marges operatius.

La manca d'integració dificultava la ràpida detecció de qualsevol anomalia indicada per algun dels instruments que idealment s'hauria de detectar de forma immediata. Una desviació en un paràmetre crític podia passar desapercebuda si el pilot estava centrat en els altres instruments, això augmentava el risc i disminuïa el temps per actuar amb els procediments segurs, incrementava la dependència d'una atenció constant per part de la tripulació i feia que la gestió del vol fos més exigent i susceptible a errors humans.

En aquest context, les cabines analògiques amb desenes d'indicadors i commutadors quedaven amb una ergonomia i una rapidesa per accedir a la informació limitades. L'entorn operatiu era funcional però complex i això va acabar evidenciant la necessitat de tenir una cabina més integrada amb la disposició de la informació de forma més clara i eficient, impulsant l'aparició dels primers sistemes digitals.



Figura 3. *Cockpit Cessna 172*
Font: Pucci, M. (2008)



Figura 4. *Cockpit Boeing 737-200.*
Font: Ryabtsev, S. (2009).

A les Figures 3 i 4 superiors s'observen dues cabines analògiques de dues aeronaus diferents. a l'esquerra, Cessna 172, avió lleuger amb capacitat per a 4 persones amb una envergadura de 11 metres (European Flyers, n.d.), el més utilitzat per formar a pilots. A la dreta, Boeing 737-200, primeres generacions d'un dels reactors comercials de curt i mitjà radi més utilitzats avui en dia amb capacitat per a més de 100 passatgers i una envergadura de 28,35 metres (Boeing, 2023, p. 31).

Tot i les grans diferències en pes, mida i complexitat, les dues cabines comparteixen la mateixa filosofia analògica basada en els instruments electromecànics independents. Els instruments principals: velocímetre, altímetre, horitzó artificial, variòmetre, giroscopi direccional i coordinador de gir, proporcionen la informació essencial per al control del vol i de l'aeronau i mantenen una disposició molt semblant en els dos avions. Aquesta similitud demostra que abans de la digitalització, les bases del control de l'aeronau eren comunes a tota l'aviació. Per aquest motiu la Cessna 172 analògica continua sent un dels models més utilitzats

en escoles de vol per a la formació inicial dels pilots, ja que permet aprendre els fonaments de vol i la interpretació dels instruments sense assistència automatitzada.

3.2 Aparició dels primers sistemes digitals (EFIS i FMS)

L'arribada dels primers sistemes digitals a la cabina va ser el pas inicial d'un canvi progressiu en la manera en com els pilots interpretaven i accedien a la informació del vol. La cabina seguia sent generalment analògica, però es van incorporar petites pantalles electròniques que permetien presentar paràmetres bàsics de manera més concentrada, estant lluny d'una integració completa. Aquestes primeres pantalles associades als sistemes EFIS, introduïdes a l'apartat 2.2, oferien als pilots una presentació més estructurada de paràmetres essencials, de manera que es podia anar reduint la necessitat constant de supervisar un gran nombre d'indicadors simultàniament (Skybrary, n.d.-b). Paral·lelament amb la incorporació del FMS, es va modificar la manera d'interactuar entre el pilot i la gestió del vol canviant l'enfocament, anteriorment es basava en ajustos manuals continus mentre que amb el FMS el model es va començar a orientar més cap a la supervisió i verificació de la informació presentada (Skybrary, n.d.-d).

En aquesta etapa no constituïa encara un glass cockpit com els actuals, però sí va establir les bases d'una nova filosofia de cabina, de manera que fos més coherent i amb una càrrega de treball visual progressivament menor. Els petits canvis i modernitzacions van ser el pas intermedi entre les cabines analògiques originals i els *cockpits* digitals que trobem avui en dia.



Figura 5. *Cockpit híbrid Boeing 737-500.* Font: Krebs (2008).

A la Figura 5 superior s'observa el cockpit d'un Boeing 737-500, un exemple representatiu de la primera generació de cabines híbrides. Tot i seguir tenint la majoria dels instruments analògics, incorpora pantalles EFIS que substitueixen parcialment l'horitzó artificial tradicional per un digital i a sota el *Navigation Display* (ND), on es mostra de manera digital la ruta i la informació de navegació. En comparació amb la cabina del Boeing 737-200 del punt anterior, la qual utilitzava un horitzó artificial analògic i sota en contes del ND, hi trobem un HSI, l'instrument analògic que combina rumb i informació de navegació. El Boeing 737-500 exemplifica de manera molt clara el pas intermedi cap a la digitalització moderna.

3.3 Aparició del glass cockpit

L'evolució progressiva des de les cabines analògiques passant pels primers sistemes digitals va culminar amb l'aparició del *glass cockpit*, una nova filosofia de cabina que es basa en pantalles totalment electròniques i amb una organització de la informació molt més coherent. Les cabines híbrides anteriors a diferència de les *glass cockpit*, tenien les pantalles limitades i, a més, havien de conviure amb un gran nombre d'instruments analògics. En les cabines digitals, es substitueix la major part dels instruments tradicionals per pantalles amb multifunció que es poden

adaptar a cada fase de vol mostrant tota la informació necessària de forma integrada. Tot i que el glass cockpit substitueixi la major part dels instruments tradicionals del panell frontal, es mantenen sistemes d'instruments de reserva (standby) totalment independents, que inclouen l'horitzó artificial, l'indicador de velocitat i l'altímetre. Mentre que a les primeres generacions de glass cockpit aquests instruments standby eren mecànics o analògics com en el Boeing 737NG o les primeres versions de l'Airbus A320 CEO. En les aeronaus més modernes actualment s'utilitzen sistemes digitals compactes d'emergència com el ISIS (Integrated Standby Instrument System), per garantir una referencia redundant en cas de fallada electrònica o elèctrica dels sistemes principals. Aquest sistema es troba en els avions més moderns com el Boeing 737 MAX i Airbus A320 CEO posteriors i els actuals A320 NEO. Com s'observa a les següents imatges, a l'esquerra podem veure una part ampliada del panell del Boeing 737NG on, tot i ser *glass cockpit*, té l'horitzó artificial standby analògic i a la dreta trobem el panell del Boeing 737 MAX on l'horitzó artificial *standby* es completament digital.



Figura 6. *Horitzó artificial de reserva analògic*. Font: Honeywell Aerospace (s.f.).



Figura 7. *Horitzó artificial de reserva digital*. Font: Funforme3 (2018).

Aquesta evolució tecnològica no només va afectar a la configuració física de la cabina, sinó també la manera en què es presenta la informació i com s'ha d'interpretar per part del pilot, al estar gestionada i organitzada de forma diferent. Això va donar lloc a una nova filosofia operativa que es centrava en la integració i la coherència de les dades. Les pantalles permeten mostrar dades contextuals,

destacar avisos i alertes importants i l'adaptació automàtica de la informació segons l'etapa del vol.

Aquesta flexibilitat en la presentació de les dades va derivar en la reconfiguració completa del panell frontal a través de sistemes visuals com l'EFIS, comentats prèviament des del punt de vista tecnològic en l'apartat 2.2. L'aparició d'aquest sistema a la cabina va permetre que unitats com el PFD o el *Navigation Display* oferissin un espai visual net amb la informació crítica situada a la línia de visió del pilot. Així es va alleugerir la saturació d'elements del quadre principal optimitzant la interacció i la distribució de tasques a la cabina.

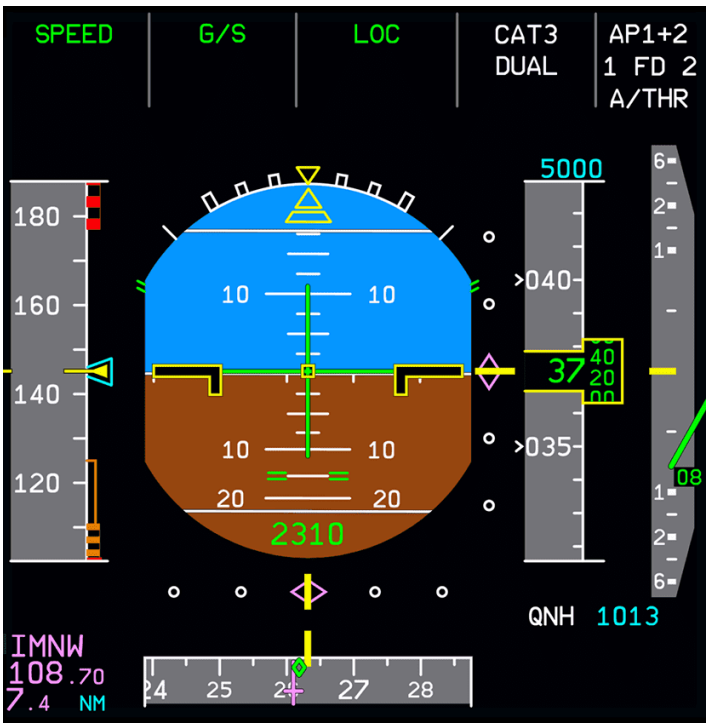

Figura 8. *Primary Flight Display d'Airbus A320*.
Font: FlyByWire Simulations (n.d.).

En la figura 8 es pot observar el PDF (*Primary Flight Display*) d'un Airbus A320, en el cas específic de la imatge mostra la fase d'aproximació instrumental (ILS). El PFD unifica els principals paràmetres necessaris per al vol. Al centre es situa l'horitzó artificial que indica l'actitud de l'aeronau (La part blava representa el cel i la marró el terra), a la part esquerra es troba la velocitat indicada (IAS) presentada amb una

cinta vertical dinàmica, a la banda dreta es mostren de forma paral·lela l'altitud en peus i el variòmetre que indica la taxa o velocitat en la que l'avió ascendeix o descendeix, i finalment, a la part inferior trobem el rumb magnètic. A part de centralitzar els instruments bàsics, el gran avantatge ergonòmic del *glass cockpit* en comparació amb els més tradicionals analitzats als apartats 3.1 i 3.2, consisteix en la capacitat de presentar la informació contextual de l'avió en temps real en un mateix punt de visió, ja que totes les dades es van actualitzant dinàmicament a la vegada. Per tant, es simplifica molt l'antic scan pattern que s'havia de fer revisant totes les dades que es trobaven en punts diferents del panell, estalviant al pilot haver de realitzar càlculs mentals complexos o haver de estar canviant la mirada contínuament, actualment es pot conèixer la situació global de l'aeronau en pràcticament un sol cop d'ull (Skybrary, n.d.-b).

3.4 Sistemes principals

Després de comprendre el que va suposar la transició conceptual cap a la cabina digital, és de vital importància analitzar els sistemes concrets que formen part d'aquest nou entorn operatiu. Dins dels sistemes principals de vol, el nucli visual el constituiria l'EFIS, el qual està format per dues pantalles, el PFD (*Primary Flight Display*) i el ND (*Navigation Display*). Per naturalesa tècnica el PFD s'hauria de descriure en aquest apartat com un dels principals components del sistema, però s'ha optat per explicar-se en el punt 3.3 pel fet de ser l'exemple perfecte per contextualitzar gràficament la transició operativa i la simplificació del *scan pattern*. Al costat del PFD es troba la segona pantalla principal de l'EFIS anomenada *Navegation Display* (ND), que s'encarrega d'elevar la consciència espacial del pilot al mostrar de forma gràfica i dinàmica un mapa amb la trajectòria de l'avió, els way points (punts de pas), i les rutes a seguir que prèviament s'han introduït i definit en el FMS (Flight Management System). El ND també té la capacitat d'integrar les dades del radar meteorològic en temps real i del TCAS que és el sistema de prevenció de col·lisions. D'aquesta manera es permet als pilots anticipar qualsevol amenaça geogràfica o climatològica amb un sol cop d'ull (Skybrary, n.d.-b).



Figura 9. *Navigation Display d'Airbus A320.* Font: IVAO (n.d.).

A la Figura 9 trobem el ND d'un Airbus A320, aquesta interfície transforma els antics indicadors d'agulles en un mapa digital en temps real. En aquest exemple s'aprecia l'avió (símbol groc al centre de la part inferior), la línia contínua verda representa la ruta activa programada al FMS. Al llarg de la ruta es poden veure els diferents waypoints representats pels diamants verds i roses. A la part superior trobem un arc de rumbs dinàmic i, a les cantonades inferiors es poden llegir les radioajudes (VOR). Finalment a la part superior esquerra trobem les velocitats: GS (Ground speed), que és la velocitat respecte al terra, i la TAS (True Airspeed), que és la velocitat vertadera.

La digitalització de les cabines no només es va limitar a les pantalles de control de vol i de navegació, també va transformar el monitoratge dels paràmetres de motor i de sistemes interns de l'avió, com l'hidràulic, l'elèctric i el pneumàtic. Aquesta informació passa a trobar-se en dues pantalles en comptes de fer-ho en un gran nombre de rellotges diferents. Aquestes pantalles centralitzen un gran nombre de

dades i també s'encarreguen de la gestió d'alertes, les quals van evolucionar sota dues filosofies de disseny dels dos principals fabricants Airbus i Boeing.

Airbus va desenvolupar l'ECAM (Electronic Centralised Aircraft Monitor). Es tracta d'un sistema proactiu que actua com un filtre d'informació per als pilots. En condicions normals, l'ECAM només mostra els paràmetres bàsics de motor, però en el cas que sorgeixi alguna anomalia, el sistema s'activa automàticament per presentar el diagrama gràfic de l'arquitectura afectada, per exemple si hi hagués algun problema en el circuit elèctric, es mostraria en l'ECAM en vermell per poder identificar on s'ha produït la fallada. També mostra en mode de text les *checklists* que contenen els passos exactes que s'han de seguir per solucionar l'emergència. Per tant, en la pantalla superior (E/WS, Engine/Warning Display) trobaríem informació com la configuració dels flaps, la quantitat de combustible, missatges informatius o els paràmetres de motor i anomalies ja comentats. En la pantalla inferior (SD, System Display) trobaríem diferent informació depenent de la fase del vol (taxi, enlairament, creuer…) o quan el pilot la seleccioni manualment. Aquesta pantalla mostra diagrames visuals de 12 sistemes de l'avió com podrien ser paràmetres secundaris de motor com informació sobre l'oli o vibracions, la pressurització de la cabina, informació sobre el flux i la distribució de combustible en els diferents dipòsits, l'estat de les portes de passatgers i de les bodegues de càrrega i en general de tota la informació global de tots els sistemes de l'avió (Skybrary, n.d.-a).

D'altra banda Boeing va desenvolupar l'EICAS (Engine Indicating and Crew Alerting System). Estructuralment també utilitza dues pantalles però la seva filosofia operativa és molt més conservadora. La pantalla superior mostra de forma permanent els paràmetres crítics del funcionament dels motors com revolucions o consum de combustible, també mostra un llistat cronològic de missatges d'alerta codificats amb un sistema de colors segons la seva gravetat, per exemple vermell per advertències crítiques, taronja per a missatges de precaució i blanc per a missatges informatius. La pantalla inferior té una funció similar a la del ECAM, mostrant paràmetres secundaris de motor i diagrames dels sistemes de l'aeronau. No obstant això, la diferència fonamental de filosofía es troba en la manera de gestionar les anomalies. Mentre que l'ECAM d'Airbus és proactiu i mostra de forma

interactiva les checklists a seguir amb els procediments pas a pas, l'EICAS es limita només a avisar de la fallada. És a dir, Boeing manté la filosofía tradicional de que el sistema només ha de diagnosticar el problema, i els pilots són els responsables de buscar i executar manualment els procediments de resolució mitjançant les llistes de verificació o els manuals (SkyBrary, s.f.).

A les Figures 10 i 11 es mostren exemples dels sistemes ECAM d'Airbus i EICAS de Boeing, on es poden observar les diferències de disseny i de filosofia operativa descrites.



Figura 10. *ECAM d'Airbus.* Nivel de Vuelo 350. (2021)



Figura 11. *EICAS de Boeing.* SkyBrary. (s.f.)

3.5 Avantatges i limitacions estructurals

Avantatges

Un dels principals avantatges és la reducció d'elements físics i mecànics. Al substituir-se els instruments electromecànics per pantalles i ordinadors, es redueix el nombre de components que poden patir desgast, vibracions o descalibracions, de manera que es simplifica el manteniment i es millora la fiabilitat global del sistema.

Un altre avantatge és la modularitat. Els entorns digitals permeten que elements com les pantalles, els processadors o els busos de comunicació es puguin substituir i actualitzar de forma independent sense la necessitat de redissenyar gran part de l'arquitectura física de la cabina. Això facilita les modernitzacions parcials i allarga la vida útil de l'aeronau.

Finalment, un altre dels principals avantatges és la arquitectura distribuïda: El *glass cockpit* té un disseny basat en ordinadors redundants que comparteixen informació en temps real a través de busos de dades digitals, això permet que en cas de fallada d'un mòdul, els altres sistemes puguin assumir les seves funcions incrementant la tolerància a fallades.

Limitacions

La principal limitació és la dependència d'una infraestructura electrònica complexa. Tot i l'alt nivell de redundància, una anomalia en un processador central o en una font d'alimentació podria afectar múltiples pantalles o funcions simultàniament.

Una altra limitació important és la necessitat de certificació i validació del programari. Qualsevol modificació en el codi per petita que sigui requereix processos estrictes de verificació per part de les autoritats aeronàutiques, com l'EASA o la FAA per assegurar la inexistència d'errors latents. Això incrementa considerablement el cost i la complexitat del manteniment

Finalment, per la concentració d'informació en les pantalles, és necessari disposar de sistemes de reserva independents, com els ja comentats instruments *standby*, els quals han de mantenir-se operatius de forma autònoma davant de casos com una fallada elèctrica total. Aquesta redundància afegeix cost i complexitat al disseny original.

4. AUTOMATITZACIÓ I FILOSOFIES DE DISSENY EN LA INDÚSTRIA AERONÀUTICA

L'automatització en les cabines modernes d'avui en dia no es limita només a l'execució de tasques repetitives o mecàniques sinó que representa una nova definició del paper de la tripulació a bord. Un cop analitzada l'evolució tecnològica i física cap al *glass cockpit* és fonamental entendre la lògica interna i els criteris de disseny operatiu que regeixen el comportament del sistema. En aquest capítol es plantegen els conceptes teòrics de la interacció entre l'humà i la màquina i es comparen les dues grans filosofies de disseny que divideixen la indústria aeronàutica mundial, l'enfocament d'Airbus i l'enfocament de Boeing

4.1. Conceptes d'automatització: Nivells d'intervenció i autoritat.

L'automatització es pot definir com un ventall continu on es distribueix el control entre la màquina i l'humà. Per entendre com interactuen els dos actors comentats, s'ha d'analitzar de quina manera es reparteix l'autoritat de control i com es gestiona la comunicació entre els pilots i els sistemes de l'avió

Nivells d'automatització

En la cabina d'un avió l'automatització no actua de manera binària, és a dir, no està connectada o desconnectada, sinó que està estructurada a través de diferents graus d'integració que els pilots seleccionen depenent de les necessitats de cada moment específic del vol. Aquests graus es poden classificar en tres nivells principals (Airbus, 2004, p. 5):

-Nivell manual / control directe: El pilot té la responsabilitat física de controlar l'avió. Les accions aplicades sobre els comandaments es transformen en moviments immediats de les superfícies de control i la potència dels motors es gestiona amb les palanques de forma manual sense la intervenció de guies automàtiques.

-Nivell d'automatització tàctica: El pilot manté el control de la trajectòria de l'avió a curt termini, però l'execució física es delega els sistemes de vol. Els pilots

introdueixen els valors numèrics específics necessaris com el rumb, l'altitud o la velocitat i l'avió obeeix l'ordre, generant un canvi immediat, però l'estratègia operativa és liderada per la tripulació minut a minut.

-Nivell d'automatització estratègica: El pilot delega la gestió de la trajectòria de l'avió a llarg termini al *Flight Management System* (FMS). Abans del vol el pilot ha d'introduir manualment la ruta al pla de vol, els ordinadors de l'aeronau calculen de forma autònoma paràmetres importants com els perfils òptims d'ascens, creuer i descens, amb les modificacions pertinents en temps real de rumb i de potència per poder optimitzar el consum. El paper del pilot en aquest nivell canvia radicalment, passant a ser un supervisor estratègic del sistema.

Autoritat del sistema vs pilot

En la història aeronàutica i aeroespacial un dels debats d'enginyeria més complexos és el repartiment de l'autoritat, és a dir, quin dels dos actors té l'última paraula i la capacitat de bloquejar o anul·lar les accions de l'altre quan l'avió entra en un punt crític en arribar als límits estructurals o aerodinàmics, com passa amb una pèrdua de sustentació o un sobrepàs en el límit de velocitat.

L'autoritat compartida en condicions normals permet ajudar a suavitzar el vol i minimitzar desviacions, el dilema principal apareix en els escenaris crítics, on s'ha de determinar qui té la potestat final d'imposar el seu criteri com a definitiu en una situació d'emergència. Un dels principals models és donar-li autoritat restrictiva al sistema, per tant l'ordinador de l'avió tindria el poder de bloquejar o ignorar una acció del pilot si el sistema considera que pot posar en perill la integritat de l'avió. L'altre model principal es prioritzar l'autoritat del pilot sense restriccions on els sistemes estan dissenyats per poder advertir, emetre alertes crítiques o posar certa resistència però sense arribar a bloquejar físicament el comandament de manera que el criteri del pilot ha de prevaler qualsevol decisió dels sistemes de l'aeronau.

Interacció humà-màquina

La interfície humà-màquina també coneguda com a HMI (*Human-Machine Interface*) constitueix el canal bidireccional de comunicació a la cabina (Skybrary, n.d.-e). El

seu objectiu principal és aconseguir que la tripulació sigui conscient i entengui en tot moment l'estat dels automatismes i la lògica amb la qual estan operant. Aquest concepte en psicologia aeronàutica es coneix com a consciència de mode, que consisteix en tenir la capacitat de saber quins modes estan actius per poder saber què farà l'avió a continuació i poder anticipar el seu comportament.

Quan la interacció HMI falla i no transmet la informació de manera clara, pot aparèixer el fenomen conegut com a mode de confusió. Aquest fenomen es produeix quan els pilots interactuen amb el sistema creient que l'automatització està actuant sota una lògica determinada com per exemple mantenint una altitud, quan en realitat l'ordinador està executant un mode diferent, com podria ser capturant una taxa de descens. Si el disseny visual o auditiu de la cabina no indica aquests canvis de manera clara i transparent es pot generar una pèrdua important de la consciència situacional que podria convertir un sistema que s'ha dissenyat per garantir la seguretat del vol en una possible font de risc operacional (ICAO, 2012, p. 2).

4.2.Enfocament d'Airbus

Airbus es va fundar com un consorci europeu l'any 1970 per competir amb els gegants estatunidencs com Boeing o McDonnell Douglas. L'empresa europea ha esdevingut un dels pilars fonamentals del duopoli en l'aviació comercial. L'evolució d'Airbus no ha estat només comercial sinó que també ha estat conceptual, introduint la seva filosofia on l'automatització té el paper principal en la gestió de la seguretat.

La filosofia de disseny d'Airbus es basa en la idea que l'automatització avançada és el mètode més eficaç per optimitzar l'eficiència operativa i per reduir l'error humà que és el principal motiu dels accidents aeris. A diferència d'altres fabricants, Airbus concep els ordinadors de l'avió com un sistema de protecció activa amb la capacitat de corregir i intervenir en les accions de la tripulació que poden posar en risc la integritat de l'avió. Aquest enfocament es basa en tres pilars tecnològics i operatius principals:

Tecnologia Fly-by-Wire (FBW) amb control per sidestick.

Amb la introducció a la indústria de l'Airbus A320, i com s'explica inicialment al punt 2.3 s'elimina la connexió mecànica directa amb cables i politges entre els comandaments i les superfícies de control de l'aeronau i els moviments del pilot sobre el sidestick es transformen en senyals elèctrics digitals que són processats pels ordinadors de vol (AN Aviation Services, 2017). Aquests ordinadors són els encarregats de calcular les maniobres òptimes i de fer actuar les superfícies aerodinàmiques enviant ordres hidràuliques. A diferència de Boeing els sidesticks d'Airbus no estan interconnectats mecànicament i tampoc es mouen sols quan està actiu el pilot automàtic, per tant es redueix la retroalimentació tàctil directa a la cabina (Werner, 2025). En el cas que els dos pilots moguin el *sidestick* a la vegada, el sistema fa una suma algebraica de les dues ordres, per exemple si un pilot tira enrere la palanca fins al seu màxim i l'altre pilot endavant fins al màxim, els senyals en ser totalment contraris es cancel·laran i l'avió seguirà recte (A320 Simulator, 2019). Quan això passa, sona una alerta acústica de Dual Input per notificar que els dos pilots estan intentant controlar l'avió. Per aconseguir la prioritat de control s'ha de prémer i mantenir el botó vermell del *sidestick* que aplicarà *Priority Right* o *Priority Left* depenent del pilot que vulgui la prioritat.



Figura 12. *Sidestick d'Airbus A318 d'Air France.* Font: Ossadzow (2004).

Proteccions de l'envolupant de vol.

Aquest concepte constitueix l'element més distintiu d'Airbus. Els sistemes de l'avió estan programats amb uns límits matemàtics estrictes dissenyats per evitar que

l’aeronau entri en situacions i actituds de perill. Sota la lògica de control normal (*Normal law*), els ordinadors impedeixen de forma contínua que l'avió superi diferents paràmetres com determinats angles d’alabeig, angles d’atac crítics que poden portar l'avió a perdre sustentació i entrar en pèrdua, o velocitats màximes estructurals. En cas que un pilot intenti forçar el sidestick al límit per realitzar una maniobra que excedeix els marges programats, els ordinadors modificaran la maniobra o la ignoraran per poder mantenir l’avió dins dels marges de seguretat. Un exemple pràctic clar seria la protecció d’angle d’atac, si l’avió detecta que la velocitat es redueix de forma perillosa i s'està acostant a una situació de pèrdua de sustentació, els ordinadors aplicaran de manera automàtica la potència màxima als motors i reduiran l’angle del morro de manera autònoma, independentment de si el pilot està tirant del comandament aplicant la maniobra contraria (Skybrary, n.d.-c).

Filosofia de protecció del sistema i la subordinació humana.

Seguint la filosofia d’Airbus, podria interpretar-se de manera errònia que, a diferència de Boeing, Airbus li dona l’autoritat final als ordinadors pel fet de que sota la *Normal Law* l’avió pot limitar accions del pilot per mantenir l'avió en els paràmetres de seguretat, però afirmar que l'última paraula la té l’avió no és correcte. Les proteccions d’Airbus actuen quan tots els sistemes funcionen correctament i no representen una autoritat absoluta sobre la tripulació. Seguint l’exemple del paràgraf anterior, és cert que sota la *Normal Law* l'avió no deixarà que el pilot entri en pèrdua de forma involuntària, tanmateix, com l’autoritat continua residint en la tripulació, en el cas que el pilot consideri necessari sobrepassar els límits programats per motius d’emergència, té la capacitat física de forçar la degradació del sistema de forma voluntaria. Per aconseguir-ho, es fa mitjançant la desconnexió selectiva dels sistemes de referencia de dades d’aire i inercials (ADR i IRU), al desactivar les proteccions automàtiques i passar a operar sota l’*Alternate o Direct Law* (X. Loan, comunicació personal, 16 de juny de 2026). Això demostra que les proteccions no són normes o límits absoluts, sinó que són mecanismes d'assistència que depenen del correcte estat dels sistemes (Skybrary, n.d.-c).

Aquesta filosofia es coherent amb les anomenades *Golden Rules* d'Airbus les quals consisteixen en les quatre regles fonamentals que reforcen que el pilot és sempre el responsable del vol i que pot intervenir en qualsevol moment. Les *Golden Rules* son:

-Volar, Navegar, comunicar
-Utilitzar el nivell apropiat de automatització
-Entén l'FMA en tot moment (S'ha de mantenir la consciència situacional supervisant contínuament el comportament del sistema)
-Actua si les coses no van com estan planejades (Airbus, 2021).

Per entendre com funciona i de quina manera s'aplica l'autoritat variable del sistema, és important comprendre que els sistemes d'Airbus operen sota diferents estats de control que depenen de l'estat dels sistemes informàtics de l'avió. Per garantir la seguretat davant d'avaries tècniques, l'autoritat de l'ordinador no és rígida, està dissenyada per degradar-se per fases si els sistemes informàtics pateixen anomalies. D'aquesta manera l'aeronau opera sota les següents lleis de vol:

Taula 1

Resum de les lleis de vol (Flight Laws) d'Airbus i el seu nivell de protecció

Llei de vol (Flight Law)	Proteccions Actives	Autoritat Final
Normal Law	Totes actives: Límit d'alabeig, angles d'atac i velocitats	Pilot: Dins dels marges protegits, l'ordinador limita estrictament però no exerceix un veto total
Alternate Law	Proteccions de baix nivell o degradades per errors en els sensors	Pilot: Amb assistència limitada, l'ordinador aplica proteccions suaus
Direct Law (Mode d'emergència)	Sense proteccions per fallada total de sistemes informàtics	Pilot: L'avió desactiva el filtre informàtic, el sidestick respon de manera directa
Mechanical Backup	Mode d'últim recurs. Només permet utilitzar el timó de direcció i el *trim* horitzontal de forma mecànica	El pilot manté el control de forma bàsica sense la utilització de *sidestick*

Nota. Adaptat de Flight Control Laws, de Skybrary, n.d.-c

4.3.Enfocament de Boeing

Boeing es va fundar a Seattle l'any 1916, és la companyia aeroespacial més antiga del món i es considera el gegant històric de l'aviació als Estats Units. A diferència de la visió tecnocèntrica d'Airbus, la filosofia de Boeing segueix un disseny profundament antropocèntric, és a dir, que es centra en l'humà. Boeing considera que la tecnologia ha de funcionar com una eina de suport per ajudar a la tripulació, però que cap resposta d'un ordinador hauria de substituir el judici d'un pilot humà ben format i entrenat. Aquesta filosofia es materialitza en tres pilars operatius principals:

L'autoritat final del pilot sense limitacions automàtiques: Aquest concepte és el nucli de la filosofia de Boeing. Segons l'empresa estatunidenca, en el moment decisiu d'una situació d'emergència o en qualsevol escenari complex no programat, la

capacitat d'improvisació que pot tenir una persona humana és superior a la lògica binària d'un ordinador. Per aquest motiu els sistemes de Boeing estan programats per no vetar ni bloquejar les accions dels pilots. És a dir, si un pilot decideix voluntàriament portar els controls de l'avió als límits estructurals o aerodinàmics de l'avió per exemple per evitar un obstacle geogràfic d'emergència, l'avió obeirà de manera estricta l'ordre humana, prioritzant l'acció que ha decidit prendre el pilot per sobre de qualsevol paràmetre informàtic (X. Loan, comunicació personal, 16 de juny de 2026).

Filosofia de control manual i retroalimentació a través del yoke: A diferencia del sidestick lliure i independent d'Airbus, Boeing en les seves cabines digitals modernes segueix utilitzant les banyes de control tradicionals també conegudes com a yoke que es troben situades al centre de cada pilot. S'utilitza una tecnologia anomenada force feedback (retroalimentació de força) que consisteix en la interconnexió mecànica entre els dos yokes, per tant, si un dels pilots mou les banyes, les de l'altre pilot es mouen de manera exactament igual i a la vegada (Werner, 2025). Les banyes es mouen físicament soles fins i tot quan està el pilot automàtic connectat i funcionant, i això proporciona als pilots una millor consciència situacional visual i tàctil sobre què està fent exactament l'avió per poder saber quines forces estan actuant sobre l'estructura de l'avió de manera contínua durant tot el vol.



Figura 13. *Yoke de Boeing 737NG.* Font: Hulko (2025).

L’automatització com a eina de suport: En el disseny de Boeing, la tecnologia informàtica té un paper principalment d’assistència. Malgrat que els models més moderns de Boeing com el B787 o el B777 porten incorporats sistemes de Fly-by-wire, l’avió està programat per operar sota el concepte de proteccions toves (soft protections). L’avió pot avisar a la tripulació mitjançant alertes acústiques, amb un dispositiu que fa vibrar la palanca mecànicament (stick shaker) o que augmenta la resistència dels comandaments quan s'està a prop d’una situació perillosa com un excés de velocitat o una pèrdua de sustentació. Tot i això, si el pilot aplica sobre els controls la força necessària, el sistema cedirà permetent al pilot superar qualsevol límit imposat al programari, és a dir, a Boeing l’automatització aconsella, avisa i resisteix, però no limita. Un exemple pràctic en el cas que un avió del fabricant Boeing estigui a prop d’entrar en pèrdua per perdre sustentació, l’avió faria vibrar el yoke de manera intensa i incrementaria la resistència mecànica de la palanca perquè sigui més difícil per al pilot seguir tirant enrere els controls augmentant l’angle d’atac i afavorint la pèrdua de sustentació. Però si el pilot aplica força i segueix tirant enrere el yoke, al contrari que Airbus, l'avió de Boeing no baixarà el morro sol ni aplicarà cap veto automàtic, sinó que seguirà l’ordre humana fins al límit aerodinàmic. Cal matisar que aquesta regla històrica va patir una excepció amb la introducció del sistema MCAS al Boeing 737 MAX, on l’ordinador imposava una acció autònoma sobre el control de vol de la tripulació. Aquesta discrepància conceptual s’analitza com a cas d’estudi al punt 5.2.

A diferència de les lleis d’Airbus, Boeing manté el mateix principi en tots els escenaris on l’avió no limitarà cap acció del pilot (a excepció del sistema MCAS). En aquest cas, el que varia és el grau d'assistència que ofereix l’avió.

Taula 2

Resum dels estats d'automatització en Boeing

Estat de l'automatització	Comportament del sistema	Autoritat final
Normal Mode	L'aeronau calcula els límits, assessora i ofereix resistència física (soft protections) davant maniobres perilloses	Pilot: Pot superar la resistència per part del sistema aplicant força
Secondary Mode	L'aeronau perd la capacitat d'assistir o endurir els controls i es perden funcions automàtiques com el pilot automàtic.	Pilot: Manté el control aerodinàmic amb característiques afectades
Direct Mode	Sense assistència digital, control manual directe de les superfícies	Pilot: Control aerodinàmic complet sense ajudes digitals
Mechanical Backup	Últim recurs, en B737 es controla mitjançant cables físics connectats a l'estabilitzador i els alerons. En models moderns FBW es tradueix en modes elèctrics de contingència	Pilot: Manté control mecànic o elèctric bàsic degradat per assegurar el control simple de l'aeronau.

Nota. Adaptat de Flight Control Laws, de Skybrary, n.d.-c

5.IMPLEMENTACIÓ DE LES NOVES TECNOLOGIES EN AERONAUS COMERCIALS

Un cop s'han analitzat les diferents filosofies d'automatització, és important observar com aquests conceptes s'han materialitzat en els models més utilitzats a la indústria global. En aquest apartat s'analitza l'evolució pràctica de les empreses líders Boeing i Airbus a partir dels seus avions més representatius, comparant les millores tecnològiques i els canvis en la interfície física de la cabina en el salt generacional de cada fabricant.

5.1.Airbus A320 (CEO vs NEO)

L'Airbus A320 constitueix un dels pilars principals del disseny digital basat en la tecnologia Fly-By-Wire. La transició de la versió tradicional A320ceo (*Current Engine Option*) cap a la versió més moderna A320neo (*New Engine Option*) reflecteix una estratègia clara centrada en la continuïtat de la flota i en mantenir la comunalitat operativa per reduir costos i facilitar gestions. La cabina a nivell físic, com es pot observar en les següents imatges comparatives (Figures 14 i 15), manté una configuració pràcticament idèntica. La raó principal per la qual Airbus va optar per mantenir els dissenys tan semblants és de caràcter operatiu i econòmic. Per l'alta similitud de les dues cabines, es pot garantir que els pilots puguin operar els dos models amb la mateixa habilitació de tipus coneguda com a *Type Rating*, això permet minimitzar a les aerolínies els costos de formació teòrics i pràctics, evitant formació addicional i mantenint la coherència operativa de la flota (Airbus, n.d.-b).



Figura 14. *Versió inicial del cockpit de l'Airbus A320 Font:* Airbus (2019).



Figura 15. *Versió actual del cockpit de l'Airbus A320.* Font: Airbus (s.f.).

Tot i aquesta continuïtat visual que es pot apreciar a primera vista en observar com es comparteix l'estructura de la cabina, el model NEO incorpora petites però importants implementacions digitals:

Evolució de les pantalles i els instruments de reserva: Les pantalles antigues que visualment es diferencien per les cantonades arrodonides, estaven formades amb tubs de raigs catòdics (CRT), els quals basaven el seu funcionament en el xoc d'electrons contra la pantalla de fòsfor, posteriorment van aparèixer els primers models LCD (Pantalla de cristall líquid) els quals depenien de tubs fluorescents per poder generar la llum. Actualment s'utilitzen panells LCD amb retroalimentació LED, que ofereixen una millor claredat visual i consumeixen menys energia (SENASA, n.d.). També s'integra l'ISIS comentat en el punt 3.3, eliminant els instruments secundaris analògics. Tant les sis pantalles antigues com les noves mantenen la mida de 6,25 polzades per costat canviant només físicament els marcs exteriors (Electronic Flight Instrument System, n.d.).

Millores de rendiment al FMS: S'actualitza el programari del *Flight Management System* per gestionar diferents perfils de vol de manera molt més eficient i per adaptar-se a les característiques com les limitacions de soroll dels nous motors.

La implementació tecnològica de l'A320neo va més enllà de la cabina, l'objectiu principal consisteix en l'eficiència aèria. Es van introduir dispositius aerodinàmics per reduir la resistència induïda situats a les puntes de les ales, aquests dispositius s'anomenen Sharklets. També va incorporar dues opcions de motors de nova generació: CFM LEAP-1A o Pratt & Whitney PW1100G. Aquests motors són entre un 15% i un 20% més eficients en l'àmbit del consum de combustible i de les emissions de CO_2, però també redueixen l'impacte acústic fins a un 50% comparat amb les versions tradicionals (BAA Training, 2024).

5.2.Boeing 737 (NG vs MAX)

El Boeing 737 representa l'altre gran referent de l'aviació comercial de curt i mitjà radi, però compta amb una evolució tecnològica i una filosofia de disseny molt diferent de la d'Airbus. La família del 737 durant la seva història s'ha vist caracteritzada per la urgència amb la qual s'ha hagut de dissenyar, ja que els primer model va aparèixer com a resposta davant la pressió de la competència, exactament pel model Douglas DC-9, atès que s'estava quedant tot el mercat. La història es va repetir a finals del 2010 amb l'aparició del Airbus A320neo on Boeing va haver de reaccionar urgentment cancel·lant la idea de crear un avió nou des de zero i va haver de crear una versió més moderna del 737NG, el 737 MAX (Airgways, 2016). La transició des del B737 NG (Next generation) cap a la versió més recent B737 MAX reflecteix l'esforç de Boeing per mantenir la competitivitat i evitar que Airbus dominés el mercat en solitari. Al no dissenyar un model completament nou, es van estalviar l'alt cost econòmic i el temps que comportaria aconseguir totes les certificacions per al nou disseny. Boeing va decidir modificar la seva estructura tradicional, modernitzant la cabina digitalment i instal·lant motors nous. Les modificacions i les modernitzacions es van fer de manera que fos possible conservar la mateixa habilitació de tipus (*Type Rating*) perquè els pilots poguessin passar del NG al MAX de la manera més ràpida possible i amb la mínima formació necessària.



Figura 16. *Cockpit de Boeing 737 NG.* Font: Beltyukov (2011)



Figura 17. *Cockpit de Boeing 737 MAX*. Font: Funforme3 (2018)

Al contrari que en el cas anterior d'Airbus, la cabina del B737 MAX mostra un canvi significatiu a nivell físic i estructural, i també va comportar canvis profunds de programari:

Evolució de les pantalles i interfície de la cabina: Com es pot observar en la comparativa visual anterior, el panell principal del B737 NG estava format per cinc pantalles LCD de 8x8 polzades (Boeing, n.d.-b), convivint amb indicadors mecànics i analògics. El panell frontal de B737 MAX està format per quatre pantalles panoràmiques grans de 15 polzades, heretades del B787 Dreamliner, i eliminant pràcticament tots els components analògics (Boeing, n.d.-a).

Implementació del sistema MCAS en el programari de vol: El B737 MAX va incorporar motors nous, CFM LEAP-1B (Boeing, n.d.-a), aquests motors són significativament més grans que els anteriors i el 737 al ser un avió estructuralment molt baix va tenir el problema que aquests nous motors no cabien sota les ales. La solució que es va trobar va ser elevar i moure cap endavant els motors, aquest canvi posicional va modificar el comportament aerodinàmic de l'aeronau, generant una tendència a aixecar el morro en determinades condicions de vol. Per corregir aquest comportament, Boeing va implementar el sistema MCAS (*Maneuvering Characteristics Augmentation System*) dissenyat per compensar la tendència de l'avió de forma automàtica evitant haver de reentrenar els pilots en simuladors.L'MCAS va ser un sistema polèmic perquè Boeing no el va incloure inicialment als manuals ni eñ va notificar als pilots per fer més àgil el procés de certificació de l'avió, això es va sumar a un error de disseny al dependre només d'un sol sensor d'angle d'atac va provocar la suspensió global del model després de dos accidents mortals (AviationHunt, 2024).

La modernització del B737 MAX també es va centrar en aconseguir la màxima eficiència operativa per ser el competidor principal de l'A320neo. Segons les dades oficials del fabricant (Boeing, n.d.-c), aerodinàmicament es van evolucionar els winglets substituint els clàssics del B737 NG pels nous *Advanced Technology Winglets*, que comptaven amb puntes dobles a les ales per dividir el flux d'aire cap amunt i cap avall per reduir més la resistència induïda. Gràcies als nous motors i als nous Winglets el model MAX aconsegueix una reducció aproximada del 14% en el

consum de combustible i de les emissions de CO2, així una reducció de l'impacte acústic d'un 40%, complint amb les normatives mediambientals globals. La Figura 18 que es pot observar a continuació mostra la comparativa visual dels motors i dels Winglets del B737 NG i del MAX



Figura 18. *Comparació entre motors i puntes d'ala de B737NG i B737 MAX.* Font: Leeham News (2025).

6.IMPACTE DE LA MODERNITZACIÓ I EVOLUCIÓ DEL ROL DEL PILOT (ANÀLISI PRÀCTICA)

6.1. De pilot manual a gestor de sistemes (Càrrega de treball i automatització)

L'automatització a les cabines ha modificat profundament la naturalesa de la feina dels pilots, convertint la seva activitat en una funció de supervisió en temps real en comptes del rol basat en l'execució física de maniobres que existia anteriorment. Aquest canvi de paradigma ha afectat la manera en què es distribueix la càrrega de treball. Amb la tecnologia s'aconsegueix reduir l'estrès físic i mecànic en les fases crítiques de vol però augmenta notablement la càrrega cognitiva especialment en fases de vol de llarga duració.

El pilot actualment treballa en un entorn on predominen períodes llargs de baixa activitat física on és important mantenir un elevat nivell d'atenció continu que pot accelerar la fatiga silenciosa. El repte operatiu actual no és l'habilitat manual per controlar l'avió sinó evitar l'aparició de la complaença tecnològica, que consisteix en la pèrdua de desconfiança activa amb el sistema. La diferència entre les filosofies de disseny de Airbus i de Boeing exemplifica el contrast operatiu de les dues empreses mostrant com es percep en cada una la càrrega de treball i la gestió de l'estrès en situacions crítiques (Causse et al., 2025).

Aquesta idea teòrica es confirma en la pràctica real de vol. Segons l'experiència del pilot Xavi Loan, entrevistat a l'annex i que ha volat amb els dos models, certifica que l'A320 automatitza certes accions sense intervenció del pilot, mentre que el Boeing 737 requereix una actuació més directa. Per aquest motiu la sensació de volar un avió convencional li pertoca al model americà pel control directe dels comandaments amb les superfícies de control, implicant una càrrega de treball operativa i mental més elevada.

6.2. Consciència situacional i dependència de l'automatització

La consciència situacional (*Situational Awareness*) és un dels conceptes més importants en el món aeronàutic i un dels pilars de la seguretat operacional. Consisteix en la capacitat de percebre els elements de l'entorn, entenent en tot moment el seu significat per poder anticipar-se a l'estat futur immediat de l'avió. Avui en dia, aquesta capacitat ja no depèn de l'anàlisi continu dels diferents instruments dispersats per la cabina, sinó que depèn de la capacitat de filtrar i prioritzar les dades que rep de forma centralitzada. Aquest nou model millora la coherència i la claredat de la informació però introdueix el risc de saturació per excés d'informació, on el pilot pot perdre la visió global del vol.

La dinàmica actual pot generar dependència dels automatismes, com apunten Causse et al. (2025), amb el perill que la tripulació pateixi una degradació de les habilitats manuals. Com diàriament operen un sistema que està programat per gestionar gran part del vol de forma autònoma, els pilots corren el risc d'automatitzar les seves respostes intel·lectuals disminuint la capacitat de reacció mecànica i intuïtiva en moments on els sistemes pateixen anomalies i s'ha d'actuar de forma manual en qüestió de segons.

De totes maneres, la modernització dels sistemes pot actuar en la mitigació d'aquesta sobrecàrrega. Com indica Xavi en l'entrevista, el salt tecnològic a les quatre grans pantalles del 737 MAX no li ha generat mai la sensació de saturació, sinó que li proporciona una consciència situacional més àmplia, que redueix la càrrega de treball en fases normals i situacions anormals.

6.3. Seguretat operacional i nous reptes

En els últims anys la visió sobre la seguretat operacional ha experimentat un canvi important. En el passat els incidents solien tenir un origen mecànic, però avui en dia gran part de les emergències neixen de la interacció entre la tripulació i els sistemes automatitzats de l'avió. L'aparició de sistemes o funcions que poden actuar sense notificar clarament als pilots o de forma opaca, com el cas comentat anteriorment

del MCAS de Boeing, introdueix un risc crític anomenat efecte sorpresa (startle effect), que consisteix en el bloqueig momentani de la capacitat de resposta del pilots quan no entenen la lògica sota la qual l'avió ha pres una decisió autònoma (Causse et al., 2025).

Aquesta situació remarca el debat operatiu sobre quin ha de ser el límit de l'automatització en una situació d'emergència. La diferència entre els principals fabricants no és en com estan programats els sistemes de l'avió, sinó en com es gestiona la responsabilitat. D'una banda, un sistema rígid, que restringeix accions de la tripulació si ho veu necessari pot protegir l'avió en cas d'error humà, però pot generar frustració o bloqueig en cas que els pilots necessitin improvisar maniobres especials. D'altra banda un disseny que tradicionalment atorga total llibertat al pilot confiant amb la seva formació i la seva flexibilitat es pot veure en perill quan s'introdueixen sistemes automàtics que presenten anomalies inesperades en el programari com va passar amb els primers B737 MAX. És molt important analitzar i entendre com reacciona el pilot quan es perd la confiança amb els sistemes de l'avió, perquè en situacions crítiques la clau és la capacitat humana per gestionar i recuperar el control tot i que estiguin en conflicte la lògica del sistema i la intuïció dels pilots.

L'experiència real de Xavi Loan afirma que en els avions de les dues principals empreses aeronàutiques la decisió final la té sempre el pilot. També ens fa conèixer la seva preferència operativa en casos d'emergència, l'entrevistat es decanta per la filosofia de Boeing perquè, amb la d'Airbus, quan l'avió pateix degradacions de llei i passa a *Alternate o Direct law*, es redueixen les sensacions físiques de vol necessàries per recuperar el control de l'aeronau.

6.4. El futur de la professió: Single Pilot i autonomia

La gran i ràpida modernització de les cabines ha creat en la indústria el debat sobre la possibilitat i la viabilitat d'operar un avió amb un sol pilot. Aquesta proposta busca aprofitar la creixent confiança en la tecnologia i en l'automatització per a reduir els costos operatius de les aerolínias al treure part de la tripulació, però aquesta idea és

incompatible amb els principis fonamentals de la gestió de recursos de la tripulació (CRM).

El motiu pel qual la tripulació a la cabina està formada per dos pilots no és només pel repartiment de tasques, sinó que funciona com un sistema de seguretat continu basat en la supervisió mútua. El fet de comptar amb dos pilots permet el *cross-checking,* que facilita la detecció d'errors, compartir càrrega cognitiva al processar dades, i garanteix la continuïtat operativa en cas d'una incapacitació mèdica d'un dels pilots. Reduir la tripulació a un sol pilot alteraria completament l'ecosistema psicològic del vol, incrementant la pressió emocional, la càrrega de treball i l'estrès i la fatiga en situacions crítiques. És cert que amb la tecnologia actual es pot operar un vol de forma autònoma en condicions normals, el problema apareix davant de les anomalies i les situacions perilloses, on la manca de capacitat d'improvisació per respondre a fallades múltiples no pot garantir la correcta gestió de la situació sense el suport d'una tripulació completa.

Aquesta visió sobre el futur del sector coincideix amb la realitat de l'operativa actual. Com exposa el primer oficial Xavi Loan a l'entrevista, no és viable ni segur operar sense un segon pilot per gestionar l'estrès i la seguretat en situacions crítiques, és una idea a la qual els propis sindicats de pilots s'han oposat. A més, també ens indica la seva opinió sobre la implementació de la IA, on matisa que la IA actualment no podria assumir les variables múltiples d'un vol real i que només seria viable com a eina de suport per ajudar en la presa de decisions.

7.CONCLUSIONS

L'evolució tecnològica que ha transformat els *cockpits* actuals en l'aviació comercial ha assolit un nivell d'integració superior a una simple substitució d'instruments analògics per sistemes digitals. Analitzar com la transició cap al *glass cockpit* ha transformat les funcions operatives actuals era l'objectiu de la investigació, estudiant com ha variat la càrrega de treball i la seguretat operacional a la qual es veuen sotmesos els pilots actuals comparant les diferents filosofies dels dos gegants indiscutibles de la indústria aeronàutica: Airbus i Boeing.

Un cop realitzat l'estudi comparatiu de les famílies Airbus A320 i Boeing 737, contrastant les dades amb l'experiència real del pilot comercial entrevistat, es poden presentar les conclusions principals del treball de recerca:

Definitiva transformació del rol del pilot: Ha quedat confirmat que el pilot actual ha deixat d'actuar com a operador mecànic i manual per adquirir el rol de gestor i supervisor de sistemes complexos de vol. L'automatització ha aconseguit reduir l'esforç físic necessari per controlar l'aeronau, però ha transformat la càrrega física en una elevada càrrega cognitiva i intel·lectual on el manteniment de la vigilància activa, la prevenció de la complaença i la gestió de la fatiga silenciosa, s'han convertit en els nous reptes humans.

Aportació des de l'experiència real de l'autor: Com a tancament d'aquesta investigació, ha resultat de gran valor el contrast dels conceptes teòrics estudiats amb l'experiència personal pràctica adquirida per l'autor durant la fase inicial de la formació de pilot comercial amb l'aeronau Cessna 152, avió biplaça completament analògic. S'ha pogut comprovar empíricament l'elevada càrrega de treball que suposa la dispersió dels instruments analògics, on el control de paràmetres crítics com la velocitat, l'altitud, el rumb o les revolucions del motor que es troben separats físicament a la cabina, exigeixen un *scan pattern* constant i exigent. En especial en les fases inicials de la formació, es posa de manifest com la fixació en un sol instrument provoca la pèrdua de la visió global de la situació de l'aeronau. Aquesta vivència personal valida la tesi central d'aquest treball atès que si la manca

d'integració instrumental en un avió lleuger pot saturar la capacitat cognitiva de l'estudiant, la transició cap a les cabines digitals en l'aviació actual era un fet imprescindible per poder gestionar de manera segura la complexitat dels avions moderns.

Dualitat de les filosofies de disseny: La comparació entre els integrants del duopoli aeronàutic demostra que mantenen enfocaments i estructures diferents. Airbus ha apostat per un model de seguretat basat en proteccions rígides i la limitació d'accions del pilot que puguin posar en perill l'aeronau, sempre que l'avió operi sota *Normal Law*. D'altra banda, Boeing aposta per per unes proteccions menys estrictes (soft protections), donant una àmplia i lliure autoritat al pilot sense limitar les seves accions tot i que superin els límits de seguretat (amb l'excepció d'anomalies com el MCAS), confiant en la capacitat de decisió i la formació humana. Casos com l'MCAS del 737 MAX exemplifiquen els riscos d'introduir automatismes sense informar de forma correcta a la tripulació. En conseqüència l'automatització és una eina molt útil que redueix la càrrega de treball i busca incrementar la seguretat, però no s'ha de concebre com un substitut del criteri i de la responsabilitat del pilot mentre hi hagi una tripulació humana capacitada.

Implicacions en la Gestió aeronàutica: Des d'una perspectiva centrada en la gestió i en l'economia, la investigació demostra que l'estratègia de disseny de les cabines es troba fortament determinada pel concepte de la comunalitat de flota. Com s'ha pogut comprovar tant Airbus com Boeing van decidir implementar canvis tecnològics mantenint la compatibilitat entre generacions de models per facilitar la transició de la tripulació a les versions més modernes i reduir els costos que implicaria haver de realitzar un nou *Type Rating* en cada nova versió de l'avió.

Visió crítica del futur (Single Pilot): La recerca conclou que, tot i les millores i els avenços tecnològics, la idea d'operar un avió comercial amb un sol pilot es considera incompatible amb la seguretat operacional. És cert que la tecnologia actual permet gestionar un vol de forma autònoma en condicions ideals, però el factor humà en una cabina integrada per dos pilots, incloent-hi el *cross-checking*, la resposta a l'efecte sorpresa, la gestió de l'estrès i la distribució de la càrrega cognitiva, continua sent l'únic sistema redundant amb la capacitat de garantir l'èxit

davant de situacions no programades. Un exemple molt representatiu que demostra aquesta idea és el famós aterratge al riu Hudson, del vol de US Airways 1549, on gràcies a la combinació de la intuïció, l'experiència i la capacitat d'improvisació del comandant, es va poder solucionar una situació que cap automatització podria haver gestionat.

Limitacions de la recerca: La metodologia d'aquest estudi és principalment qualitativa, es basa en l'anàlisi de conceptes i en la interpretació de l'experiència professional amb l'entrevista d'un pilot que ha volat en els quatre models estudiats (A320CEO, A320NEO, B737NG i B737MAX). Per tant les conclusions sobre la consciència situacional o la percepció de la càrrega de treball podrien variar en el cas que es realitzés un estudi quantitatiu que inclogués una mostra superior de pilots. Els resultats podrien haver presentat variacions si s'haguessin analitzat aeronaus d'altres fabricants més enllà dels del duopoli comentats al treball, incloent constructores actuals com Embraer (Brasil), Bombardier (Canadà), ATR (Italia-França), COMAC (China), Tupolev (Rússia), Antonov (Ucraïna) o constructores històriques com McDonnell Douglas (EEUU).

Línies de treball futur: Finalment, aquesta recerca deixa les portes obertes a futures investigacions que poden resultar de gran importància en els següents anys. El tema principal a investigar seria la introducció de la Intel·ligència Artificial a les cabines i als programaris, tenint en compte que podria redefinir la manera com els pilots interactuen amb els sistemes tecnològics de l'avió. Paral·lelament caldria explorar com afectarien els nous sistemes intel·ligents als programes de formació per veure si provocaran la pèrdua d'habilitat de vol manual o de capacitats cognitives i de presa de decisions crítiques de les futures tripulacions.

8. REFERÈNCIES I CITES FOTOGRÀFIQUES

Ordenat per títol (A-Z)

AviationGroup. (n.d.). ¿Qué tipos de motores pueden tener los aviones? https://www.aviationgroup.es/actualidad/tipos-motores-pueden-tener-aviones/

Boeing. (n.d.-a). 737 MAX by design. https://www.boeing.com/commercial/737max/by-design

Funforme3. (2018, July 15). 737 Max Cockpit [fotografia]. Wikimedia Commons. https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:737_Max_Cockpit.jpg

Boeing. (2023). 737-100 through 737-500 Airplane Characteristics for Airport Planning. Boeing Commercial Airplanes. https://www.boeing.com/content/dam/boeing/v2/airports/acaps/737CL_REVD.pdf

FlyByWire Simulations. (n.d.). A320neo Pilot Briefing - PFD [fotografia]. https://docs.flybywiresim.com/pilots-corner/a32nx/a32nx-briefing/pfd/

Ossadzow, A. (2004, July 17). Air France - Airbus A318-111 (cockpit) [fotografia]. Airliners.net. https://www.airliners.net/photo/Air-France/Airbus-A318-111/625118

Airbus. (n.d.-a). Airbus A320 Cockpit [fotografia]. Airbus. https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/cockpits

European Flyers. (n.d.). Avión CESSNA 172 G1000 - Avión monomotor - European Flyers. https://europeanflyers.com/flota/cessna172-garmin1000

ICAO. (2012). Aviso de Seguridad Operacional No. RSA 2012-001-R0. Aspectos del modo de conciencia y la gestión del estado de la energía relacionados con la automatización del puesto de pilotaje. Regional Aviation Safety Group – Pan America (RASG-PA). https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/RASGPA/Documents/ADVISORY/RSA2012-0001-Aviso.pdf

AviationHunt. (2024, February 7). Boeing 737 Family, from NG to MAX. AviationHunt. https://www.aviationhunt.com/boeing-737/

Leeham News. (2025, May 13). Boeing 737 NG and MAX Compared: Evolution, innovation, and controversy [fotografia]. Airline Ratings. https://www.airlineratings.com/articles/boeing-737-ng-and-max-compared-evolution-innovation-and-controversy

Ryabtsev, S. (2009, November 15). Boeing 737-200 Advanced Cockpit Dubai Air Show Ryabtsev. [fotografia]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boeing_737-200_Advanced_Cockpit_Dubai_Air_Show_Ryabtsev.jpg

Boeing. (n.d.-b). Boeing 737NG cockpit measurements. Scribd. https://es.scribd.com/document/155765738/B737-Measurements

Pucci, M. (2008, March). Cessna 172 SP - I-ACVL cockpit [fotografia]. Flickr. https://www.flickr.com/photos/the_night_flier/2335176389

Krebs, J. (2008, June 4). Cockpit B737-500 flight from Hamburg to Berlin SX [fotografia]. JetPhotos. https://www.jetphotos.com/photo/6265093

Airbus. (n.d.-b). Cockpits. https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/cockpits

Schultz, D. G. (2010, June). Comet 4C cockpit [fotografia]. Flickr. https://www.flickr.com/photos/dschultz742/4723658998

BAA Training. (2024, March 20). Differences between A320CEO and A320neo in a nutshell. https://baatraining.com/blog/differences-between-a320ceo-and-a320neo-in-a-nutshell

Honeywell Aerospace. (n.d.). Display Unit Phase 3A Upgrade [fotografia]. https://www.honeywellaerospace.com/us/en/products-and-services/products/cabin-and-cockpit/avionics/cockpit-and-flight-displays/display-unit-phase-3a-upgrade

Aviación INEC. (n.d.). El factor humano en la aviación. https://aviacioninec.com/el-factor-humano-en-la-aviacion/

Boeing. (n.d.-c). El Legado y la Fuerza de la Familia Boeing 737. https://www.boeing.com/commercial/737max/737-max-update_latam/737-max-legacy_latam#flight-deck

Skybrary. (n.d.-a). Electronic Centralized Aircraft Monitor (ECAM). https://skybrary.aero/articles/electronic-centralized-aircraft-monitor-ecam

Electronic Flight Instrument System. (n.d.). Scribd. https://es.scribd.com/doc/177501476/Electronic-Flight-Instrument-System

Skybrary. (n.d.-b). Electronic Flight Instrument System (EFIS). Skybrary Aviation Safety. https://skybrary.aero/articles/electronic-flight-instrument-system-efis

SkyBrary. (n.d.). Engine Indicating and Crew Alerting System (EICAS). https://skybrary.aero/articles/engine-indicating-and-crew-alerting-system-eicas

Skybrary. (n.d.-c). Flight Control Laws. https://skybrary.aero/articles/flight-control-laws

Skybrary. (n.d.-d). Flight Management System (FMS). Skybrary Aviation Safety. https://skybrary.aero/articles/flight-management-system-fms

Airbus. (2004). Flight Operations Briefing Notes – Standard Operating Procedures: Optimum Use of Automation (SOP SEQ 02). Airbus Safety Library. https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-11/AirbusSafetyLib_-FLT_OPS-SOP-SEQ02%20-%20Automation.pdf

Airbus. (2021). Golden rules for pilots. Airbus WIN. https://www.airbus-win.com/wp-content/uploads/2021/07/golden_rules.pdf

AN Aviation Services. (2017, August 5). How does the control sidestick in Airbus aircraft work? https://an.aero/how-does-the-control-sidestick-in-airbus-aircraft-work/

Airbus. (2019, May 21). How the cockpits have changed since 1972 [fotografia]. FlightGlobal. https://www.flightglobal.com/systems-interiors/2019/05/how-the-cockpits-have-changed-since-1972/

Skybrary. (n.d.-e). Human-Machine Interface (HMI). https://skybrary.aero/articles/human-machine-interface-hmi

Causse, M., Mercier, M., Lefrançois, O., & Matton, N. (2025). Impact of automation level on airline pilots' flying performance and visual scanning strategies: A full flight simulator study. Applied Ergonomics, 125, 104456. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2024.104456

Airgways. (2016, June 15). La evolución del legendario Boeing 737. https://airgways.com/2016/06/15/la-evolucion-del-legendario-boeing-737/

Hispaviación. (n.d.). Las aplicaciones de la PBN. https://www.hispaviacion.es/las-aplicaciones-de-la-pbn/

Macías, R. P. (2016, November 24). LAS APLICACIONES DE LA PBN [fotografia]. Hispaviación. https://www.hispaviacion.es/las-aplicaciones-de-la-pbn/

SENASA. (n.d.). Módulo 05 – Capítulo 11: Pantallas (Displays). https://www.senasa.es/recursos/adobePDF/2025/pdf/guias/Modulo05_cap11.pdf

IVAO. (n.d.). Navigation Display - ND [fotografia]. IVAO Documentation Library. https://wiki.ivao.aero/en/home/training/documentation/Navigation_Display_-_ND

NiveldeVuelo 350. (2021, January 21). Parada de motor después de V1 [fotografia]. NiveldeVuelo 350. https://niveldevuelo350.com/parada-de-motor-despues-de-v1/

Federal Aviation Administration. (2016). Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge (Chapter 6: Flight Controls). https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/08_phak_ch6.pdf

Beltyukov, A. (2011, May 27). S7 Airlines Boeing 737-800 flight deck [fotografia]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:S7_Airlines_Boeing_737-800_flight_deck_Beltyukov.jpg

A320 Simulator. (2019). Sidestick priority. https://www.a320simulator.be/2019/12/15/sidestick-priority/

Walsh, S. (2024, February 21). Types of Aviation Navigation Systems. PilotPassion. https://pilotpassion.com/types-of-aviation-navigation-systems/?utm_source=copilot.com

Werner, N. (2025, June 3). Why Boeing still uses yokes instead of side sticks. Jalopnik. https://www.jalopnik.com/1873715/why-boeing-uses-yokes-instead-of-side-sticks/

Hulko, S. (2025, June 3). Why Boeing still uses yokes instead of side sticks [fotografia]. Jalopnik. https://www.jalopnik.com/1873715/why-boeing-uses-yokes-instead-of-side-sticks/

Annex: Entrevista a pilot de Boeing 737 i Airbus A320

A continuació es presenta l'entrevista realitzada amb l'objectiu d'obtenir una visió pràctica sobre les implicacions operatives, la càrrega de treball i la percepció de la seguretat associada a les filosofies de disseny analitzades. El valor d'aquest testimoni s'obté de l'experiència directa de l'entrevistat amb les aeronaus comparades en el treball.

Pilot: Xavi Loan, Primer Oficial de Boeing 737NG/MAX a Ryanair i actualment Primer Oficial d'Airbus A320 a Vueling

1. Gestió de sistemes i càrrega de treball: Havent volat el 737 NG i l'A320, com canvia realment el teu rol a la cabina? Sents que en un model estàs "volant" un avió de manera més tradicional i en l'altre estàs "gestionant" un sistema informàtic? En quin dels dos models consideres que la càrrega de treball mental és més exigent en situacions de fatiga?

-El rol no canvia; la feina continua sent la mateixa com a Primer Oficial. L'únic que varia és la representació dels sistemes i la filosofia dels dos avions.

-Quan estàs volant el B737 tens més sensació d'estar volant l'avió, ja que l'A320 té el sistema *fly-by-wire*: *l'input* que fas als controls de vol passa a través d'un ordinador, que el transforma en moviment hidràulic. Les forces aplicades als controls de vol al 737 es perceben, però a l'A320 aquesta sensació no hi és. En canvi, el B737 és més semblant a un avió convencional, amb un control més directe de les superfícies de vol.

-Considero que al B737 la càrrega de treball és més elevada tant en operativa normal com en condicions de fatiga. L'A320 automatitza certes accions sense intervenció del pilot, mentre que al B737 aquestes requereixen actuació directa. Si parlem de condicions anormals, en tots dos avions la càrrega de treball augmenta significativament.

2. Consciència situacional: El 737 MAX ha fet un salt gegant substituint les pantalles del NG per quatre grans pantalles panoràmiques de 15 polzades. Tot i mantenir la filosofia de control tradicional de Boeing, creus que centralitzar tanta informació digital en pantalles grans millora realment la consciència situacional de la tripulació o pot provocar saturació d'informació (information overload)?En aquest sentit, hi ha hagut algun moment concret en la teva carrera on l'automatització t'hagi ajudat molt o, per contra, t'hagi complicat la vida en lloc de facilitar-te-la?

-No crec que generi una situació de sobrecàrrega d'informació; al contrari, tenir pantalles més grans ens proporciona una consciència situacional més àmplia. Les pantalles han modernitzat la cabina, però la informació que ens mostren és essencialment la mateixa que amb les pantalles més petites.

-L'automatització redueix la càrrega de treball tant en l'operativa diària com en fases anormals del vol. En cap moment he notat que l'automatització m'hagi complicat alguna fase del vol.

3. Seguretat i automatismes: El cas del sistema MCAS al 737 MAX va obrir un gran debat sobre l'automatització. Des de la teva perspectiva com a pilot de línia, què consideres més segur davant d'una emergència complexa: la filosofia nativa d'Airbus (*Fly-by-Wire* amb proteccions estrictes on l'ordinador pot limitar accions) o la filosofia de Boeing (on el pilot sempre manté llibertat mecànica sobre els controls)?

-Les dues filosofies són molt segures; cadascuna té el seu estil. En tots dos casos, l'última decisió continua sent del pilot, en cap moment el *software* té l'última paraula, sinó que és el pilot qui decideix què fer independentment de l'avió que s'estigui volant.

-Els sistemes poden fallar o proporcionar informació incorrecta, i per això el pilot està entrenat per afrontar situacions complexes i operar amb seguretat en qualsevol condició de vol.

-En una emergència complexa, prefereixo l'estil de Boeing, ja que considero que l'Airbus en llei alterna o llei directa no ofereix les mateixes sensacions de vol que el B737.

4. El futur de la professió: Amb l'alt nivell d'automatització que presenten tant l'A320neo com el 737 MAX, com veus el debat actual de la indústria sobre el "Single Pilot Operation" (vols comercials amb un sol pilot a cabina)? Creus que la tecnologia actual està preparada per gestionar l'estrès i la seguretat d'un vol crític sense un segon pilot? O que es podria fer ús de la IA per gestionar diferents situacions?

-Avui dia no és possible. Hi ha moltes variables a tenir en compte que actualment la IA no pot assumir. Potser en el futur hi haurà la possibilitat de fer aquest canvi, però actualment ni és segur ni és viable.

-Si s'introduís IA actualment, seria com a eina de suport als dos pilots en la presa de decisions i en fases anormals del vol, però assumir el control complet de l'aeronau no és viable.

-Gestionar l'estrès i la seguretat sense un segon pilot tampoc és viable avui dia. Aquesta possibilitat s'ha plantejat, però els sindicats de pilots s'hi han oposat i no s'ha arribat a implementar.