

# **Elaborato Monografico di Aerodinamica degli Aeromobili**

Paola Cantelmi - mat. M53/1327

Fabio Saggiomo - mat. M53/1272

Luigi Marra - mat. M53/1289

**Anno accademico 2020-2021**

# Indice

<b>Elenco delle figure</b>	<b>II</b>
<b>Elenco delle tabelle</b>	<b>III</b>
<b>1. Introduzione</b>	<b>1</b>
1.2 Storia del Boeing 737 MAX . . . . .	1
1.3 Obiettivi dell'elaborato . . . . .	3
<b>2. Incidenti del Boeing 737 MAX</b>	<b>4</b>
2.2 Volo <i>Lion Air 610</i> . . . . .	4
2.3 Volo <i>Ethiopian Airlines 302</i> . . . . .	5
<b>3. Identificazione delle cause</b>	<b>7</b>
3.2 Descrizione del MCAS . . . . .	8
3.3 Analisi degli incidenti . . . . .	11
3.3.1 <i>Lion Air 610</i> . . . . .	11
3.3.2 <i>Ethiopian Airlines 302</i> . . . . .	12
3.4 Riassunto delle cause . . . . .	13
<b>4. Conseguenze</b>	<b>14</b>
4.2 Stress industriale . . . . .	14
4.3 Futuri aggiornamenti e rientro in esercizio . . . . .	17
<b>5. Conclusioni</b>	<b>18</b>
5.2 Discussione sull'etica ingegneristica . . . . .	18
<b>Bibliografia</b>	<b>20</b>

# Elenco delle figure

1.1	Rappresentazione di un <i>rendering</i> del velivolo Boeing 737 MAX, [2] . . . .	1
1.2	Confronto tra 737 MAX (sotto) e 737NG (sopra) . . . . .	2
1.3	Cronologia degli eventi chiave del velivolo Boeing 737 MAX, dal 2010 al 2019, [4] . . . . .	3
2.1	Andamenti della quota e della velocità verticale in UTC, JT610, [5] . . . .	4
2.2	Andamenti della quota e della velocità verticale dell'ultimo minuto di volo in UTC, JT610, [5] . . . . .	5
2.3	Andamenti della quota e della velocità verticale in UTC, ET302, [5] . . . .	6
3.1	Confronto tra i motori CFM56 del Boeing 737NG e i motori CFM LEAP-1B del Boeing 737 MAX 8, [6] . . . . .	7
3.2	Rappresentazione del sensore destro dell'angolo d'attacco del velivolo Boeing 737 MAX . . . . .	9
3.3	Rappresentazione dello stabilizzatore del velivolo Embraer ERJ-170, [8] . .	9
3.4	Schema di funzionamento del MCAS, [9] . . . . .	10

## Elenco delle tabelle

4.1	Elenco del numero di esemplari di Boeing 737 MAX ritirati dal servizio, in relazione alle compagnie aeree che li possiedono, [4] . . . . .	15
4.2	Confronto tra il numero di ordini ricevuti dalle due compagnie concorrenti, Airbus e Boeing, [13] . . . . .	17

# 1. Introduzione

## 1.2 Storia del Boeing 737 MAX

Il Boeing 737 MAX, Figura 1.1, è un *liner* transonico a fusoliera stretta prodotto dalla azienda statunitense Boeing. Rappresenta la quarta generazione del Boeing 737, rimpiazzando il predecessore 737NG: è mostrato un confronto in Figura 1.2. La presentazione della nuova serie risale al 30 agosto 2011, in seguito all'annuncio da parte della società Airbus del nuovo A320neo, nel dicembre del 2010. Questo spinse l'azienda americana a progettare un nuovo velivolo, della stessa categoria, per reggere la competizione in mercato: le prime stime prevedevano un risparmio di carburante del 4% rispetto all'Airbus A320neo, con un'autonomia di distanza coincidente o superiore rispetto a quella del concorrente, [1].



Figura 1.1: Rappresentazione di un *rendering* del velivolo Boeing 737 MAX, [2]

In realtà la Boeing non necessitava di un aggiornamento di questa famiglia di velivoli, ma aveva l'unico intento di contrastare l'innovazione imposta dal velivolo della compagnia rivale.



Figura 1.2: Confronto tra 737 MAX (sotto) e 737NG (sopra)

Il velivolo è entrato in produzione nel 2014, effettuando il primo volo il 29 gennaio 2016. La certificazione FAA è stata ottenuta nel mese di marzo del 2017 e l'entrata in servizio risale al 22 maggio 2017, in seguito alla prima consegna alla compagnia aerea Malindo Air.

Il principale aggiornamento rispetto alla versione precedente riguarda posizionamento, peso e dimensione dei motori, con conseguente introduzione di un nuovo sistema di controllo al beccheggio, chiamato MCAS (*Maneuvering Characteristics Augmentation System*), [2].

Il 29 ottobre 2018, un 737 MAX, *Lion Air Flight 610*, si è schiantato causando la morte di 189 persone. Il 10 marzo 2019 si è verificato un ulteriore incidente riguardante un 737 MAX, *Ethiopian Airlines Flight 302*, con 157 vittime. Dopo questo evento la FAA ha preliminarmente ribadito, in data 11 marzo 2019, la aeronavigabilità del velivolo, ma successive analisi hanno portato l'ente federale, solo 2 giorni dopo, a interdire il volo di questa famiglia di velivoli. La causa degli incidenti è stata identificata nell'introduzione del MCAS, effettuata in maniera non conforme alle norme di sicurezza.

Subito dopo i tragici eventi Boeing ha lavorato per riprogettare il MCAS, che ha avuto un ruolo cruciale su entrambi i disastri. Le indagini hanno individuato le colpe nella mancata trasparenza della Boeing nell'innovazione inserita (MCAS) e nell'impropria certificazione, da parte della FAA, relativa a tale sistema. Difatti le sue specifiche tecniche e il suo funzionamento sono stati omessi nei manuali di volo del velivolo e di addestramento degli equipaggi. La Boeing ha sospeso la produzione nel dicembre 2019, con circa 400 velivoli in attesa di consegna; è stata ripresa successivamente nel maggio 2020, ad un ritmo basso.

In Figura 1.3 è proposto uno schema degli eventi chiave riguardanti il velivolo Boeing 737 MAX, in ordine cronologico, dal 2010 al 2019.

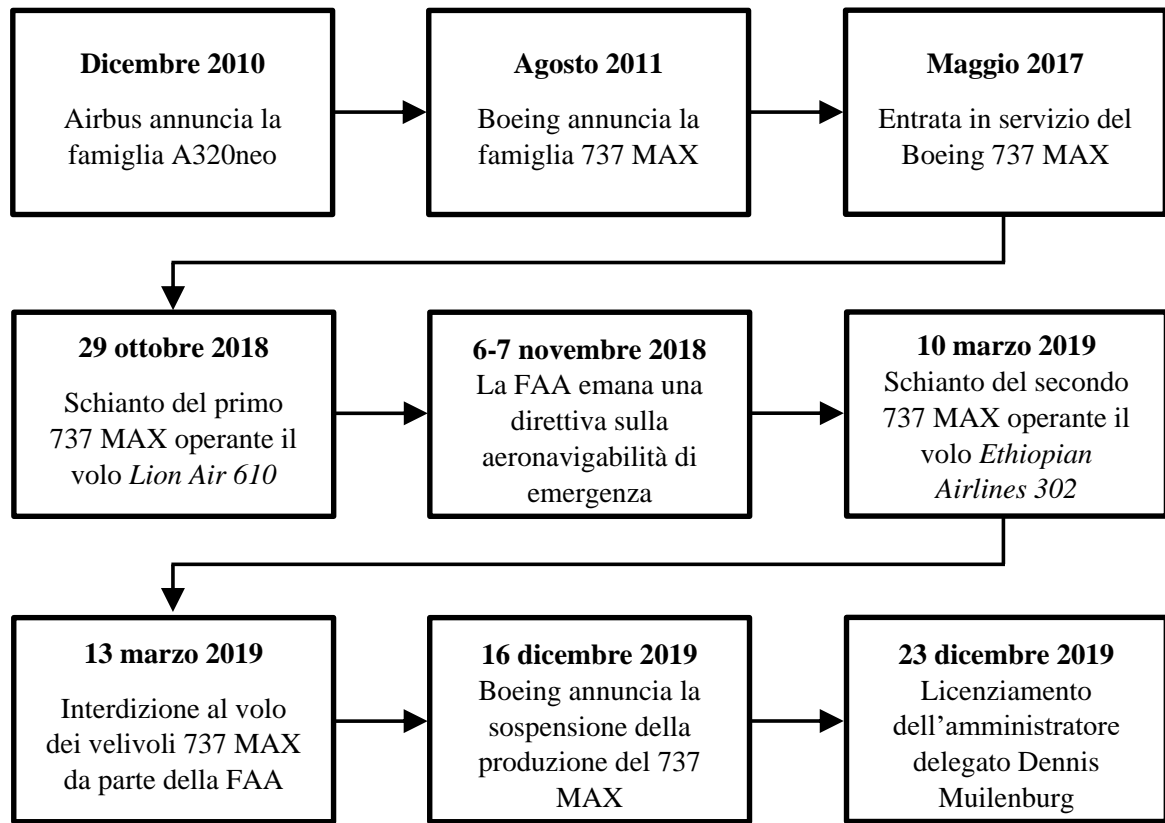


Figura 1.3: Cronologia degli eventi chiave del velivolo Boeing 737 MAX, dal 2010 al 2019, [4]

### 1.3 Obiettivi dell'elaborato

L'obiettivo dell'elaborato è descrivere le dinamiche degli incidenti del velivolo Boeing 737 MAX, definendo con dettaglio le cause determinanti, le quali sono connesse alla progettazione effettuata in maniera rapida e finalizzata semplicemente alla competizione in mercato. Si effettua anche un'analisi sulle conseguenze prodotte sull'azienda statunitense dall'interdizione al volo di tale famiglia di velivoli. Si è posta attenzione, inoltre, sulla trattazione della tematica dello stress industriale, che è individuato come causa e allo stesso tempo effetto degli eventi legati alla vicenda del Boeing 737 MAX.

## 2. Incidenti del Boeing 737 MAX

### 2.2 Volo *Lion Air 610*

Il primo incidente di un esemplare di Boeing 737 MAX risale al 29 ottobre 2018, e si tratta del volo *Lion Air 610* (JT610), partito da Jakarta alle 06:20 locali, 23:20 UTC, diretto verso Pangkal Pinang, [5]. Il contatto con il velivolo è stato perso poco dopo il decollo, con l'ultima comunicazione avvenuta alle 23:31:56 UTC ad un'altitudine di 130m. Il velivolo è precipitato nel Mare di Giava causando la morte di 189 persone tra passeggeri ed equipaggio. Il modello di aeromobile in questione era un Boeing 737 MAX 8, consegnato alla *Lion Air* il 13 agosto 2018, ed entrato in servizio il 18 agosto.

Come mostrato nelle Figure 2.1 e 2.2, in corrispondenza dell'ultimo minuto di volo la velocità verticale è aumentata notevolmente in negativo, con conseguente forte riduzione della quota che ha portato il velivolo a precipitare.

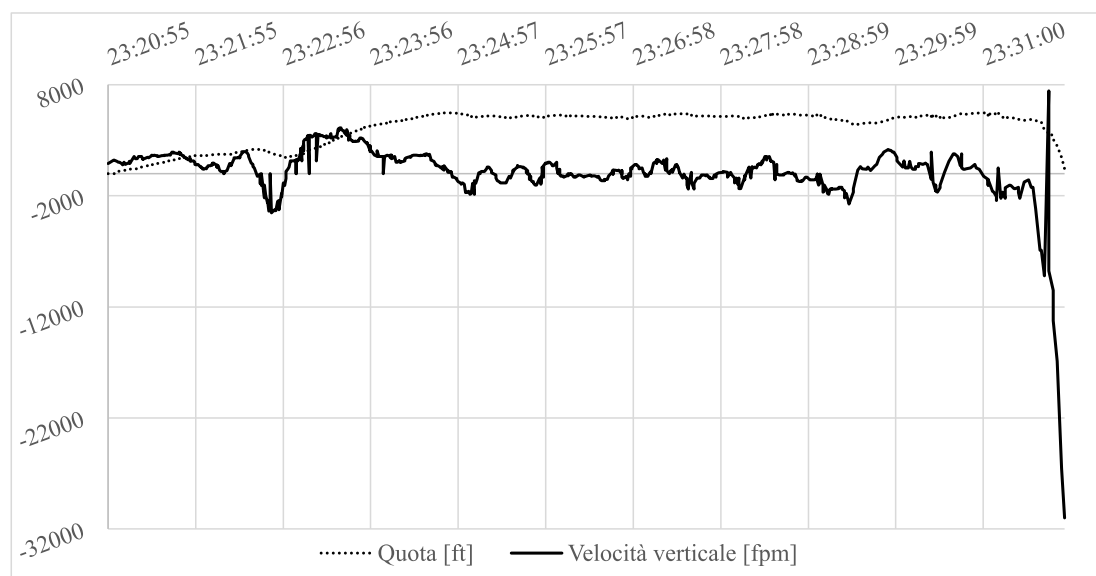


Figura 2.1: Andamenti della quota e della velocità verticale in UTC, JT610, [5]



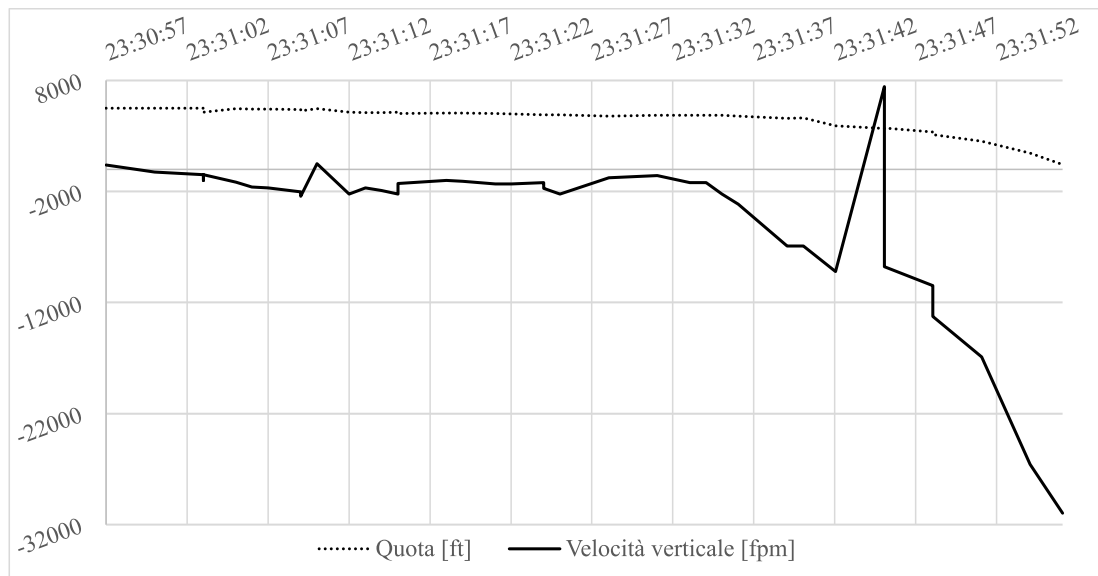


Figura 2.2: Andamenti della quota e della velocità verticale dell'ultimo minuto di volo in UTC, JT610, [5]

Come si vedrà in seguito nel Capitolo 2.3, ciò che ha determinato il precipitare del velivolo è stata una forte tendenza dello stesso a picchiare, nonostante il tentativo di ripristino delle condizioni di beccheggio da parte dei piloti.

## 2.3 Volo *Ethiopian Airlines 302*

Il secondo incidente di un Boeing 737 MAX 8 si è verificato il 10 marzo 2019. Il velivolo stava operando il volo *Ethiopian Airlines 302* (ET302), partito dall'aeroporto Internazionale Addis Abeba-Bole alle ore 08:38 locali, 05:38 UTC, e con destinazione Nairobi, [5].

Il contatto con il velivolo è stato perso circa 3 minuti dopo il decollo, con l'ultima comunicazione avvenuta alle 05:41:02 UTC ad un'altitudine di 2600m. Alle 05:44 UTC, sei minuti dopo il decollo, il velivolo si è schiantato a terra, ad una velocità di circa 1126 km/h e un angolo della traiettoria di  $-40^\circ$  rispetto al suolo, [7], causando la morte di 157 persone.

Come emerge dalla figura 2.3, l'andamento della quota e della velocità verticale negli ultimi istanti di comunicazione tra il velivolo e la torre di controllo risultavano oscillanti. Questo andamento spiega l'anomala tendenza pronunciata del velivolo a picchiare e la simultanea azione contrastante dei piloti che al fine di riottenere una configurazione di volo corretta, hanno operato manualmente, e quindi con MCAS disattivato, fino a poco prima dello schianto.

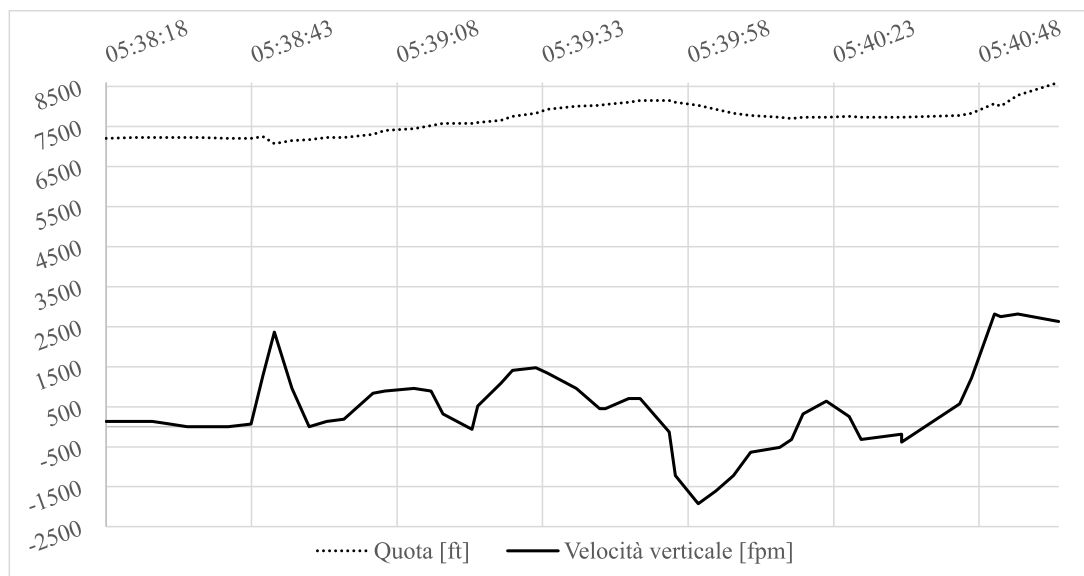


Figura 2.3: Andamenti della quota e della velocità verticale in UTC, ET302, [5]

### 3. Identificazione delle cause

In questa sezione si analizzano le possibili cause degli incidenti che hanno visto protagonista il velivolo Boeing 737 MAX. Prima di tale trattazione, è risultata necessaria l'introduzione di un preambolo in cui si descrivono gli aggiornamenti del velivolo in questione rispetto al predecessore, Boeing 737NG.

Il principale obiettivo dell'azienda statunitense era quello di proporre alle compagnie aeree un velivolo dotato di maggiore efficienza, facendo concorrenza al modello proposto da Airbus, evitando la progettazione di un velivolo ex novo, con conseguente necessità di riformare tutti i membri degli equipaggi delle compagnie aeree acquirenti. Questa procedura ha facilitato l'acquisto del prodotto, poiché le compagnie avrebbero evitato l'ulteriore investimento necessario alla preparazione dei piloti. Infatti, Boeing ha dichiarato che pilotare il nuovo velivolo avrebbe richiesto le stesse conoscenze necessarie per il velivolo della generazione precedente.

Come conseguenza, l'unica variazione importante riguarda i motori. Sostituendo i due motori precedenti (CFM56) con i *turbofan* CFM International LEAP-1B, il diametro è stato incrementato da 157cm a 176cm, il *bypass ratio* è aumentato da 5.1 a 9 e sono stati introdotti ugelli di tipo *chevron*.



Figura 3.1: Confronto tra i motori CFM56 del Boeing 737NG e i motori CFM LEAP-1B del Boeing 737 MAX 8, [6]

Questo aggiornamento è visibile in Figura 3.1. L'adozione di motori di maggior diametro ha comportato l'allungamento del carrello di atterraggio di 20 cm e il riposizionamento del motore più in avanti e ad una maggiore altezza dal suolo, per mantenere la corretta distanza da esso (che nei precedenti progetti era stata fissata a 43 cm).

## 3.2 Descrizione del MCAS

Durante le prime fasi di progettazione (nel 2012) emerse, dalle simulazioni di volo ad alte velocità e angoli di attacco (in particolare, superiori a  $14^\circ$ ), con flap non deflessi, una risposta non lineare del velivolo ai comandi del pilota con conseguente riduzione del margine di stabilità longitudinale. Questo effetto, molto probabilmente, era generato dalla nuova configurazione aerodinamica del velivolo dovuta all'introduzione dei nuovi motori. Infatti le gondole sono di per sé degli elementi aerodinamici e ad alti angoli d'attacco generano portanza non trascurabile per la dinamica di beccheggio. Nel caso del Boeing 737 MAX, queste sono più grandi rispetto al velivolo precedente e traslate in avanti, come già accennato. Queste modifiche comportano, quindi, un avanzamento del punto di applicazione della forza risultante sulla gondola motore, ovvero un aumento del braccio della portanza della gondola rispetto al baricentro del velivolo, oltre ad un lieve incremento della portanza stessa generata dal motore. La tendenza ad alti angoli d'attacco è, evidentemente, a cabrare, per cui il comportamento del velivolo è instabile al beccheggio in queste condizioni di volo. Ciò non è necessariamente un problema da un punto di vista generale, in quanto molti velivoli ad alte prestazioni (come quelli militari) presentano questa tendenza. Per un velivolo da trasporto civile, però, un comportamento del genere non è accettabile in quanto è richiesta stabilità aerodinamica maggiore, senza controlli applicati.

Per far fronte a tale comportamento anomalo del velivolo, i progettisti della Boeing pensarono, quindi, di introdurre un sistema di controllo automatico, chiamato MCAS (*Maneuvering Characteristics Augmentation System*), che correggesse l'erroneo comportamento del velivolo in questa parte limitata dell'involuppo di volo.

Il sistema si attivava solo al contemporaneo superamento di un limite fornito da uno dei due sensori di angolo d'attacco (osservabile in Figura 3.2) e di uno dell'accelerometro, in modo da inibirne l'attivazione al di fuori di quei particolari assetti di volo.



Figura 3.2: Rappresentazione del sensore destro dell'angolo d'attacco del velivolo Boeing 737 MAX



Figura 3.3: Rappresentazione dello stabilizzatore del velivolo Embraer ERJ-170, [8]

Quando attivo, il MCAS agisce direttamente sullo stabilizzatore (imprimendogli una rotazione di  $0.6^\circ$  ogni 10 secondi), come mostrato in Figura 3.3, senza che il pilota ne risenta sui comandi di volo. Il sistema è, quindi, diverso da un dispositivo anti-stallo, che fisicamente muove i comandi di volo del pilota e rimette il velivolo in una condizione ottimale,

stabilizzando il velivolo quando esso sta approcciando ad uno stallo, [8]. Lo scopo dell'introduzione del MCAS era quello di emulare le caratteristiche di manovrabilità del precedente Boeing 737 *Next Generation*, facendo sì che il 737 MAX presentasse la stessa stabilità.

Successivamente, nel 2016, furono effettuati i primi voli di prova necessari alla certificazione del velivolo, ed emerse anche alle basse velocità ed alti angoli di attacco (e.g. fase di salita, post-decollo) un comportamento non ottimale dell'aereo, con una riduzione del margine di stabilità longitudinale dovuta alle forze aerodinamiche generate dalle gondole motori. In queste situazioni, aumentando ulteriormente l'angolo di incidenza (e cioè avvicinandosi ad un possibile stallo aerodinamico), la forza aerodinamica generata dalle nuove gondole contribuisce con un momento cabrante maggiore, risultando in un comportamento diverso (più instabile) rispetto alle precedenti serie di 737. Fu quindi esteso l'uso del MCAS anche a questa parte dell'involuppo di volo, in una configurazione di flap deflessi, rimuovendo dalla logica di intervento il dato proveniente dall'accelerometro (che a basse velocità ne avrebbe impedito l'attivazione a causa di un fattore di carico, e quindi un'accelerazione, minore), ed aumentando notevolmente la velocità di rotazione dello stabilizzatore di coda (2.5° ogni 10 secondi), dal momento che a basse velocità è necessaria un'escursione maggiore delle superfici mobili per ottenere la medesima risposta, [8]. Lo schema complessivo di funzionamento del MCAS è rappresentato in Figura 3.4.

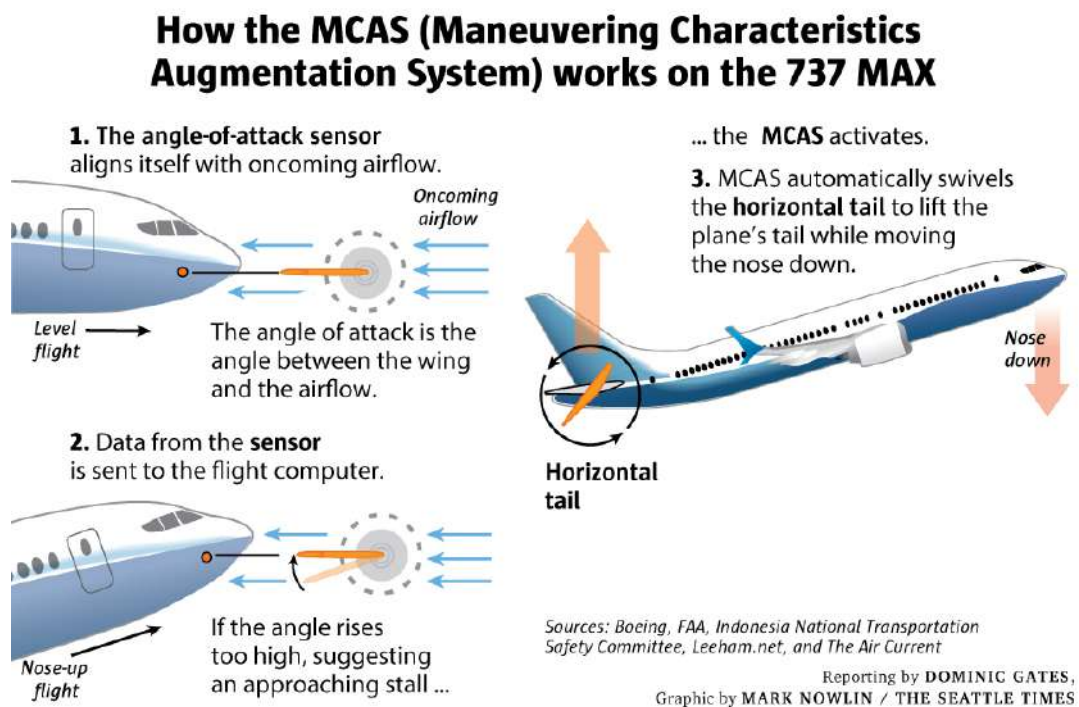


Figura 3.4: Schema di funzionamento del MCAS, [9]

Nell'aprile del 2017, alla consegna dei primi esemplari di 737 MAX, l'esistenza di questo impianto era descritta solo nel manuale di manutenzione e si riferiva alla prima versione del MCAS. Per quanto riguarda i manuali di volo dei piloti, invece, durante il processo di certificazione (marzo 2016) la Boeing formulò la richiesta (poi accolta dalla FAA) di rimuovere ogni riferimento al MCAS, giustificandola con il modesto impatto che il sistema poteva avere sulla condotta del velivolo. Per quanto riguarda la formazione dell'equipaggio, Boeing attivò un corso di sole 2 ore, relativo agli aggiornamenti apportati alla nuova generazione del velivolo, senza fare riferimento all'introduzione del MCAS, [1].

A seguito dell'incidente del volo *Lion Air 610*, furono aggiornati anche i manuali di volo, introducendo la descrizione dell'impianto MCAS.

### **3.3 Analisi degli incidenti**

In questa sezione si sviluppa un'analisi sui risultati finali delle indagini condotte dall'ente certificatore FAA, in collaborazione con gli ingegneri e le autorità competenti.

#### **3.3.1 *Lion Air 610***

Nel *report* finale del NTSC (*National Transportation Safety Committee*), pubblicato il 25 ottobre 2019, sono stati dichiarati diversi fattori contribuenti al tragico accaduto. Essi sono definiti come azioni, omissioni, eventi, condizioni o una loro combinazione, che, se eliminati, evitati o assenti, avrebbero ridotto la probabilità del verificarsi dell'incidente o mitigato la gravità delle sue conseguenze. Nello specifico, si tratta di errori di tipo aleatorio e sistematico. La prima categoria riguarda i problemi inerenti ai malfunzionamenti dei sistemi di rilevazione dell'angolo d'attacco del velivolo, in particolare sia gli eventuali guasti dei sistemi stessi sia le erronee manutenzioni. Il secondo tipo, invece, riguarda l'inappropriata formazione dell'equipaggio, a causa delle omissioni, da parte di Boeing, nei manuali di volo e di addestramento dei piloti, del funzionamento del MCAS. Inoltre, sulla maggior parte degli esemplari in attività dei 737 MAX (stimata intorno all'80%), l'allarme *AOA DISAGREE* non era stato abilitato correttamente, e l'azienda statunitense ne era a conoscenza. Questo allarme si attiva quando le letture dei due sensori di angolo d'attacco presentano delle discrepanze oltre il limite accettabile, come verificatosi nel caso del volo JT610.

C'è bisogno di puntualizzare sul fatto che, con interventi opportuni sui comandi di volo, sarebbe stato possibile disabilitare il MCAS. Tuttavia questo non è stato possibile, a causa della mancata preparazione dei piloti. Dopo l'incidente verificatosi durante questo volo Boeing ha previsto un aggiornamento dei manuali.

### **3.3.2 *Ethiopian Airlines 302***

Nell'incidente che ha interessato la compagnia aerea *Ethiopian Airlines* pochi mesi dopo la prima tragedia, si sono ripresentate le stesse problematiche già discusse nel paragrafo precedente. In seguito al primo incidente, individuati i problemi principali, la Boeing e la FAA iniziarono ad indagare riguardo i fallimenti del MCAS, introducendo corsi di formazione e aggiornando i manuali di volo. La compagnia aerea *Ethiopian Airlines* non aveva predisposto l'equipaggio ad un adeguato aggiornamento, difatti il primo ufficiale ai comandi del volo ET302 non aveva mai effettuato una sessione al simulatore del Boeing 737 MAX, nonostante la compagnia etiope fosse stata una delle prime a riceverlo per le esercitazioni.

Si analizzano brevemente le dinamiche del volo ET302. Solo due minuti dopo il decollo, si attivò il MCAS inavvertitamente, che, come già successo per il volo JT610, portò il velivolo a picchiare. Nel frattempo, i piloti cercarono di ristabilizzare il velivolo, riuscendo ad alzarne il muso, ma continuando a perdere quota, nonostante i motori lavorassero alla massima potenza. Per porre rimedio a questo inconveniente, decisero di spegnere il sistema elettrico del trim, disabilitando di conseguenza anche il MCAS. Tuttavia, così facendo, persero il controllo dello stabilizzatore, che restò fermo nella condizione di assetto errata indotta dal MCAS. In questo modo, non era più possibile controllare il velivolo, e l'unica alternativa era ruotare manualmente lo stabilizzatore attraverso un'apposita ruota. A causa delle elevate forze aerodinamiche sull'equilibratore (dovute all'alta velocità raggiunta avendo lasciato i motori a piena potenza), i piloti non riuscirono a manovrare lo stabilizzatore al fine di disporlo in una posizione neutra, e chiesero alla torre di controllo di ritornare in aeroporto per atterrare, ottenendone il consenso. Nel frattempo il velivolo continuava a perdere quota, e per rimediare, i piloti riattivarono il sistema elettrico del trim, cercando di equilibrare il velivolo tirando le *cloche*. L'attivazione contemporanea del MCAS, però, riportò ancora il velivolo in forte picchiata. Persa la comunicazione con la torre di controllo, il velivolo si schiantò al suolo pochi minuti dopo, ad una velocità di circa 1126 km/h.



### 3.4 Riassunto delle cause

I motori CFM International LEAP del 737 MAX hanno un rapporto di *bypass* più elevato e una struttura più grande rispetto ai motori dei precedenti modelli Boeing 737, quindi sono posizionati più in alto e più avanti sull'ala. Ciò destabilizza il beccheggio dell'aeromobile, portandolo ad angoli di attacco (AoA) più elevati a causa di una modifica dell'aerodinamica. Per far fronte a questo inconveniente, Boeing ha progettato un sistema di aumento delle caratteristiche di manovra (MCAS) per la serie 737 MAX, cercando di ottenere un livello di manovrabilità del velivolo simile a quella della generazione precedente. I comandi di picchiata, se innescati dal singolo errore del sensore, sono da considerare un difetto di progettazione se l'equipaggio non è stato preparato a dovere. Un malfunzionamento del sensore AoA potrebbe indurre erroneamente il sistema MCAS a ritenere che l'aereo stia stallando, causando la sua attivazione e la conseguente rotazione del muso del velivolo verso il basso, al fine di uscire da una configurazione stallata, inesistente in quell'istante.

Durante la progettazione e la certificazione del Boeing 737 MAX, sono state fatte ipotesi riguardo ad azioni dell'equipaggio in risposta a eventuali guasti, che si sono rivelate errate. Sulla base di queste ipotesi, l'affidamento del MCAS a un singolo sensore AoA è stato ritenuto appropriato, e ha soddisfatto tutti i requisiti di certificazione.

Un ulteriore problema va individuato nel fatto che non è stato possibile disattivare il MCAS in maniera indipendente, ma occorreva arrestare tutto il sistema elettrico del trim, impedendo allo stabilizzatore di rimanere in una condizione neutra di esercizio.

## 4. Conseguenze

A causa dei due incidenti, la Boeing ha affrontato la sua più grande crisi mai registrata. La serie dei 737 era stata, fino ad allora, il suo principale motivo di vanto, e il 737 MAX avrebbe dovuto procedere nella stessa direzione. Nonostante ciò, in seguito agli avvenimenti registratisi, tutta la serie dei nuovi velivoli è stata interdetta al volo. In Tabella 4.1 sono elencati i numeri dei velivoli, posseduti dalle diverse compagnie aeree, soggetti a tale restrizione.

### 4.2 Stress industriale

L'interdizione al volo del Boeing 737 MAX ha avuto un profondo effetto finanziario sull'industria dell'aviazione e un effetto significativo sull'economia nazionale degli Stati Uniti, essendo comunque Boeing il maggiore esportatore manifatturiero statunitense. Nessuna compagnia aerea ha preso in consegna il MAX durante la messa a terra. Boeing ha rallentato la produzione del 737 MAX a 42 aeromobili al mese fino a dicembre 2019, quando si è fermata, fino a quando l'aereo non è stato riapprovato dalle autorità di regolamentazione. Boeing ha sofferto direttamente per l'aumento dei costi, la perdita di vendite e ricavi, perdita di reputazione, contenzioso delle vittime, risarcimento dei clienti e riduzione del valore delle azioni. Nel gennaio 2020, la società ha stimato una perdita di 18.4 miliardi di dollari per il 2019 e ha riportato 183 ordini annullati per il MAX durante l'anno. Nel febbraio 2020, la pandemia globale di coronavirus e il conseguente divieto di viaggio hanno creato ulteriore incertezza per Boeing. Alla fine di luglio 2020, gli ordini netti di Boeing per il 737 MAX erano diminuiti di 836 aerei.

Nazione	Compagnia aerea	Numero di esemplari
USA	<i>Southwest Airlines</i>	34
USA	<i>American Airlines</i>	24
Canada	<i>Air Canada</i>	24
Cina	<i>China Southern Airlines</i>	22
Norvegia	<i>Norwegian Air</i>	18
UK	<i>TUI Fly</i>	15
Cina	<i>Air China</i>	15
India	<i>SpiceJet</i>	13
Canada	<i>WestJet</i>	13
Turchia	<i>Turkish Airlines</i>	11
Dubai	<i>FlyDubai</i>	11
Cina	<i>Shanghai Airlines</i>	11
Cina	<i>Hainan Airlines</i>	11
Cina	<i>Xiamen Airlines</i>	10
Indonesia	<i>Lion Air</i>	10
Repubblica Ceca	<i>Smartwings</i>	7
Brasile	<i>GOL Airlines</i>	7
Cina	<i>Shandong Airlines</i>	7
Singapore	<i>SilkAir</i>	6
Messico	<i>Aeromexico</i>	6
Cina	<i>Shenzhen Airlines</i>	6
India	<i>Jet Airways</i>	5
Polonia	<i>LOT</i>	5
Oman	<i>Oman Air</i>	5
Argentina	<i>Aerolineas Argentinas</i>	5
Canada	<i>Sunwing Airlines</i>	4
Cina	<i>China Eastern Airlines</i>	4
Etiopia	<i>Ethiopian Airlines</i>	4
Italia	<i>Air Italy</i>	3
altri	- - -	31

Tabella 4.1: Elenco del numero di esemplari di Boeing 737 MAX ritirati dal servizio, in relazione alle compagnie aeree che li possiedono, [4]

Al momento della ricertificazione da parte della FAA nel novembre 2020, i costi diretti totali stimati del blocco di vendite erano di 20 miliardi di dollari, e i costi indiretti di oltre 60 miliardi di dollari, [12]. Una riunione speciale del consiglio, il 20 ottobre 2019, ha discusso l'effetto finanziario dei *groundings*, tra speculazioni su possibili riduzioni del personale.

Il 23 dicembre 2019 il CEO dell'azienda statunitense Dennis Muilenburg, a seguito di varie pressioni da parte del *board* direttivo di Boeing, si è dimesso dall'incarico di amministratore delegato. Ciò è accaduto come conseguenza della necessità di effettuare un cambio di *leadership* per il ripristino della fiducia nel colosso americano dell'aerospazio. L'incarico è stato affidato temporaneamente a Greg Smith fino a che il suo posto viene preso il 13 gennaio 2020 da David Calhoun.

A decretare la fine della carriera di Muilenburg sarebbero stati anche i pessimi rapporti tra lui stesso e la FAA. Il capo della stessa, Stephen Dickson, ha rimproverato l'amministratore di Boeing per le continue pressioni volte ad approvare più velocemente il decollo del velivolo a corridoio singolo, fermo in tutto il mondo. Dickson non soltanto ha invitato Muilenburg a non chiedere favori, ma anche a fornire tutti i documenti necessari per descrivere i cambiamenti al sistema anti-stallo introdotti dopo i due incidenti in Africa e in Asia.

La messa a terra dei Boeing 737 MAX, oltre a danneggiare l'azienda statunitense, ha provocato anche una crisi per le molte compagnie aeree che utilizzavano il velivolo in questione. In particolare, tra i mesi di settembre e dicembre del 2019, la compagnia irlandese Ryanair è stata costretta a licenziare 500 piloti e 400 membri del personale di bordo in eccesso. L'azienda, infatti, aveva ordinato 135 modelli di 737 MAX, puntando alla riduzione dei costi di combustibile, [15]. Inoltre, il giorno 11 febbraio 2020, l'italiana Air Italy è stata costretta alla chiusura, licenziando oltre 1400 dipendenti. La compagnia aveva una flotta di per sé ridotta e includeva tre Boeing 737 MAX, oltre ad altri due ordinati, [16]. L'azienda statunitense Spirit AeroSystems, specializzata nella produzione di parti di fusoliera e di gondole motori del Boeing 737 MAX, ha annunciato, il 16 maggio 2020, il licenziamento di 4250 dipendenti sui 10500 nella sede di Wichita.

In Tabella 4.2 sono presentati i dati relativi agli ordini che sono stati ricevuti dalla Boeing e dalla Airbus negli ultimi 10 anni. Come è evidente, l'azienda statunitense è in negativo già nel 2019, perdendo nettamente al confronto nel 2020, in cui anche l'azienda europea ha subito un calo a causa della pandemia.

I dati trasmessi da Moody's (società privata internazionale che si occupa di ricerca finan-

ziaria, [14]), rivelavano, nel gennaio 2020, che le aziende a risentire del blocco produzione dei 737 MAX sarebbero state almeno 24: tra di esse anche General Electric e Honeywell.

	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011
Airbus	297	768	747	1109	731	1080	1456	1503	833	1419
Boeing	-1048	-87	893	912	668	768	1432	1355	1203	805

Tabella 4.2: Confronto tra il numero di ordini ricevuti dalle due compagnie concorrenti, Airbus e Boeing, [13]

### 4.3 Futuri aggiornamenti e rientro in esercizio

La Boeing ha sviluppato un aggiornamento del software MCAS per controllare in modo più sicuro la stabilità longitudinale, fornendo ulteriori livelli di protezione nel caso in cui i sensori AoA restituiscano dati errati. Il software è stato sottoposto a centinaia di ore di analisi, test di laboratorio, verifica in un simulatore e due voli di prova, tra cui un test di certificazione in volo con rappresentanti della FAA a bordo come osservatori, [18]. Il sistema di controllo prevede ora di confrontare gli input di entrambi i sensori AoA; inoltre, non può comandare lo stabilizzatore più di quanto possa essere neutralizzato dall'equipaggio tirando indietro la barra. I piloti continueranno ad avere la possibilità di disabilitare il MCAS e controllare manualmente l'aereo, [18]. Questi aggiornamenti riducono il carico di lavoro dell'equipaggio in situazioni di volo non normali, e impediscono che dati errati causino l'attivazione del MCAS.

La revisione del progetto del Boeing 737 MAX ha richiesto più di 22 mesi, fino al mese di novembre del 2020, e ha comportato il lavoro a tempo pieno di oltre 40 ingegneri, ispettori, piloti e personale di supporto tecnico. Lo sforzo ha rappresentato per la FAA più di 60000 ore di revisione, test di certificazione e valutazione dei documenti pertinenti. Ciò include circa 50 ore di volo o test al simulatore, e analisi di più di 4000 ore di volo e test al simulatore effettuati dalle compagnie che possedevano il velivolo, [17].

Il primo volo di linea di un Boeing 737 MAX dopo mesi è stato gestito dalla compagnia *low-cost* brasiliana Gol Transportes Aéreos, da San Paolo a Porto Alegre, in Brasile, il 10 dicembre 2020.

## 5. Conclusioni

Boeing a lungo è stata a capo dell'ingegneria aeronautica, ed ha accumulato esperienza nel soddisfare le esigenze del settore, ancor prima che la domanda aumentasse. Per un'azienda di questo calibro, commettere errori così fatali nel processo di sviluppo di un aereo, per far fronte efficacemente alla concorrenza, è piuttosto sconcertante.

Mediante l'analisi dei dati, il fallimento del Boeing 737 MAX può essere attribuito alla fretta dell'organizzazione per lo sviluppo, mancando sulla parte formativa e comunicativa dell'implementazione tecnologica, nel processo di raggiungimento dell'eccellenza della stessa. Quindi, l'azienda statunitense, che è riuscita nell'impresa di crescere nel tempo fino ad avere un'importanza internazionale, a questi livelli dovrebbe dare più importanza allo sviluppo tecnologico, cercando di abbandonare una logica di progetto spinta da interessi strettamente economici. I costruttori internazionali, infatti, sono ad oggi pochissimi: una maggiore concentrazione sull'evoluzione dei propri prodotti potrebbe solamente fornire maggiori garanzie e sicurezza, sia per Boeing che per le compagnie aeree acquirenti, e i loro clienti.

La problematica da identificare è, quindi, maggiormente di carattere etico piuttosto che tecnologico.

### 5.2 Discussione sull'etica ingegneristica

Gli analisti hanno suggerito che, al fine di riacquistare gloria e reputazione, occorre che l'azienda ponga l'attenzione sulla sua cultura dell'innovazione, come ha affermato Richard Aboulafia, analista dell'aviazione presso Teal Group:

*"Una lezione è che Boeing deve concentrarsi sull'eccellenza ingegneristica ed essere meno dominata dal marketing e dalle vendite. Ciò potrebbe rendere più rigorose le tecnologie con risultati imprevedibili", [4].*

Il *report* finale sugli incidenti del Boeing 737 MAX, pubblicato il 16 settembre 2020, viene aperto con le seguenti affermazioni:

*"Sia la Boeing che la FAA condividono la responsabilità per lo sviluppo e la certificazione di un velivolo non sicuro. [...] Boeing è passata dall'essere una grande azienda di ingegneria a un grande business focalizzato sul successo finanziario. Continuando sulla stessa strada seguita con il 737 MAX, dove la sicurezza è stata sacrificata alle pressioni di produzione, espone l'azienda a potenzialmente ripetere quegli errori e a ulteriori danni alla reputazione e perdite finanziarie."*, [19].

Dall'analisi di tutti gli avvenimenti, quindi, si evince che risulta necessario seguire l'etica ingegneristica. Questo ragionamento vale per Boeing, ma si deve estendere anche agli enti certificatori, che non devono cedere alle pressioni dei costruttori, e alle compagnie aeree. Infatti, una parte della responsabilità dell'incidente del volo ET302 è da attribuire alla compagnia *Ethiopian Airlines*, data la mancata preparazione dei suoi piloti, nonostante la disponibilità del nuovo simulatore. Quindi, anche le compagnie aeree, sulla stessa linea di Boeing, dovrebbero porre maggiore attenzione sulla sicurezza dei clienti, mettendo a disposizione personale competente e sempre aggiornato rispetto al rapido sviluppo tecnologico.

Tutti i codici etici contemporanei promulgati dalle principali società di ingegneria affermano che la responsabilità primaria di un ingegnere è proteggere sicurezza, salute e benessere del pubblico, con lo scopo di ricercare soluzioni in grado di aumentare il *comfort* individuale e il benessere collettivo. Da ciò discende la responsabilità sociale dell'ingegnere, che va oltre al mero rispetto di prescrizioni normative, assumendo nella coscienza professionale la valenza di un vero e proprio imperativo. Si potrebbe parlare, in tal direzione, del concetto di *Whistle-Blowing*. Tutti gli ingegneri hanno il dovere di segnalare qualsiasi ingegneria difettosa di cui sono a conoscenza. Se un'organizzazione rifiuta di fare da sola i passi necessari per risolvere un problema, è compito dell'ingegnere essere un informatore e segnalare eventuali errori di progetto, al fine di garantire il già citato benessere collettivo.

# Bibliografia

- [1] D. Karami, in *Data analyzing about the crashes of Boeing 737 max*, Maggio 2020.
- [2] Boeing 737 MAX,  
<https://www.boeing.com/commercial/737max/>
- [3] J. Herkert, J. Borenstein, K. Miller, in *The Boeing 737 MAX: Lessons for Engineering Ethics*, Giugno 2020.
- [4] M. Laeequddin, Dr. S. Gonela, R. Dikkatwar, Dr. Sudesh, *Cascading effect of Boeing 737 Max Development*, Febbraio 2020.
- [5] Flight RADAR,  
<https://www.flightradar24.com>
- [6] Flieger Faust, <https://www.fliegerfaust.com/aviation-news-737-max-2636866885.html>
- [7] Aviation Safety Network,  
<https://aviation-safety.net/database/record.php?id=20181029-0>
- [8] Wikipedia, MCAS,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Maneuvering\\_Characteristics\\_Augmentation\\_System](https://en.wikipedia.org/wiki/Maneuvering_Characteristics_Augmentation_System)
- [9] *The Seattle Times*,  
<https://www.seattletimes.com/seattle-news/times-watchdog/the-inside-story-of-mcas-how-boeings-737-max-system-gained-power-and-lost-safeguards/>
- [10] Jackie Wattles, *CNN Business*, *Boeing has plunged in market value since Ethiopia crash*.



- [11] *Aviation Report*,  
<https://www.aviation-report.com/737-max-continua-a-perdere-ordini-e-accumulare-cancellazioni-emergenza-sanitaria-aggrava-la-difficile-situazione-economica-di-boeing/>
- [12] *Groundings* del Boeing 737 MAX,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Financial\\_impact\\_of\\_the\\_Boeing\\_737\\_MAX\\_groundings](https://en.wikipedia.org/wiki/Financial_impact_of_the_Boeing_737_MAX_groundings)
- [13] Competizione tra Airbus e Boeing,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Competition\\_between\\_Airbus\\_and\\_Boeing](https://en.wikipedia.org/wiki/Competition_between_Airbus_and_Boeing)
- [14] Moody's, <https://www.moody's.com/>
- [15] *Europa Today*,  
<https://europa.today.it/attualita/ryanair-licenziamenti-piloti-personale.html>
- [16] Air Italy, Wikipedia,  
[https://it.wikipedia.org/wiki/Air\\_Italy#Storia](https://it.wikipedia.org/wiki/Air_Italy#Storia)
- [17] *Summary of the FAA's Review of the Boeing 737 MAX, Return to Service of the Boeing 737MAX Aircraft*, 18 novembre 2020, FAA
- [18] Aggiornamento del MCAS, Boeing,  
[http://www.boeing.com/commercial/737max/737-max-software-updates\\_it.page](http://www.boeing.com/commercial/737max/737-max-software-updates_it.page)
- [19] *Final Committee Report, The Design, Development & Certification of the Boeing 737 MAX*, report finale sugli incidenti del Boeing 737 MAX, *Committee on Transportation and Infrastructure*, 16 settembre 2020