

COLÉGIO SÃO LUÍS

**ENSINO MÉDIO
CURSO DE METODOLOGIA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA**

ANDRÉ MACEDO MARTINELLI

**Aviação Comercial: Uma investigação sobre o equilíbrio entre progresso
tecnológico, segurança e impactos ambientais.**

**São Paulo
2025**

ANDRÉ MACEDO MARTINELLI

Aviação Comercial: Uma investigação sobre o equilíbrio entre progresso tecnológico, segurança e impactos ambientais

Artigo apresentado como requisito de aprovação em “Metodologia de Iniciação Científica”, na 2ª série do EM do Colégio São Luís

Orientador: Prof. André Leitão

São Paulo
2025

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha paixão pela aviação, que me acompanha desde os primeiros sonhos de criança. Foi ela que me impulsionou a buscar respostas, a entender os céus e a transformar admiração em conhecimento. Que este trabalho represente não apenas uma etapa acadêmica, mas o voo contínuo de um sonho que nunca pousou.

AGRADECIMENTO

Meu agradecimento principal vai para o professor André Leitão, que me orientou na escrita e na realização desse trabalho. E não só isso, como também me fez gostar cada vez mais de física com suas aulas espetaculares, repletas de dicas e ensinamentos que me incentivam todos os dias a estudar para meu objetivo de passar em uma faculdade boa e seguir a minha carreira futura, a qual desejo muito que seja em consonância com a aviação. Além disso, também tenho um agradecimento especial para o Professor José Matiélo que esteve sempre disposto a ajudar e orientar todos os alunos com muito carinho e dedicação nas aulas de Metodologia de Iniciação Científica e nos manter cientes de todos os recursos e datas para a realização e entrega desse projeto, além de ter apresentado aos meus olhares a Química em uma perspectiva diferente, tornando-se meu componente curricular favorito no Ensino Médio. Por fim, mas não menos importante, não poderia deixar de agradecer grandiosamente as professoras Dayse Ramos e Daniela Milaneze que me apresentaram dos mais diversos cenários do vestibular e me fizeram, com isso, potencializar meus estudos e minha vontade de estudar e persistir com um bom desempenho acadêmico, sem deixar de mencionar, é claro, todo o carinho, apoio, respeito, parceria, conselhos valiosos e a gentileza que sempre tive por parte das duas excepcionais docentes. Com isso, não tenho palavras para agradecer a todos vocês por terem transformado meu ensino médio e com toda certeza minhas perspectivas futuras.

EPIÍGRAFE

“O desejo de voar é uma ideia que nos foi transmitida pelos nossos antepassados que, nas suas cansativas viagens por terras sem caminhos nos tempos pré-históricos, olhavam com inveja para os pássaros que voavam livremente pelo espaço, a toda velocidade, acima de todos os obstáculos, na estrada infinita do ar.”

– Wilbur Wright

RESUMO

A aviação comercial passou por um processo de evolução marcado por importantes inovações tecnológicas, desde os primeiros experimentos de Santos Dumont e dos irmãos Wright até a introdução dos motores a jato e *turbofans*, que representam hoje o estágio mais eficiente e sustentável da propulsão aérea. Esse desenvolvimento contribuiu para o crescimento do tráfego aéreo mundial, trazendo impactos econômicos, sociais e logísticos, mas também desafios relacionados à segurança e à sustentabilidade ambiental. Nesse contexto, episódios como as falhas do Boeing 737 MAX, resultantes de problemas no sistema MCAS, evidenciam a necessidade de integração entre tecnologia, treinamento e processos de certificação. Por outro lado, avanços recentes em aeronaves como o próprio 737 MAX, após suas modificações, e o Airbus A320neo demonstram os esforços do setor em buscar maior eficiência, segurança e redução de emissões. Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo analisar esses marcos da evolução da aviação comercial, discutindo suas contribuições e limitações, bem como avaliar os desafios atuais e futuros do setor, com ênfase no equilíbrio entre inovação tecnológica, preservação ambiental e segurança operacional.

Palavras-chave: Aviação. Impactos Ambientais. Avanços Tecnológicos. Acidentes. Perspectivas.

ABSTRACT

Commercial aviation has undergone an evolutionary process marked by significant technological innovations, from the early experiments of Santos Dumont and the Wright brothers to the introduction of jet engines and turbofans, which today represent the most efficient and sustainable stage of aircraft propulsion. This development has contributed to the growth of global air traffic, bringing economic, social, and logistical impacts, but also challenges related to safety and environmental sustainability. In this context, episodes such as the Boeing 737 MAX failures, resulting from problems with the MCAS system, highlight the need for integration between technology, training, and certification processes. On the other hand, recent advances in aircraft such as the 737 MAX itself, after its modifications, and the Airbus A320neo demonstrate the industry's efforts to achieve greater efficiency, safety, and emissions reduction. Given this scenario, this paper aims to analyze these milestones in the evolution of commercial aviation, discussing their contributions and limitations, as well as assessing the sector's current and future challenges, with an emphasis on the balance between technological innovation, environmental preservation, and operational safety.

Keywords, Mots-clès e Palabras clave: Aviation. Environmental Impacts. Technological Advances. Accidents. Perspectives.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Como o MCAS funciona no 737 MAX	17
Figura 2: Boeing 737 NG e Boeing 737 MAX: Diferença nos motores.....	19
Figura 3: Posição dos motores distintas nos modelos 737-800 e 737-8 MAX	19
Figura 4: Stick Shaker	20
Figura 5: Destroços do voo JT610	22
Figura 6: Destroços do Acidente da Ethiopian Airlines	24
Figura 7: MCAS no Cockpit	24
Figura 8: Boeing 737 Max 8 da Gol em operação	25
Figura 9: Airbus A320 neo e Boeing 737 MAX lado a lado	27
Figura 10: Evolução dos motores das aeronaves da família 737	28
Figura 11: Características tecnológicas do Boeing 737 MAX	29
Figura 12: Detalhes do Airbus A320 neo	30
Figura 13: Uso do SAF em abastecimento de Aeronave 4	32
Figura 14: Gráfico	33
Figura 15: Representação de modelo ZEROe da Airbus	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	737 MAX: A POLÊMICA E A TECNOLOGIA POR TRÁS DE NEGLIGÊNCIA, DESTROÇOS E VÍTIMAS	16
3	A CONTRAPARTIDA: OS AVANÇOS TECNOLÓGICOS E ESTRUTURAIS NO 737 MAX E EM SEU PRINCIPAL CONCORRENTE: O BEM-SUCEDIDO AIRBUS A320-251 NEO	25
3.1	AVANÇOS TECNOLÓGICOS E ESTRUTURAIS NO BOEING 737 MAX	27
3.1.1	O Combustível e a Economia dos 737: Impactos na operação e no Meio Ambiente	29
3.2	AVANÇOS TECNOLÓGICOS E ESTRUTURAIS NO CONCORRENTE DO 737 MAX: O AIRBUS A320NEO	30
4	AS TECNOLOGIAS, O MEIO AMBIENTE E O COMPROMISSO COM O FUTURO E COM AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	31
4.1	O SAF: COMBUSTÍVEL SUSTENTÁVEL DE AVIAÇÃO	31
4.2	PERSPECTIVAS FUTURAS PARA A AVIAÇÃO	34
5	CONCLUSÃO OU CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
6	REFERÊNCIAS	37

1. INTRODUÇÃO

A aviação comercial, antes de seu sucesso e influência na vida das pessoas, passou por inúmeras modificações e aprimorações desde seus primórdios, baseados em técnicas, análises e testes que buscavam sempre avanços no setor, sejam tecnológicos ou estruturais, mas sempre voltados à segurança, eficiência e sustentabilidade, principalmente com o avanço das mudanças climáticas.

No começo da história da aviação, surgiram nomes que foram fundamentais para que o setor tivesse reconhecimento e aprimorações, ganhando destaque com o passar do tempo. Apaixonado pela inovação, Santos Dumont já colecionava feitos aéreos antes do famoso voo com o 14-Bis, como a construção do menor balão já fabricado para a ascensão de uma pessoa a bordo, que voou por cinco horas, também na França, em julho de 1898. Dumont prosseguiu com o pioneirismo, associando motores de combustão interna a balões, construindo engenhosos lemes, o que resultou no dirigível. O 14-bis, ou *Oiseau de Proie* (ave de rapina), é uma das maiores criações do mineiro Alberto Santos Dumont. Inicialmente, o 14-bis era um aeroplano construído unindo-se ao balão 14. Ainda em testes, o projeto de avião tinha em seu corpo acoplado um balão. O objetivo de Dumont era que o balão reduzisse o peso do aeroplano fazendo com que a decolagem fosse facilitada. Após mais testes, percebeu-se que o equipamento gerava muito arrasto e comprometia a velocidade do avião. O nome do icônico avião se veio do uso do balão 14.

O primeiro teste foi feito em 19 de julho de 1906, ainda conectado ao balão. Somente em agosto do mesmo ano que o 14-bis ganhou o design com que ficou famoso. Após duas tentativas de voo, o aeroplano levantou-se e voou. Apesar da sua instabilidade, Santos Dumont se disse satisfeito. Seu motor, inicialmente, tinha potência de 24 cavalos, o que logo foi alterado para um motor náutico Antoniette de 50 cavalos-vapor, que vale 36774.9375W. A partir disso, o 14-bis foi nomeado *Oiseau de Proie*, assim como citado anteriormente. O brasileiro, que inclusive tem seu nome em um dos aeroportos mais icônicos e belos do Brasil, o Aeroporto Santos Dumont, no Rio de Janeiro, prosseguiu com o desenvolvimento da sua máquina de voar. Em 1909, decolou seu avião Demoiselle, um dos primeiros aeroplanos do mundo, parecido com um ultraleve.

Nos Estados Unidos, os irmãos Wright faziam estudos iniciais com planadores e logo em seguida partiram para a construção de sua primeira aeronave,

batizada de *Flyer* (às vezes chamado de Flyer 1 ou Flyer 1903), a qual possuía duas hélices impulsoras, que eram acionadas por um único motor instalado ao lado do piloto. Inicialmente procuraram muitos fabricantes de automóveis diferentes na esperança de encontrar um motor leve movido a gasolina que pudesse alimentar a aeronave de forma eficiente.

Como nada disponível atendia às suas necessidades, os Wrights recorreram ao amigo e colega de trabalho Charlie Taylor, que conseguiu construir um motor do zero. O projeto do motor era rudimentar, mesmo para os padrões da época. Entretanto, possuía características notáveis, tais como um motor de quatro cilindros em linha refrigerado a água e seu cárter era feito de alumínio para reduzir o peso. Hoje, a maioria dos motores de aeronaves é feita de alumínio, o que mostra a influência desses estudos primordiais. Em operação, o motor podia gerar 12 cavalos de potência, o que vale 7354,9875 watts (W). Com isso, perceberam, por meio de experimentação e cálculo, que uma hélice agia como uma asa rotativa, que poderia fornecer sustentação e empuxo para o aeroplano. Elas giravam lentamente e giravam para longe uma da outra (a esquerda girava no sentido anti-horário, a direita no sentido horário) para reduzir os efeitos giroscópicos negativos na aeronave em voo. Esse efeito é mais pronunciado nos componentes rotativos, como a hélice e o motor. Quando a aeronave guina (vira para a esquerda ou para a direita), o efeito giroscópico faz com que o nariz da aeronave se incline para cima ou para baixo, dependendo da direção da curva. Esse efeito deve ser gerenciado pelos pilotos para manter o controle. As hélices eram movidas por uma roda dentada simples, mas eficaz, e com transmissão por corrente, não muito diferente da operação de uma bicicleta.

Em 17 de dezembro de 1903, às 10h35, Orville Wright decolou do trilho de lançamento em Kitty Hawk, na Carolina do Norte, e voou por 12 segundos a uma altitude de 8 pés, pousando a 120 pés de distância. Embora sua velocidade no ar fosse de apenas 31 mph, o que vale 49,8897 km/h, e seu voo fosse mais curto do que o comprimento de um avião de passageiros moderno, os irmãos Wright conseguiram o impossível. Mais três voos foram feitos naquele dia, cada um mais longo que o anterior.

Em suma, tanto os irmãos Wright, quanto Santos Dumont contribuíram de maneira extraordinária para o desenvolvimento inicial da aviação, que ganhou grande espaço no mercado e tornou-se fundamental na vida de muitas pessoas. Até os dias atuais discutem-se quem foi, de fato, foi o pioneiro. A descoberta de problemas e

obstáculos em outros tipos de motores, como o motor à pistão, levou engenheiros a produzirem um “motor a gás”, mais conhecido como motor à jato. A aviação à jato permitiu que o homem alcançasse outros horizontes pelo fato de não utilizar mais hélices nas aeronaves e sim um compartimento compacto onde toda a engenharia à jato se comportava, o que possibilitou com que as aeronaves atingissem uma velocidade muito maior em relação as demais aeronaves.

Com isso, a alta produção e a utilização do motor a jato se deu no fim dos anos de 1970 e, com o crescimento da aviação intercontinental civil, isso permitiu que a aviação civil fosse um grande foco da aviação com motores a jato e, logo com a sua evolução tecnológica, surgiram os motores conhecidos como *turbo fan*, que mantêm suas raízes até a aviação atual, sendo eles cada vez mais econômicos e com incentivos tecnológicos para sua diminuição de emissões de gases poluentes, o que moldou o cenário atual do setor aéreo.

De acordo com CARDOZO, R. R.,

a história da aviação é bastante recente, aproximadamente 110 anos considerado o primeiro voo autônomo por Santos Dumont em 1906. Se no início a preocupação era a de se manter a aeronave nos ares, logo se entendeu que se deveria manter as máquinas com cuidados especiais para que os voos ocorressem da forma mais tranquila e segura possível. A manutenção aeronáutica não podia ser feita da mesma forma comparada a outras máquinas, automóveis por exemplo. Afinal, não se pode parar a aeronave para conserto em pleno voo, no céu não existe acostamento. (CARDOZO, R. R., 2023.)

A partir disso, é fato que todas as desvantagens e problemas dos antigos motores, serviram de grande motivação para o desenvolvimento da engenharia aeronáutica, de modo a prevenir e evitar desastres aéreos e garantir o melhor cenário possível para o setor.

As aeronaves são compostas por sistemas extremamente complexos, formados por numerosos componentes como máquinas e estruturas que interagem entre si e atuam com condições muito variáveis. Desde o nascimento da indústria aeronáutica, intensas pesquisas são conduzidas para melhorar o desempenho e a eficiência dos aviões, com o intuito de diminuir os impactos ambientais e abranger o maior número de passageiros possível, de modo a tornar-se um setor com grande influência econômica. Com o crescimento do tráfego aéreo e, sobretudo das

operações, oriundas da alta demanda de passageiros, as alterações na atmosfera influenciaram no meio ambiente e, conseqüentemente, no cotidiano das pessoas.

O desenvolvimento de ferramentas e procedimentos que possam minimizar a degradação causada pela atividade aérea tornou-se um dos principais projetos lançados pelos órgãos governamentais, que visem melhorar a qualidade de vida e acentuar a preservação do meio ambiente. Sendo assim, o desenvolvimento da aviação civil, se faz importante, tanto para a sociedade, como para a economia do país, pois abrange todo transporte de cargas e passageiros, com os mais diversos fins. Por isso, tornou-se imprescindível conhecer os impactos causados pelos motores na aviação, como consumo de combustível, emissões de gases e ruídos, e apresentar o desenvolvimento dos motores *turbofans*, os quais combinam a reação com um ventilador (fan) frontal, que desvia uma parte do ar de admissão ao redor do núcleo do motor, aumentando a eficiência e reduzindo o ruído. É o tipo de motor mais comum em aviões de transporte comercial, combinando a força da turbina com o empuxo gerado pelo ventilador. Possuem um ótimo desempenho em altitudes elevadas, entre 10.000 metros e 15.000 metros, ou até um pouco mais, apresentando velocidades na faixa de 700 km/h até 1.000 km/h.

De acordo com MENDONÇA, A. R.,

a indústria da aviação experimentou mudanças significativas nas últimas décadas, com notáveis progressos na tecnologia dos motores das aeronaves. Esses avanços desempenharam um papel fundamental na melhoria da eficiência dos voos, na redução dos custos operacionais e na minimização do impacto ambiental. Portanto, é de suma importância adquirir uma compreensão ampla das inovações dos motores de avião, juntamente com os mais recentes progressos em design e tecnologia, a fim de obter uma compreensão completa da trajetória presente e futura da indústria aeroespacial. (MENDONÇA, A. R.,2024.)

Com o crescimento da aviação e o aumento do tráfego aéreo global, a indústria vem enfrentando desafios significativos relacionados não apenas aos impactos ambientais, mas também à segurança das operações. O aumento no número de voos e a complexidade das aeronaves tornam os sistemas de aviação mais suscetíveis a falhas que podem resultar em acidentes graves, como evidenciados em diversos casos que serão analisados nessa pesquisa. Embora as melhorias

tecnológicas em termos de segurança tenham avançado consideravelmente, a combinação de fatores como falhas mecânicas, erro humano e condições climáticas adversas, potencializadas principalmente pelas mudanças climáticas tornam os acidentes ainda uma preocupação importante no setor, o que torna fundamental a necessidade de estabelecer uma relação entre os avanços tecnológicos e estruturais, os impactos climáticos e a segurança e controle do setor aéreo.

Em função do acelerado crescimento desse meio, o sistema de controle do espaço aéreo necessita de planejamento, antecipação de medidas e procedimentos a serem desenvolvidos no tráfego aéreo. Nesse sentido, Gavazzi (2018) faz referência, em sua pesquisa, ao fato de que o setor aeroviário de Portugal, em função do crescente desenvolvimento, sinalizou que o transporte aéreo, já em 2017, demonstrou ter atingido o gargalo quanto à capacidade operacional do tráfego de aeronaves em alguns aeródromos da Europa. (GAVAZZI, 2018). Isso, claramente, promove uma reflexão sobre como devem ser tratadas as problemáticas da aviação para estabelecer um controle sobre todos os fatores que a englobam.

Além disso, as emissões de gases de efeito estufa e o impacto ambiental da aviação aumentam com o crescimento do tráfego aéreo, levando à necessidade urgente de um equilíbrio entre o desenvolvimento de novas técnicas, a sustentabilidade ambiental e a segurança das operações.

De acordo com MOTTA, A.M.,

outro aspecto importante é como as companhias aéreas irão enfrentar o aumento continuado do calor, uma vez que as aeronaves tendem a sofrer com esse fator, e, como será demonstrado, uma constante queda nos lucros dessas empresas é esperada. (MOTTA, 2021).

Com base nas fundamentações apresentadas, elaborou-se a seguinte questão norteadora:

“Como a indústria da aviação civil pode lidar simultaneamente com os avanços tecnológicos, impactos ambientais e a redução do risco de acidentes?”

Dessa forma, o presente trabalho propõe-se a investigar de maneira aprofundada diferentes aspectos que influenciam a aviação contemporânea, tanto sob a ótica técnica quanto ambiental e investigativa, a partir de acontecimentos marcantes no

setor. No Capítulo 1, será realizada uma análise detalhada sobre os acidentes ocorridos nos últimos anos envolvendo a moderna aeronave Boeing 737 MAX, abordando as causas e como os avanços tecnológicos impactaram negativamente o setor aéreo, em especial para as empresas que operam essa aeronave. Serão discutidas as falhas no sistema MCAS, a interface entre homem e máquina e as consequências regulatórias, operacionais e comerciais desses eventos.

Em seguida, o Capítulo 2 abordará os avanços tecnológicos, estruturais e sustentáveis nas aeronaves Boeing 737 MAX e Airbus A320neo, destacando as principais inovações implementadas em termos de desempenho, eficiência energética, design aerodinâmico e segurança operacional. Além disso, será examinado como as mudanças climáticas vêm impactando diretamente a operação e o planejamento da aviação moderna, exigindo uma adaptação contínua por parte das fabricantes e companhias aéreas.

Por fim, o Capítulo 3 discutirá os desafios e perspectivas para uma aviação civil mais segura, eficiente e ambientalmente responsável. Serão abordadas as iniciativas da indústria para reduzir as emissões de carbono, o papel dos combustíveis sustentáveis de aviação (SAFs), as metas de neutralidade climática e o desenvolvimento de novas tecnologias, como aeronaves elétricas e híbridas. Este capítulo também refletirá sobre como equilibrar inovação, segurança e sustentabilidade diante da crescente demanda por transporte aéreo.

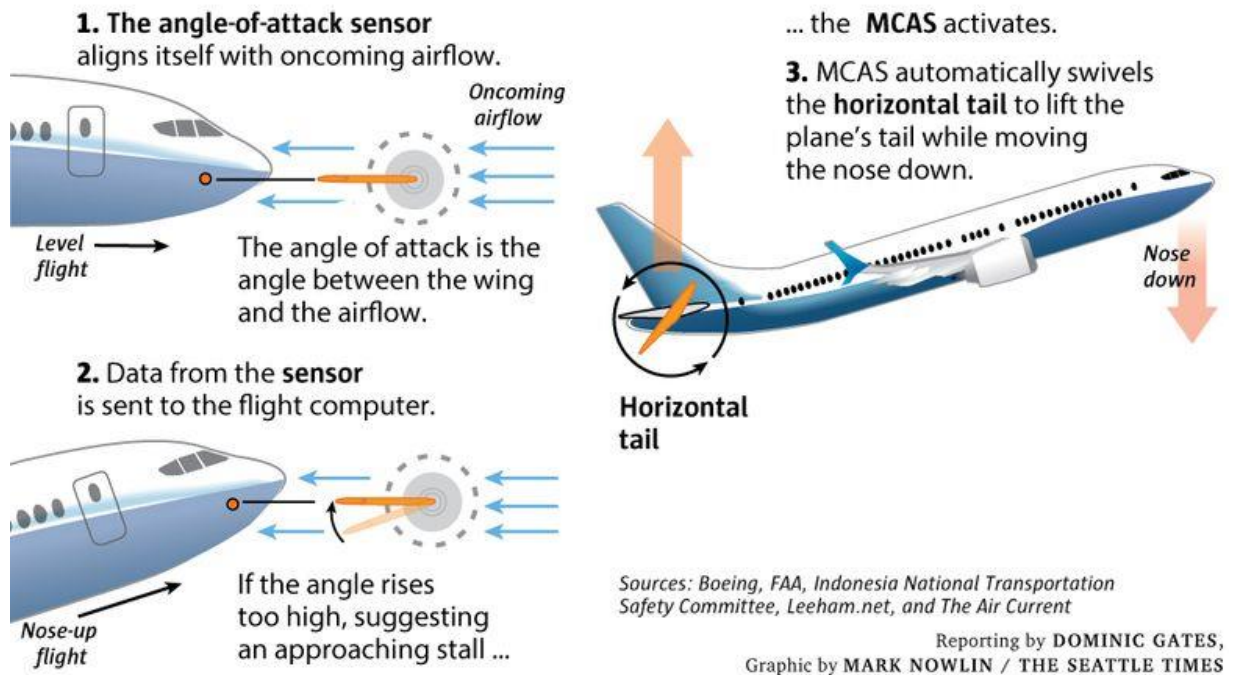
2 737 MAX: A POLÊMICA E A TECNOLOGIA POR TRÁS DE NEGLIGÊNCIA, DESTROÇOS E VÍTIMAS

Nas últimas décadas, a indústria da aviação civil tem investido intensamente em tecnologias que prometem tornar as aeronaves mais seguras, eficientes e econômicas. No entanto, a incorporação de sistemas automatizados e soluções tecnológicas avançadas nem sempre resulta em melhorias imediatas para a segurança operacional. Um exemplo emblemático dessa realidade é o caso do Boeing 737 MAX, cuja história recente foi marcada por dois acidentes fatais, ocorridos em 2018 e 2019, que levantaram questionamentos profundos sobre os limites da automação e os riscos de decisões industriais orientadas por pressões comerciais. O modelo trata-se de uma aeronave projetada para competir com o Airbus A320 Neo (*New Engine Option*) que foi lançado em 2014. Na teoria, o MAX é a aeronave perfeita, equipada com as mais novas tecnologias e os mais novos *softwares*, na prática, uma falha de projeto, dois acidentes, 346 mortes e todas as aeronaves proibidas de voar até segunda ordem, causando um prejuízo econômico imensurável a diversas companhias aéreas que havia essa aeronave sob encomenda ou em operação.

As quedas das aeronaves 737 MAX 8 da empresa Lion Air, ocorrido em 29 de outubro de 2018 e o da Ethiopian Airlines, ocorrido em 10 de março de 2019, chocaram todo o mundo e principalmente os profissionais do setor aéreo, consequentemente pressão constante foi feita sobre a Boeing e sobre o órgão certificador americano, a FAA (*Federal Aviation Administration*). As investigações foram iniciadas e intensificadas com o enorme questionamento de como duas aeronaves novas e do mesmo modelo se acidentam num pequeno intervalo de pouco menos que quatro meses? Isso evidenciava que havia, certamente, erros no planejamento da aeronave. O MCAS (*Maneuvering Characteristics Augmentation System*) é um *software* inserido na aeronave que foi e ainda é bastante polemizado. Se trata de um sistema de segurança automático que deveria realizar correções de trajetória em caso de violação de determinados parâmetros em manobras de mudança de altitude e direção.

Figura 1: Como o MCAS funciona no 737 MAX

How the MCAS (Maneuvering Characteristics Augmentation System) works on the 737 MAX



Como o MCAS funciona no 737 MAX. Disponível em <https://www.seattletimes.com/> Acesso em 12.08. 2025.

De acordo com HERKERT, B. M,

colocar motores maiores e mais econômicos embaixo da asa do 737MAX também representou outro sério problema, porém um problema de engenharia. O 737 é uma aeronave baixa, ou seja, com a fuselagem próxima ao chão, diferente do Airbus 320 que é uma aeronave alta, portanto, encaixar esses motores nas asas do 737 e passar na vistoria com uma distância mínima de segurança do solo seria um desafio para Boeing. Para solucionar esse problema a Boeing resolveu fixar os motores nas asas um pouco mais acima e mais a frente do que era no NG, assim ficaria com uma distância mínima do solo e passaria na vistoria. Porém, possivelmente, essa mudança causou complicações no que diz respeito à aerodinâmica da aeronave em voo de baixa velocidade, considerando que a aeronave poderia facilmente entrar em uma condição de estol. A tentativa da Boeing de resolver esse problema envolveu o *software* MCAS, como uma tentativa de correção para um potencial estol (condição de voo em que a aeronave perde sua

sustentação). Como proteção contra estol nas versões anteriores do 737, a Boeing adotou um sistema chamado STS (*Speed Trim System*), que é composto por dois sensores de ângulo de ataque, um de cada lado da aeronave, denominados AOA e esse sistema foi projetado justamente para funcionar com esses dois sensores. Todo esse sistema auxilia o comandante a evitar que a aeronave entre em uma condição de estol, jogando o nariz para baixo, evitando-se uma perda de sustentação. Porém, a Boeing decide utilizar apenas um dos dois sensores de ângulo de ataque no 737MAX. (HERKERT; BORENSTEIN; MILLER, 2020).

Nesse sentido, o sistema funcionava da seguinte forma: se em baixa velocidade, se o único sensor de AOA detectasse um ângulo de ataque elevado e uma possível condição de estol, o MCAS enviaria um sinal ao estabilizador horizontal, superfície que controla o movimento da aeronave sob seu eixo transversal, e esta superfície comandaria o nariz do avião para baixo a fim de evitar o estol. Certamente, O MCAS cumpriu a função para qual foi projetado o que mostra que o erro não está no sistema em si, mas sim pela *Boeing* não ter realizado os devidos testes com os sensores, tal que foi admitido pela empresa.

Da perspectiva de segurança operacional, há sérias desvantagens da auto certificação feita pela Boeing nesse caso do MAX. Observa-se que nesse contexto de falta de testes e da auto certificação, houve duas grandes falhas da parte de engenharia, que são: a análise do MCAS não levou em conta a força que o MCAS teria sobre o estabilizador horizontal da aeronave, o que tornou os comandos extremamente duros e deixando os pilotos sem controle sobre a aeronave, cenário do acidente que será abordado mais a frente. A utilização de apenas um sensor de ângulo de ataque deu ao MCAS um poder de controle sobre arfagem da aeronave independente do comando que o piloto fazia dentro da cabine, subestimando assim um risco em potencial (HERKERT; BORENSTEIN; MILLER, 2020).

Para além disso, foi descoberto que pilotos e operadores de voo não tinham noção dessa inadequação do sistema MCAS e nem como ele funcionava. As autoridades e a *Boeing*, não exigiram um treinamento específico em simuladores antes de se operar o MAX, portanto pilotos operavam o MAX com o conhecimento que tinham do *Boeing 737NG (next generation)*, os modelos anteriores da família 737, tais como o Boeing 737-700 e o Boeing 737-800 mostrando uma imensa irresponsabilidade por parte da FAA e da *Boeing*. O computador do Boeing 737 MAX tem uma série de alterações em

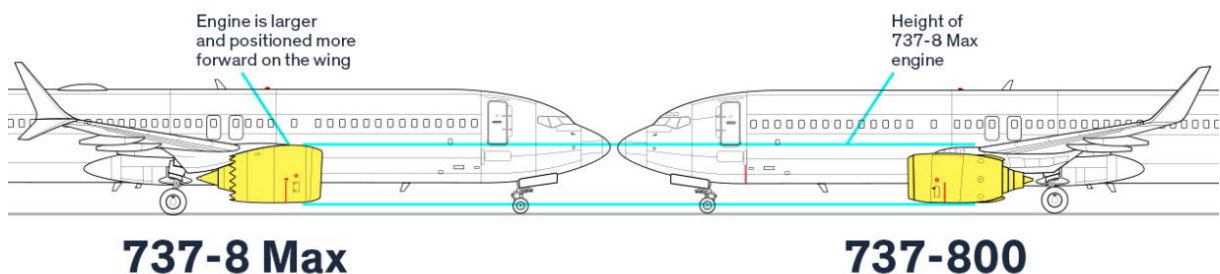
relação ao 737 NG, algumas proteções de voo foram adicionadas, de acordo com a Boeing, o novo motor limitou o desempenho da aeronave com o ângulo de ataque elevado, ele tem maior diâmetro, e aerodinamicamente absorve o fluxo de ar que anteriormente seria direcionado para a asa.

Figura 2: Boeing 737 NG e Boeing 737 MAX: Diferença nos motores



Na foto da esquerda temos um 737 NG. Na foto da direita temos um 737 MAX, com o novo motor. Disponível em: <https://www.aeroflap.com.br> Acesso em 14.ago.2025.

Figura 3: Posição dos motores distintos nos modelos 737-800 e 737-8 MAX



Diferença na localização dos motores entre um modelo de Boeing 737 MAX (esquerda) e de um Boeing 737 NG (direita), representando um problema ligado à engenharia, conforme descrito anteriormente. Disponível em: <https://spectrum.ieee.org/> Acesso em 12.ago.2025.

Antes do trágico acidente do voo LNI610 da Lion Air, um voo anterior da mesma companhia, com o mesmo modelo de aeronave (737 MAX), já havia apresentado sinais claros de instabilidade no sistema de controle de voo. A operação partiu de Denpasar com destino a Jakarta, na Indonésia, transportando mais de 180 pessoas a bordo. Ainda no solo, o comandante, em contato com a equipe de manutenção, foi informado sobre a substituição do sensor de ângulo de ataque (AOA)

do lado esquerdo da aeronave, além da correção de falhas nos alertas de velocidade e altitude. Após revisar o histórico de manutenção no AFML (registro oficial da aeronave), a tripulação considerou a aeronave apta para o voo.

Logo após a decolagem, poucos segundos após a retração do trem de pouso, um alarme de configuração incorreta foi ativado por um breve momento. Este alerta geralmente é associado a falhas na preparação da aeronave para decolagem, como posição incorreta de flaps ou atuação de superfícies aerodinâmicas como os *speed brakes*. Em seguida, outros alertas surgiram na cabine, entre eles o aviso de *IAS DISAGREE*, indicando discrepância entre os sensores de velocidade, além da ativação do *stick shaker* no manche esquerdo, um sinal de perda de sustentação que provoca vibração intensa no controle do piloto.

Figura 4: Stick Shaker



Imagem do *Stick Shaker*, dispositivo mecânico projetado para vibrar de forma rápida e ruidosa o manche de controle de uma aeronave, avisando a tripulação de voo que um estol aerodinâmico iminente foi detectado. Disponível em <https://m.best10.cc/> Acesso em 12.ago.2025

De acordo com os dados extraídos do gravador de voo, o *stick shaker* permaneceu ativo durante toda a duração do voo. Diante da situação, o comandante executou procedimentos previstos nos manuais de operação, como a verificação cruzada dos instrumentos e a transferência do controle da aeronave ao copiloto, por

considerar os dados do seu lado pouco confiáveis. Enquanto isso, ele consultava o QRH (Quick Reference Handbook) em busca de orientações detalhadas.

Em resposta à anormalidade, a tripulação declarou “PAN PAN”, isto é, um código internacional usado para indicar uma emergência sem risco imediato à vida, e com isso, continuou monitorando o comportamento da aeronave. Ao longo do voo, foi observada uma tendência do avião a inclinar o nariz para baixo, contrariando os comandos de compensação aplicados pelos pilotos. A tripulação suspeitou de um mau funcionamento do estabilizador horizontal e, para evitar mais interferências automatizadas, optou por desligar o sistema elétrico de compensação, passando a controlá-lo manualmente. A decisão estabilizou a situação e permitiu que o voo fosse concluído com segurança. Apesar da gravidade das falhas, a tripulação demonstrou preparo e conhecimento técnico para lidar com as anomalias. Os mesmos problemas técnicos se repetiriam posteriormente no voo LNI610, que resultaria em um acidente fatal.

As investigações revelaram que o sensor de ângulo de ataque do lado esquerdo estava descalibrado antes mesmo da decolagem, e que esse erro provocou uma série de falhas interligadas: discrepâncias de velocidade e altitude, ativação contínua do *stick shaker* e leituras conflitantes entre os sistemas do piloto e do copiloto. Esses dados inconsistentes alimentaram o MCAS (Maneuvering Characteristics Augmentation System), um sistema automático projetado para corrigir o ângulo de ataque durante voos em determinadas configurações.

O MCAS, por sua vez, estava programado para operar com base nas leituras de um único sensor – exatamente o que apresentava falhas. Assim, com base em dados incorretos, o sistema passou a comandar o nariz da aeronave para baixo repetidamente, mesmo quando não havia risco real de estol. Essa ação comprometeu o controle do avião, colocando os pilotos sob alta carga cognitiva e emocional, com diversos alertas disparando simultaneamente na cabine. Esse episódio demonstrou como a combinação de falhas técnicas, limitações de projeto e pressão operacional pode criar um cenário de alto risco, mesmo em aeronaves tecnologicamente modernas.

Algum tempo depois, em 2018, ocorreu o primeiro acidente fatal envolvendo o Boeing 737MAX. O voo JT610, operado também pela Lion Air.

A aeronave conseguiu subir cerca de apenas 5.000 pés e depois caiu em alto mar, não houve sobreviventes. Investigações posteriores e análises da caixa preta

apresentaram os mesmos erros do voo JT043, falha no sensor de AOA, as indicações indevidas de velocidade e altitude, assim como os valores registrados de um lado da cabine que não batiam com os valores do outro lado (MOREIRA, 2020).

Assim como no outro voo, o MCAS puxava o nariz da aeronave para baixo e em contrapartida o piloto puxava o manche para trás, sem obter resultados, os comandos estavam pesados e infelizmente a tripulação desse voo não obteve a mesma iniciativa de desligar o sistema de compensação, que desligaria a ação do MCAS sobre o estabilizador. Em uma situação de baixa altitude, não houve tempo suficiente para a tripulação pensar e descobrir o erro e assim o acidente se tornou inevitável (MOREIRA, 2020).

A Boeing lidou com esse acidente como se fosse um caso isolado, já que o acidente ocorreu em um país que possuía uma má fama em relação à segurança da aviação em níveis mundiais. Portanto nenhuma empresa suspeitou de erros na aeronave e continuaram suas operações normais com a mesma, além de continuarem a fazer os pedidos do modelo MAX em todo o mundo, porém esse cenário mudou com o segundo acidente no dia 10 de março de 2019 (MOREIRA, 2020).

Figura 5: Destroços do voo JT610



Destroços recuperados do voo JT610 da Lion Air que caiu no mar da Indonésia. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/>. Acesso em 13.ago.2025

Poucos meses depois, outra notícia chocou o mundo inteiro: Outro avião do modelo 737MAX havia se envolvido em um acidente fatal, dessa vez, na Etiópia, da empresa *Ethiopian Airlines*. Tratava-se do voo ET302, decolado do Aeroporto de Addis Ababa, *hub* da empresa, com 157 passageiros a bordo.

As informações são baseadas nos dados preliminares do CVR (*Cockpit voice recorder*). A Decolagem ocorreu normalmente, as 5h38, não houve nenhum disparo de alarme e as indicações estavam corretas para a operação usual de decolagem. Durante a subida, observou-se uma variação nos valores de AOA, mostrando uma falha nos sensores. Após isso, o *Stick-Shaker* do manche do lado esquerdo foi ativado e também os pilotos observaram que os valores de altitude e velocidade estavam desiguais, os valores do lado esquerdo não eram iguais os valores mostrados do lado direito. Com essas falhas o comandante pediu permissão ao controle de tráfego para o retorno, porém alguns poucos minutos depois, ocorreu a queda da aeronave. O sensor AoA (sensor de ângulo de ataque) esquerdo do avião falhou imediatamente após a decolagem, enviando dados incorretos para o sistema de controle de voo, e por uma falha de projeto no Sistema de Aprimoramento de Características de Manobra (MCAS), esse mesmo baixou repetidamente o nariz do avião até o ponto em que os pilotos perderam o controle. O MCAS manteve um ângulo de descida que fugiu do controle dos pilotos, fazendo o Boeing 737 MAX despencar com uma taxa de 33.000 pés/minuto já próximo do solo, indicando uma descida vertical.

Observa-se que as mesmas falhas que aconteceram nesse voo, foram as mesmas nos voos anteriormente mencionados e justamente devido a essa similaridade dos acontecimentos que os investigadores afirmam que a causa desse acidente foi a mesma do acidente com o JT610. O ocorrido desencadeou a interrupção das operações com o 737 MAX em todo o mundo por 20 meses, até que a Boeing corrigisse os problemas encontrados no modelo e recebesse uma nova certificação da Administração Federal de Aviação dos Estados Unidos (FAA).

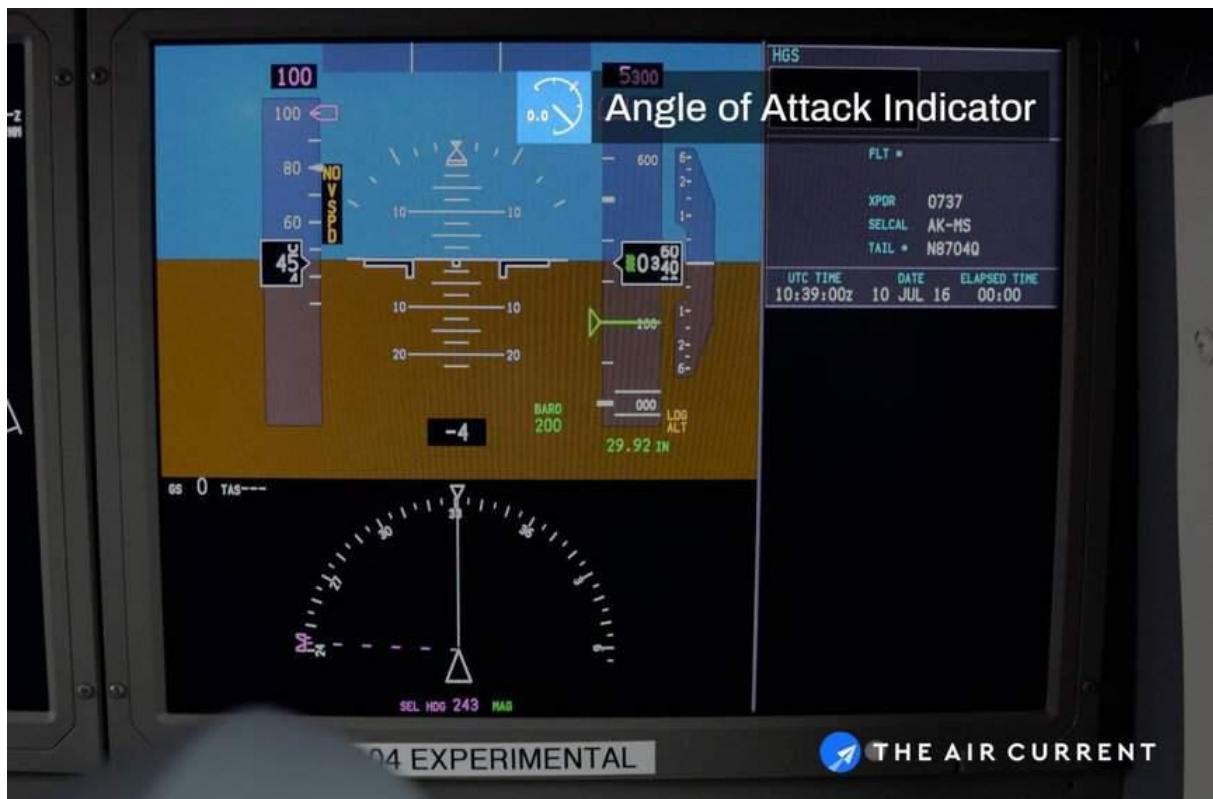
Figura 6: Destroços do Acidente da Ethiopian Airlines



Destroços do avião da Ethiopian Airlines envolvido no acidente. Disponível em: <https://www.bbc.com/>
Acesso em 13.ago.2025

Em resposta aos acidentes, a Boeing atualizou os sistemas operacionais e de software na aeronave em questão.

Figura 7: MCAS no Cockpit



Atualização inclui um aviso sobre o funcionamento do sistema MCAS. Disponível em:
<https://www.aeroflap.com.br/> Acesso em 13.ago.2025

Agências reguladoras globais e organizações de aviação ao redor do mundo colaboraram para permitir que o avião retomasse sua operação de forma segura. O MCAS agora é acionada por dois sensores ativada uma única vez e nunca sobrepõe a capacidade do piloto de controlar a aeronave. Alguns itens não relacionados aos acidentes também estão sendo discutidos. Estes incluem a modificação de alguns detalhes da fiação para atender às exigências da FAA e duas atualizações adicionais de software. As agências reguladoras determinaram o processo, cronograma e os requisitos de um esforço que envolveu centenas de milhares de horas e mais de mil voos de teste e de certificação, além do treinamento eficiente de pilotos e operadores. As aeronaves que estavam paradas precisaram passar por um processo de ativação completo antes de serem consideradas aptas para voltar às operações.

Atualmente, a aeronave está em operação nas mais imponentes companhias aéreas, incluindo as que operam no Brasil e segue sem graves incidentes e acidentes desde então e sem problemas relacionados aos sistemas operacionais aprofundados anteriormente.

Figura 8: Boeing 737 Max 8 da Gol em operação



Aeronave do modelo Boeing 737 Max 8 da Gol (PS-GPF) em operação comercial regular. Disponível em <https://aeromagazine.uol.com.br/> Acesso em 13.ago.2025.

3 A CONTRAPARTIDA: OS AVANÇOS TECNOLÓGICOS E ESTRUTURAIS NO 737 MAX E EM SEU PRINCIPAL CONCORRENTE: O BEM-SUCEDIDO AIRBUS A320-251 NEO

A construção de aeronaves comerciais envolve um nível extremamente elevado de complexidade, tanto em termos de design quanto de fabricação. Esses aviões passam por rigorosos processos de teste ao longo de todo o desenvolvimento e produção, além de seguirem uma rotina contínua e detalhada de manutenção durante toda a sua vida útil, com o objetivo principal de garantir a segurança operacional.

Essa complexidade está diretamente relacionada à quantidade de componentes e à forma como todos eles interagem. Estima-se que uma aeronave comercial contenha cerca de 4 milhões de peças, sendo que a fuselagem, por si só, é formada por aproximadamente 350 mil partes distintas. No caso da Boeing, embora a fuselagem seja produzida nos Estados Unidos, a empresa terceiriza a fabricação de vários outros elementos essenciais, como: motores, asas, lemes, flaps, cauda e trem de pouso, que são construídos por fornecedores especializados em diferentes partes do mundo e posteriormente enviados para as empresas como Boeing, Embraer e Airbus que, finalizam a montagem e estruturação do avião.

Em 2010, a Airbus lançou o A320neo, uma versão mais eficiente do A320 equipada com motores novos que reduziam o consumo de combustível em 15%. Essa vantagem colocou a Boeing para trás, pois o 737, seu principal concorrente, não comportava motores maiores devido ao design mais baixo em relação ao solo. A eficiência de combustível é crucial no setor aéreo, e a ameaça do A320neo ficou evidente quando a American Airlines cogitou trocar seus pedidos da Boeing pela Airbus. Diante disso, a Boeing teve duas opções: desenvolver um novo avião do zero ou modificar o 737. Um novo projeto traria inovação, mas exigiria investimentos altos, tempo prolongado e riscos regulatórios. Optando por uma resposta mais rápida à concorrência, a Boeing decidiu modificar o 737, resultando no lançamento do 737 MAX em 2011 — uma tentativa de competir com a eficiência do A320neo, apesar das limitações estruturais do modelo original.

Figura 9: Airbus A320 neo e Boeing 737 MAX lado a lado



Airbus A320Neo (Esquerda) contra Boeing 737MAX (direita) da imagem. Disponível em: <https://www.melhoresdestinos.com.br/>. Acesso em 17 set.2025.

3.1 AVANÇOS TECNOLÓGICOS E ESTRUTURAIS NO BOEING 737 MAX

A Boeing implementou mudanças tecnológicas, organizacionais e processuais no 737 MAX para aprimorar a segurança da aeronave e os padrões operacionais da empresa. A funcionalidade do MCAS foi redesenhada para se basear em informações de ambos os sensores AOA antes de ser ativada. O MCAS também foi redesenhado para ser ativado apenas uma vez em resposta aos dados do sensor, e a força aplicada na correção foi limitada para que um único piloto pudesse superá-la manualmente. A FAA aprovou essas e outras mudanças em novembro de 2020, e os voos comerciais do MAX foram retomados em 2021. Para além das mudanças implementadas no sistema de bordo, após os acidentes aprofundados na sessão anterior, o Boeing 737 MAX veio como uma opção mais sustentável e eficiente, trazendo modificações estruturais eficientes para as operações e para o meio ambiente.

A aeronave traz um novo motor, o LEAP-1B da CFM International, que reduz a queima de combustível e as emissões de CO₂ em 13%, quando comparado à maioria das aeronaves de corredor único mais econômicas da atualidade. As atualizações recentes no design da aeronave, inclusive o *winglet* (pequena superfície aerodinâmica localizada na extremidade da asa de uma aeronave, geralmente vertical ou inclinada.) desenvolvido com moderna tecnologia, reduzirão o arrasto e realçarão ainda mais o desempenho do 737 MAX, principalmente em rotas de longa distância. Quando comparado a uma frota de 100 das aeronaves mais econômicas do mercado, esse novo modelo emite 350 mil toneladas a menos de CO₂ e economiza mais de 250 milhões de libras de combustível por ano, o que significa uma redução de mais de US\$112 milhões nos custos. O 737 MAX ampliou a vantagem sobre o 737 Next Generation (NG) em termos de alcance, com capacidade para voar mais de 3.500 milhas náuticas (6.510 km), um aumento de 405-580 mn (750-1.075 km) em relação ao seu antecessor. Somados, a maior eficiência estrutural, o menor empuxo do motor e a menor necessidade de manutenção trarão grandes vantagens aos clientes em termos de custos. Por fim, as emissões de óxido de nitrogênio (Nox) ficarão aproximadamente 50% abaixo dos limites estabelecidos pelo Comitê de Proteção Ambiental na Aviação (CAEP) da Organização Internacional de Aviação Civil (ICAO).

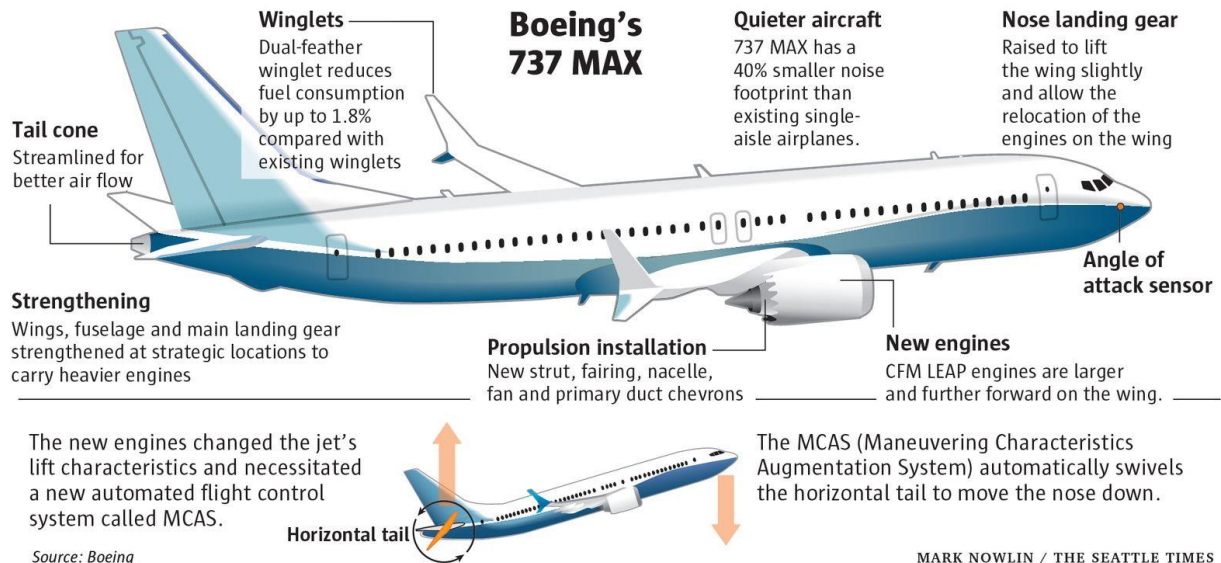
Figura 10: Evolução dos motores das aeronaves da família 737



A evolução dos motores das aeronaves da família 737, desde o Boeing 737-200 até o novo 737 Max 9 Disponível em: <https://medium.com/> Acesso em 15 ago. 2025.

Figura 11: Características tecnológicas do Boeing 737 MAX

The 737 MAX first flew commercially in May 2017. It had larger engines than the previous 737 models, which altered the aerodynamics and prompted Boeing to introduce a software system, known as MCAS, to intervene in certain situations to smooth how the plane handled.



Características tecnológicas do Boeing 737 MAX – Incluindo problema relacionado ao sistema MCAS responsável pelos acidentes nos quais o modelo esteve envolvido. Disponível em <https://www.seattletimes.com/> Acesso em 14.ago 2025

Com uma redução expressiva no consumo de combustível, nas emissões de CO₂ e nos custos operacionais, o modelo demonstra um claro compromisso com práticas mais sustentáveis, sem abrir mão da performance. Além disso, o aumento no alcance e a melhoria nos padrões de emissões reforçam o alinhamento da aeronave com as metas globais de redução de impacto ambiental. Assim, o 737 MAX não representa apenas uma resposta técnica aos problemas do passado, mas também um passo estratégico rumo a uma aviação mais eficiente, segura e ecologicamente responsável.

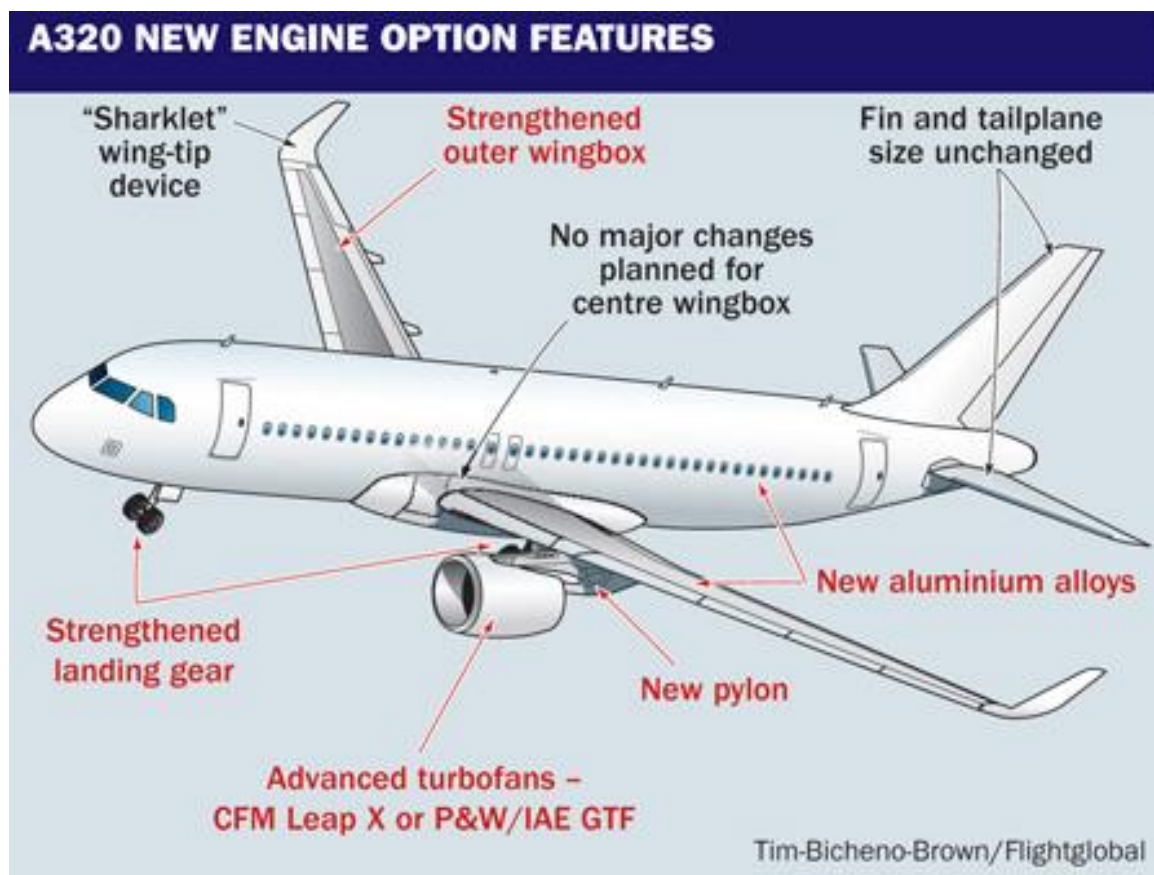
3.1.1 O Combustível e a Economia dos 737: Impactos na operação e no Meio Ambiente

Calcular o consumo de combustível de uma aeronave com precisão é desafiador, pois o consumo pode ser afetado por vários fatores operacionais, como distância do quarteirão, tempo de taxiamento, disposição dos assentos e ambiente operacional. Entretanto, novas estruturas e aplicações nos motores e na estrutura das aeronaves influenciam na economia de combustível e consequentemente em impactos positivos ao meio ambiente e às operações.

3.2 AVANÇOS TECNOLÓGICOS E ESTRUTURAIS NO CONCORRENTE DO 737 MAX: O AIRBUS A320NEO

O A320neo voa até 3.400 milhas náuticas (NM) e proporciona 20% menos consumo de combustível e emissão de CO₂ por assento quando comparado aos modelos anteriores graças aos seus motores de baixo consumo de combustível. Equipado com a cabine mais versátil, ele pode acomodar até 194 assentos em sua capacidade máxima. A cabine Airspace oferece uma experiência superior aos passageiros com espaço individual extra, assentos mais largos e compartimentos extragrandes. Também voando com Combustível de Aviação Sustentável (SAF), as companhias aéreas podem operar com uma mistura de 50% de SAF hoje e 100% até 2030. É um combustível produzido a partir de fontes renováveis, como óleos vegetais, gordura animal e resíduos, com o objetivo de reduzir as emissões de carbono na aviação. O SAF é considerado uma alternativa ao querosene de aviação tradicional, podendo ser usado em aeronaves existentes sem grandes modificações.

Figura 12: Detalhes do Airbus A320 neo



Airbus detalha A320neo. Disponível em: <https://fl410.wordpress.com/2010/05/13/airbus-detalha-a320-neo/> Acesso em 03.set 2025

4 AS TECNOLOGIAS, O MEIO AMBIENTE E O COMPROMISSO COM O FUTURO E COM AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Nas últimas décadas, o setor da aviação tem enfrentado o desafio de alinhar o crescimento da mobilidade aérea com a crescente preocupação global em torno das mudanças climáticas e da sustentabilidade ambiental. As pressões por redução das emissões de gases de efeito estufa e pela adoção de práticas mais ecológicas impulsionaram fabricantes como Boeing e Airbus a desenvolverem aeronaves mais eficientes e menos poluentes. Nesse contexto, o Boeing 737 MAX e o Airbus A320neo representam marcos importantes da aviação comercial moderna. Ambos incorporam avanços tecnológicos significativos que reduzem o consumo de combustível, aumentam a eficiência operacional e minimizam os impactos ambientais — incluindo o uso de materiais mais leves, novos designs aerodinâmicos e motores de última geração. Além disso, iniciativas como o uso crescente de Combustíveis Sustentáveis de Aviação (SAF), a modernização de sistemas de bordo e os compromissos firmados por companhias aéreas e órgãos internacionais mostram que a aviação caminha, ainda que com desafios, como os casos explorados dos acidentes envolvendo as aeronaves Boeing 737 MAX, rumo a um modelo mais sustentável. Esta seção analisa como a tecnologia tem sido uma aliada crucial nesse processo e quais são os próximos passos cruciais para que a indústria contribua efetivamente no combate à crise climática.

4.1 O SAF: COMBUSTÍVEL SUSTENTÁVEL DE AVIAÇÃO

Aviões precisam de combustível para voar. Mas produzir e usar combustível causa emissões nocivas, como CO₂. Esse gás de efeito estufa contribui para o aquecimento global ao reter o calor. O SAF é uma alternativa melhor ao combustível de aviação comum e tem um impacto ambiental menor. É feito de recursos não fósseis, como óleo de cozinha usado. Embora o SAF emita a mesma quantidade de CO₂ durante o voo, seu impacto total de CO₂ é pelo menos 65% menor durante todo o ciclo de vida (da produção à queima). Emite menos outras emissões nocivas, como partículas e enxofre, que impactam a qualidade do ar local no solo.

A mudança na transição energética do setor de aviação é complexa, pois os custos de combustível representam grande parte das despesas operacionais das

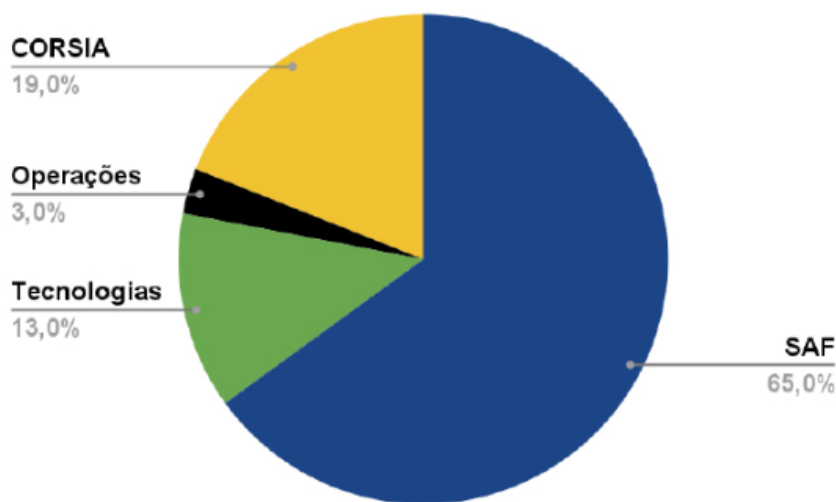
companhias aéreas. Além disso, a modificação é ainda desafiadora por preocupações de segurança rigorosas e pela necessidade de garantir a viabilidade de novos combustíveis. Consequentemente, diversos estudos, testes e processos estão em andamento mundialmente, inúmeros estudos, testes e processos foram e estão sendo realizados em todo o mundo. Apesar desses esforços, desafios significativos persistem na transição para a implementação da SAF, devido à contemporaneidade do tema, tecnologias disponíveis e dificuldades financeiras (THOMAZ, PIMENTEL, 2022; MALINA, ET AL, 2022).

Figura 13: Uso do SAF em abastecimento de Aeronave



Uso do SAF em abastecimento de aeronave. Disponível em <https://123ecos.com.br/>. Acesso em 3.set 2025

Embora o custo e a produção em larga escala ainda sejam desafios significativos, o potencial do SAF para transformar a indústria da aviação em um setor mais sustentável é inegável.

Figura 14: Gráfico**Gráfico 1: Cesta de Medidas para Reduções de Emissões e Neutralidade de CO² até 2050.**

Fonte: (IATA, 2024).

Gráfico: Cesta de Medidas para Reduções de Emissões e Neutralidade de CO₂ até 2050. Fonte: (IATA, 2024).
 Disponível em: <https://www.iata.org/en/pressroom/2024-releases/2024-06-02-03/> Acesso em 03.set 2025

Conforme o Gráfico 1, a OACI estabeleceu quatro medidas principais para reduzir as emissões da aviação. A primeira é o desenvolvimento de tecnologias avançadas para aeronaves, como motores mais eficientes e materiais mais leves, representando 13% dos esforços. A segunda foca na otimização de operações aeroportuárias e rotas de voo, contribuindo com 3% na redução de emissões. A terceira, consiste no CORSIA, programa da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) para a redução e compensação de emissões de CO₂ provenientes dos voos internacionais. Seu objetivo é atingir o crescimento neutro de carbono, ou seja, que as emissões sejam estabilizadas nos níveis observados em 2020, sem que o setor aéreo precise parar de crescer. O CORSIA procura garantir que aviação cumpra seu papel no esforço global no combate à mudança climática, ao mesmo tempo em que reduz os custos incorridos pelo transporte aéreo com a aquisição de créditos de carbono; via de regra, os créditos são emitidos por outros setores da economia que possuem alternativas mais eficientes e baratas de reduzir suas emissões de CO₂ do que o próprio setor aéreo. (ANAC, 2019.)

Atualmente, 133 aeroportos já têm SAF disponível, e 47 políticas nacionais foram implementadas ou estão em fase de aprovação. Além disso, 351 instalações

foram anunciadas ou estão operando para a produção de SAF, com uma capacidade potencial de 53,2 bilhões de litros (ICAO, 2024). Em 2023, a produção de SAF dobrou, alcançando mais de 600 milhões de litros, embora ainda represente apenas 0,2% do combustível de aviação total, mantendo os custos elevados. Em 2022, a produção global de SAF foi de 300 milhões de litros, um aumento significativo de 200% em relação aos 100 milhões de litros de 2021. Com o suporte adequado de políticas, a indústria de SAF pode experimentar um crescimento explosivo, podendo atingir 30 bilhões de litros até 2030. Para que isso aconteça, uma colaboração global entre governos, a indústria e os reguladores é essencial para tornar o SAF competitivo em preço.

4.2 PERSPECTIVAS FUTURAS PARA A AVIAÇÃO

Com a grande contribuição tecnológica da contemporaneidade, as grandes empresas como a Airbus, aliadas com os compromissos climáticos, estão trabalhando na produção e desenvolvimento de aeronaves cada vez mais sustentáveis. A perspectiva futura em questão são as Hydrogen Aircrafts. O hidrogênio tem o potencial de desempenhar um papel crucial na descarbonização da aviação a longo prazo e de promover uma revolução no transporte aéreo comparável à dos veículos elétricos no setor automotivo. Para tanto, a ambição da Airbus é lançar uma aeronave comercial movida a hidrogênio. O projeto ZEROe foi lançado em 2020 para explorar a viabilidade de duas tecnologias principais de propulsão a hidrogênio: combustão de hidrogênio e células de combustível de hidrogênio. Em 2025, a Airbus anunciou que a tecnologia de célula de combustível de hidrogênio havia sido selecionada como método de propulsão para esta futura aeronave. Os resultados do protótipo de célula de combustível e dos testes do trem de força, bem como pesquisas em tecnologias complementares, como a criogenia, corroboraram a viabilidade dessa tecnologia.

Nesse sentido, o modelo de aeronave ZEROe contará com um sistema de propulsão a hélice elétrica alimentado por células de combustível de hidrogênio, que transformam o hidrogênio em eletricidade por meio de uma reação química. O único subproduto dessa reação será água, o que significa que o processo será quase neutro em carbono, desde que o hidrogênio seja produzido com energia renovável. Serão quatro hélices, cada uma alimentada por sua própria pilha de células de combustível. Embora as células de combustível de hidrogênio não sejam uma tecnologia nova, não há nenhuma disponível comercialmente que seja grande o suficiente para alimentar

uma aeronave e, ao mesmo tempo, manter um peso aceitável para o voo. Para acelerar o desenvolvimento de uma célula de combustível que respeitasse os regulamentos de peso e segurança aeroespacial, a Airbus fundou uma joint venture com a ElringKlinger em 2020, chamada Aerostack. Em 2023, o demonstrador de células de combustível concluiu uma campanha de testes bem-sucedida e foi acionado com 1,2 megawatts. (AIRBUS, 2025.)

Figura 15: Representação de modelo ZEROe da Airbus



Representação do modelo de Aeronave ZEROe, da Airbus. Disponível em <https://www.airbus.com/> Acesso em 04.set 2025

5 CONCLUSÃO OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

A evolução da aviação civil comprova sua relevância como um dos pilares centrais da mobilidade global, integrando pessoas, culturas e economias. Desde os experimentos pioneiros de Santos Dumont e dos irmãos Wright, o setor foi moldado pela busca incessante por inovações que garantissem maior alcance, eficiência e segurança. Essa trajetória, marcada por avanços tecnológicos significativos, como o desenvolvimento dos motores a jato e posteriormente dos *turbofans*, evoluiu até chegar às aeronaves modernas, projetadas para transportar milhões de passageiros com segurança e eficiência, ampliando de forma significativa as fronteiras do comércio, do turismo e da integração cultural em escala global. Entretanto, os desafios enfrentados pela aviação contemporânea revelam que o progresso não está isento de riscos e responsabilidades. O caso do Boeing 737 MAX ilustra como falhas de projeto e insuficiências regulatórias podem comprometer a segurança, gerando impactos humanos, econômicos e institucionais. Em contrapartida, iniciativas como o Airbus A320neo mostram que é possível conciliar inovação tecnológica com maior eficiência energética e menor emissão de poluentes, reforçando a importância de alinhar o desenvolvimento industrial às demandas de sustentabilidade ambiental.

O setor também precisa lidar com pressões externas cada vez mais intensas, como a necessidade de reduzir custos operacionais, enfrentar a concorrência global e responder às cobranças por práticas mais ecológicas. Nesse contexto, o investimento em combustíveis sustentáveis, novas tecnologias de propulsão e sistemas de controle mais precisos torna-se fundamental para assegurar a continuidade de sua expansão sem comprometer o meio ambiente.

Conclui-se, assim, que o futuro da aviação comercial dependerá da capacidade de equilibrar três eixos indissociáveis: a segurança operacional, a inovação tecnológica e a sustentabilidade ambiental. Somente a partir dessa integração será possível garantir que o setor continue a desempenhar papel estratégico no desenvolvimento econômico e social, preservando sua relevância histórica e projetando-se como um agente indispensável para o progresso das próximas gerações.

6 REFERÊNCIAS

AIRBUS. ZEROe: *nossa aeronave movida a hidrogênio*. Disponível em: <https://www.airbus.com/>. Acesso em: 03 set. 2025.

AIRBUS. *Airbus A320 neo. The Benchmark*. Disponível em: <https://aircraft.airbus.com/>. Acesso em: 14 ago. 2023.

ATUALIZAÇÕES 737. *Boeing*. Disponível em: <https://www.boeing.com/737-max-updates/>. Acesso em: 12 ago. 2025.

BOEING 737 MAX. *Fórum da Faculdade de Direito de Harvard sobre Governança Corporativa*. Disponível em: <https://corpgov.law.harvard.edu/>. Acesso em: 14 ago. 2023.

CARDOZO, R. R. Reflexões sobre as boas práticas sustentáveis e seus conceitos aplicados à manutenção aeronáutica: *Reflections on the good sustainable practices and concepts applied to aeronautical maintenance*. *Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas*, [S. l.], v. 3, n. 2, p. 124–137, 2023. Disponível em: <https://rbaccia.emnuvens.com.br/revista/article/view/132>. Acesso em: 19 mar. 2025.

CORSIA. *Agência Nacional de Aviação Civil (Anac)*. Disponível em: <https://www.gov.br/anac>. Acesso em: 3 set. 2025.

GAVAZZI, Angela Bitencourt. *Programa SIRIUS e o uso racional do espaço aéreo brasileiro*. UNISUL – Universidade do Sul de Santa Catarina, Curso de Graduação em Ciências Aeronáuticas, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/247386/PTRA0117-D.pdf?sequence=1>. Acesso em: 31 mar. 2025.

HERKERT, Joseph; BORENSTEIN, Jason; MILLER, Keith. The Boeing 737 MAX: lessons for engineering ethics. *Science and Engineering Ethics*, p. 1-18, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11948-020-00252-y>. Acesso em: 9 ago. 2025.

INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. *Pressroom: 2024 releases*. Disponível em: <https://www.iata.org/en/pressroom/2024-releases/2024-06-02-03/>. Acesso em: 3 set. 2025.

KNIGHT, Amanda Joann. *Next generation commercial aircraft engine maintenance, repair, and overhaul capacity planning and gap analysis*. 2018. Tese (Doutorado) – Massachusetts Institute of Technology. Disponível em: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/117979>. Acesso em: 12 ago. 2023.

MENDONÇA, A. R. de; SOUZA, L. F. G.; SILVA, B. C. de A.; HENKES, J. A. Inovação tecnológica em motores PW1100G no Airbus A320neo e o impacto na sustentabilidade ambiental: *Technological innovation in PW1100G engines in the Airbus A320neo and the impact on environmental sustainability*. *Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas*, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 84–109, 2024. Disponível em: <https://rbaccia.emnuvens.com.br/revista/article/view/230>. Acesso em: 24 mar. 2025.

MOREIRA, Leandro Silva. *Gerenciamento de segurança operacional: um estudo envolvendo os acidentes com as aeronaves Boeing 737-800 MAX*. Ciências Aeronáuticas – Unisul Virtual, 2020. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/>. Acesso em: 10 ago. 2025.

MOTTA, Arthur Madalena et al. *Mudanças climáticas e aviação: relação mútua e efeitos*. 2021. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/1701>. Acesso em: 07 abr. 2025.

THOMAZ, L.; PIMENTEL, C. *Estudo sobre governança e políticas públicas de incentivo à produção de combustíveis sustentáveis de aviação*. ProQR – Combustíveis Alternativos sem Impactos Climáticos, 2022, p. 229. Acesso em: 3 set. 2025.