

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA DE GESTÃO E NEGÓCIOS
CURSO DE CIÊNCIAS AERONÁUTICAS

SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DOS MOTORES AERONÁUTICOS

GOIÂNIA, 2020

WANDERSON PIRES DE FREITAS

SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DOS MOTORES AERONÁUTICOS

GOIÂNIA, 2020

WANDERSON PIRES DE FREITAS

SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DOS MOTORES AERONÁUTICOS

Trabalho de Conclusão do Curso, apresentado para obtenção do grau de bacharel no Curso de Ciências Aeronáuticas da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, PUC-GO.

Orientador: Prof. MSc. Roberto Marcio dos Santos

GOIÂNIA, 2020

WANDERSON PIRES DE FREITAS

SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DOS MOTORES AERONÁUTICOS

GOIANIA - GO *24/11/2020*

BANCA EXAMINADORA

	CAER PUC-GO Nota	<i>8,5</i>
Prof. Me. Remaldo Del Fiacco	CAER PUC-GO Nota	<i>8,5</i>
	CAER PUC-GO Nota	<i>8,5</i>
Prof. Esp. Maurício D. Melo Cardoso	CAER PUC-GO Nota	<i>8,5</i>

SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DOS MOTORES AERONÁUTICOS

Wanderson Pires de Freitas¹
Roberto Marcio dos Santos²

RESUMO: O artigo investigou a sustentabilidade ambiental dos motores aeronáuticos, abordando o assunto desde a criação dos primeiros motores, até as novas tecnologias empregadas e utilizadas em larga escala. O primeiro registro de um motor aeronáutico deu-se em 120 a.C, sendo que o primeiro registro de motor do tipo turbina, foi em 1629. Anos depois em 1794, um projeto de motor convencional de combustão interna, foi patenteado, dando início ao grande sucesso que são os motores aeronáuticos atualmente. Vários tipos de motores foram criados até os dias de hoje, o principal deles é o motor a jato que foi o principal foco deste trabalho, expondo seus principais problemas e poluentes produzidos. Dos motores a jato, apresentamos a última versão, que é o motor turbofan, o mais utilizado no mundo inteiro e o analisamos quanto ao impacto ambiental. As fabricantes idealizaram formas para diminuir o peso dos motores, aumentando sua eficiência e reduzindo o consumo de combustível, além da adição de materiais específicos que visam à redução de ruído. Além disto, foi exposto o uso de biocombustíveis provenientes de pinhão manso, que auxiliam na redução dos poluentes gerados pelo motor. No contexto geral, foi apresentada a navegação PBN, como método de navegação que redesenha as rotas, visando à economia de combustível. E, para o futuro, foi pesquisado o novo conceito ZeroE, da fabricante Airbus, em que foram idealizadas aeronaves que, em breve serão movidas à hidrogênio. Esta pesquisa utilizou o método científico indutivo, em que o pesquisador partiu da observação de situações específicas, por meio de pesquisa bibliográfica, para obter conclusões, permitindo compreender melhor a dinâmica do estudo apresentado. Muitos autores apontam que a aviação será mais sustentável devido às tecnologias já existentes, e as que ainda estão por vir. Como sugestão indicamos a necessidades de continuidade dos estudos, no Projeto ZeroE da Airbus, para o uso do hidrogênio como parte do combustível para as aeronaves da fabricante, contribuindo assim com o meio ambiente na diminuição do dióxido de carbono (CO₂).

Palavras-chave: Sustentabilidade ambiental; Motores aeronáuticos; Tecnologias empregadas.

ABSTRACT: The article investigated the environmental sustainability of aeronautical engines, addressing the subject from the creation of the first engines, to the new technologies used and used on a large scale. The first records of an aeronautical engine took place in 120 B.C., the first record of a turbine engine being in 1629. Years later in 1794, a conventional internal combustion engine design was patented, beginning the great successful aircraft engines today. Several types of engines have been created until today, the main one being the jet engine that was the focus of this work, exposing its main problems and pollutants sought.

¹Graduando em Ciências Aeronáuticas pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC-GO) wanderson_vila@hotmail.com

² Graduado em Educação Física, ESEFFEGO/1987; Especialista em Metodologia do Ensino da Educação Física, ESEF-UFRGS/1994; Cap Esp Aer Controlador de Tráfego Aéreo, FAB/1981; Mestre em Psicologia do Desenvolvimento, IP-UFRGS/2000; Mestre em Segurança da Aviação e Aeronavegabilidade Continuada, ITA-FAB/2013; Especialista em Psicopedagogia, PUC GOIÁS/2013, Professor Assistente no Curso de Ciências Aeronáuticas na PUC GOIÁS. rob.marcio@hotmail.com.

Of the jet engines, we present the latest version, which is the turbofan engine, the most used worldwide and we analyzed it for environmental impact. Manufacturers devised ways to reduce the weight of engines, increase their efficiency and achieve fuel consumption, in addition to adding specific materials that aim to reduce noise. In addition, it was exposed to the use of biofuels from physic nut, which help to reduce pollutants generated by the engine. In the general context, PBN navigation was presented, as a navigation method that redesigns the routes, inherent to fuel economy. And, for the future, the new concept ZeroE, from the manufacturer Airbus, was researched, in which the aircraft that soon will be powered by hydrogen were designed. This research uses the scientific inductive method, in which the researcher started from the observation of specific situations, through bibliographic research, to obtain free, allowing a better understanding of the dynamics of the presented study. Many authors sad that aviation will be more sustainable due to existing technologies, and as that are yet to come. As a suggestion, it indicates a need for further studies, in the Airbus ZeroE Project, for the use of hydrogen as part of the fuel for the manufacturer's aircraft, thus contributing to the environment in reducing carbon dioxide (CO₂).

Keywords: Environmental sustainability; Aircraft engines; Technologies employed.

INTRODUÇÃO

O presente trabalho abordará o princípio de funcionamento e as características dos motores aeronáuticos convencionais e a jato em uso, desde a sua invenção até os dias de hoje. Especificamente, iremos analisar o impacto ambiental dos motores.

O artigo estuda a sustentabilidade ambiental dos motores aeronáuticos, desde a criação inicial do motor até o os dias de hoje com o uso de novas tecnologias. Este trabalho abordará os primeiros registros de um motor aeronáutico e motores do tipo turbina. Dos motores a jato, apresentamos a versão mais utilizada no mundo, que é o motor turbofan, analisamos quanto ao impacto ambiental, bem como os principais problemas e poluentes produzidos. O objetivo deste trabalho é apresentar uma breve evolução destes motores identificando os avanços tecnológicos empregadas nestes motores e em motores em desenvolvimento, bem como nos combustíveis ecológicos, observando a previsão do Anexo 16 da Convenção de Aviação Civil Internacional (CACI, 1944), de Chicago onde fala da importância da diminuição de CO₂.

A escolha deste tema justifica-se pela grande preocupação mundial com a poluição causada pelos motores aeronáuticos e pela obrigação em atender às regulamentações nacionais e internacionais de diminuição de poluentes.

Este artigo se encontra dividido em sete seções. Na introdução, delimitamos o tema e apresentamos os objetivos. Na Seção 2, falamos sobre a história do motor aeronáutico

convencional e a jato; na Seção 3, foi descrito informações sobre o motor a jato; na Seção 4, foram expostos os principais poluentes gerados pelos motores aeronáuticos; na Seção 5, apresentamos as principais soluções ecológicas, empregadas na aviação civil, divididas em cinco subseções: navegação PBN, tecnologias empregadas nos motores turbojato, tecnologias empregadas nos motores turbofan, biocombustíveis na aviação civil e por fim, o uso de hidrogênio. Na Seção 6, falamos sobre o Anexo 16 da *International Civil Aviation Organization* (ICAO) e por último, na Seção 7, apresentaremos nossos resultados e, em seguida as conclusões.

2 HISTÓRIA DO MOTOR AERONÁUTICO CONVENCIONAL E A JATO

Nas últimas décadas, houve um aumento significativo na demanda pelo transporte aéreo de passageiros. Pessoas que antigamente não possuíam poder aquisitivo para utilizar tal serviço, hoje são capazes de usufruir do transporte aéreo, devido a preços mais acessíveis e atraentes, além da flexibilização de rotas com diversos *hubs*, fornecendo inúmeras opções de voos, tornando o transporte mais ágil. A globalização fez com que o tempo de viagem entre os países diminuísse e a aviação é a responsável por esta conquista. No entanto, em função do número de aviões em operação no mundo, existe uma grande preocupação com os danos causados ao meio ambiente.

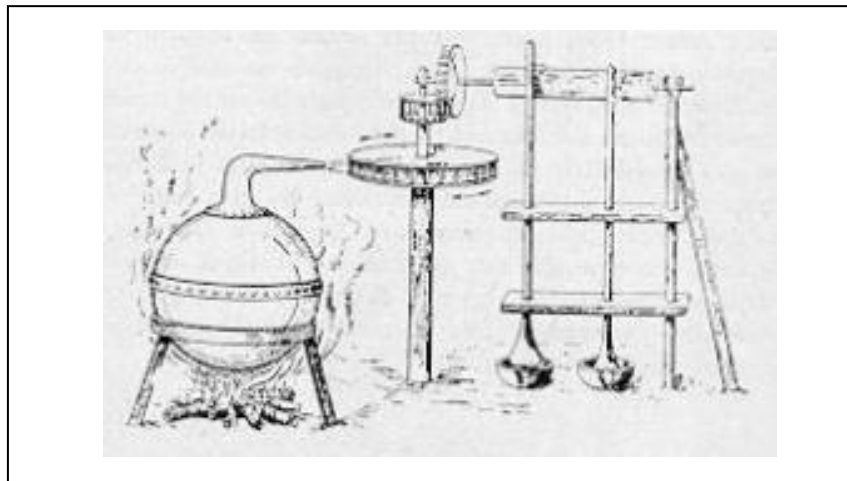
Os equipamentos tecnológicos também tiveram grandes avanços e essa evolução tem sido fundamental para a preservação do meio ambiente. O motor aeronáutico à reação, além do ruído, ocasionado pelos pousos e decolagens ou, ainda, atividades de manutenção, por ser movido à combustível fóssil, libera através do escapamento uma quantidade considerável de monóxido de carbono, devido ao empuxo fornecido pelos motores, substância esta que é extremamente prejudicial à saúde e ao meio ambiente.

O primeiro registro de um motor a reação, que é um motor que expelle um jato de ar rápido sob pressão, gerando empuxo, ocorreu em 120 a.C, quando o matemático e físico Heron, morador da cidade de Alexandria, no Egito, criou um equipamento térmico que transformava o vapor em energia mecânica. Este equipamento era denominado de “Eolípila” ou “Máquina de Heron” (IZOLA, 2002).

O motor de Hero consistia numa esfera oca montada de modo a poder girar entre duas colunas uma das quais, sendo um tubo, que servia para transmitir o vapor gerado em uma caldeira fechada, que era aquecida com fogo externo. Em cada lado da esfera havia um tubo que terminava com um bocal ejetor. A saída do vapor provocava reação e consequentemente a rotação da esfera (DAWSON, 2002, p.4).

De acordo com Meneses (2011) o primeiro registro de motor do tipo turbina/motor rotativo que dispõe de um rotor, lâminas e cubos instalados ao redor de sua circunferência, ocorreu no ano de 1629, quando o engenheiro italiano Giovanni Branca construiu uma espécie de oficina de estampagem utilizando seu projeto a vapor como mostra a Figura 1. Seu projeto baseava-se em um jato de vapor direcionado para as pás de uma roda pré-montada, sobre um eixo vertical, gerando força suficiente capaz de movimentar o equipamento. A partir destes acontecimentos, Isaac Newton formulou todas as leis de movimento e propulsão no ano de 1687, sendo a principal e mais importante para a idealização do motor a jato, a lei de ação e reação (toda ação corresponde a uma reação de igual intensidade, atuando no sentido oposto da força imaginando um objeto sendo impulsionado por jatos).

Figura 1 – Turbina criada por Giovanni Branca.



Fonte: Izola (2002).

Robert Steet patenteou, em 1794, um projeto de motor convencional, de combustão interna, que possuía dois cilindros horizontais, sendo que apenas um cilindro produzia energia. Este foi o primeiro projeto de um motor convencional, movido a combustível fóssil, porém o inventor decidiu não dar prosseguimento na construção do motor (VARELLA, 2010).

Até o ano de 1852, muitos projetistas tentaram idealizar um motor a jato que pudesse ser equipado em máquinas voadoras da época. Em 1853, franceses e alemães apresentaram projetos e esquemas baseados nas leis de Isaac Newton para confecção de motores a jato. Em 1862 os projetos de desenvolvimento de um motor convencional já estavam sendo desenvolvidos. Alphonse Beau de Rochas, engenheiro francês patenteou os princípios de funcionamento dos motores a quatro tempos. Seu projeto apresentava

características de eficiência elevadas. No entanto, suas teorias nunca tiveram sucesso e nunca conseguiu construir seu motor. O alemão Nikolaus August Otto, no ano de 1876, construiu o motor com o mesmo ciclo idealizado por Rochas, que ficou conhecido por Otto silencioso. Dois anos depois, Nikolaus apresentou seu motor na feira internacional de Paris, surgindo o primeiro motor a quatro tempos da humanidade (VARELLA, 2010).

O funcionamento do motor convencional foi idealizado para funcionar em quatro tempos: no primeiro tempo ocorre a admissão, quando o embolo (pistão) aspira a mistura de ar e combustível, através da válvula de admissão que se desloca para a parte inferior do cilindro; no segundo tempo ocorre a compressão, o pistão sobe e comprime toda a mistura de ar-combustível, e se encerra quando o pistão sobe dentro do cilindro; no terceiro tempo, ocorre a combustão, quando a mistura ar-combustível que está comprimida na parte superior do cilindro é queimada através de uma descarga elétrica fornecida pela vela de ignição. Após este procedimento, o pistão desloca-se para baixo gerando energia mecânica; no quarto e último tempo, ocorre o escape, a mistura de ar e combustível queimada é expulsa pelo pistão dentro do motor através da válvula de escape (HOMA, 2015).

Em 1906, Alberto Santos Dumont alçava voo pela primeira vez em uma aeronave, o seu projeto era denominado de 14-bis. A aeronave era equipada com um motor náutico, com 50 cavalos de potência e o voo ocorreu no dia 12 de novembro de 1906, em Paris. O 14-bis alcançou uma velocidade de 41,3 km/h, em um voo de mais de 220 metros de distância (BARROS, 2006).

Nos anos que antecederam a Primeira Guerra Mundial, diversas aeronaves foram desenvolvidas utilizando motores convencionais. A principal aeronave utilizada foi o britânico Avro 504, um caça-bombardeiro que realizou seu primeiro voo em 1913. Ele era equipado com o motor Le Rhône 9J Rotary, de 110 cavalos. Este avião foi o primeiro a ser abatido pelos alemães. Foram produzidas cerca de 10 mil unidades, sendo o avião mais produzido na época (PRIETO, 2020).

Já, no ano de 1923, os estudos para encontrar e idealizar um motor eficiente para operação aeronáutica estavam à todo vapor. Um cadete da Força Aérea Real (RAF), Frank Hittle, utilizou projetos de cientistas Franceses e Alemães, estudados entre os anos de 1852 a 1853, para apresentar um trabalho acadêmico relacionado à propulsão a jato utilizando turbinas de combustão em aeronaves da época. No entanto, este projeto foi interrompido, devido às punições que a Alemanha sofreu após a sua derrota na primeira guerra mundial. (IZOLA, 2002).

Entre os anos de 1930 e 1936, diversos pesquisadores norte-americanos e europeus iniciaram estudos sobre motores a jato de combustão interna. Os pesquisadores descobriram que o uso de turbinas implicava na utilização de compressores de ar, ao mesmo tempo em que fornecia oxigênio para combustão. Essa descoberta foi fundamental, pois o compressor é responsável por grande parte do volume de ar dentro do motor, além de comprimir, ele também faz com que o escoamento de ar seja enviado para a câmara de combustão sob pressão. Depois de muitos estudos e descobertas, no ano de 1938, o engenheiro italiano Secondo Campini desenvolveu um motor a jato de combustão interna, utilizando um compressor de ar³ (IZOLA, 2002).

Por meio destes estudos, a fabricante alemã Heinkel criou o motor “HeS 3” com os princípios básicos de funcionamento descobertos pelos pesquisadores, Este motor era movido a gasolina e gerava cerca de 499 Kgf de empuxo, equivalente a 5kN. O primeiro voo de uma aeronave, com o motor a reação, ocorreu em 1939⁴, com a aeronave denominada “HE 178”, como mostra a Figura 2 (COUTO, et al. 2017).

Figura 2 – Replica da aeronave HE-178.



Fonte: Bernd Borchert/Airliners.net (2015).

Em 1939, o motor convencional já estava em funcionamento em diversas aeronaves e até o ano de 1942, foram produzidas mais de 10.000 unidades, em versão militar, da aeronave DC-3, pela fabricante americana McDonnell Douglas. Esta aeronave foi um sucesso devido a sua versatilidade durante a operação. O DC-3 foi produzido baseado em seu irmão mais velho, o DC-2, e era equipado com dois motores convencionais de 14 cilindros da fabricante de motores Pratt e Whitney, modelo Twin Wasp que gerava cerca de 1.200 HP. O

³ O ar era injetado diretamente na câmara de combustão, onde o combustível era espalhado, através de injetores, possibilitando uma mistura altamente inflamável gerando impulso através da queima dos gases (IZOLA, 2002).

⁴ O voo ocorreu no aeródromo de Marienehe, distrito da cidade de Rostock na Alemanha.

DC-3 voava a cerca de 300 km/h em voo de cruzeiro com uma autonomia de 2400 km. Após o final da segunda guerra mundial, diversos DC-3 que foram utilizados pelos militares foram convertidos para aeronaves civis de passageiros, este avião foi o principal responsável pelo aumento na demanda de viagens aéreas, voou por diversas empresas americanas e até mesmo brasileiras. No entanto, o mercado exigia um transporte rápido e ágil, os motores a jato foram a solução para esta crescente na aviação civil e mundo (ROMAN, 2020).

O motor convencional não acompanhou o desenvolvimento da aviação comercial, porém as aeronaves de pequeno porte tais como: executivas, instrução e desportiva, ainda utilizam esses motores. Os motores convencionais também possuem poluentes e têm evoluído e se tornado mais sustentável. No ano de 2012, por exemplo, a empresa Diamond anunciou uma aeronave bimotora leve com capacidade para até sete passageiros. O DA62 é uma aeronave extremamente leve e resistente, pois sua fuselagem é do tipo monocoque, feita de fibra de carbono. O DA62 é equipado com o motor Austro Engine AE330 convencional a pistão movido a diesel. Além de ser extremamente silencioso, esse motor em comparação aos motores à gasolina convencionais emite menos dióxido de carbono e consome até 60% menos combustível, além de dotar de um sistema eletrônico que controla e monitora o regime dos motores proporcionando uma economia de combustível e conseqüentemente uma menor poluição. Porém, neste trabalho iremos focar nos motores utilizados na aviação comercial (DIAMOND 2019).

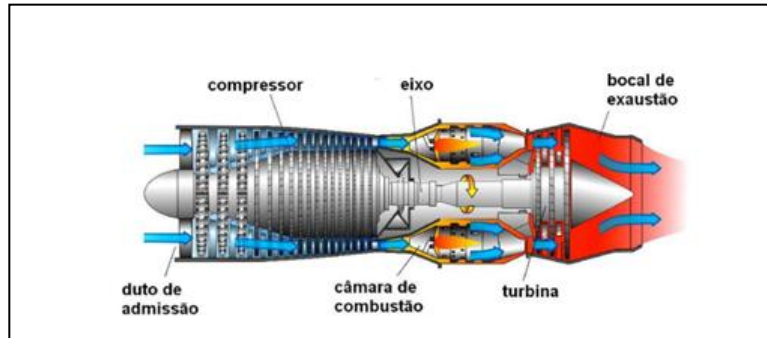
3 O MOTOR A JATO

O motor a reação divide-se em dois tipos, sendo eles o turbojato e turbofan. Seu princípio de funcionamento também é baseado na terceira lei de Newton, portanto, de acordo com Hünecke (2011), ao “empurrar” o ar para trás, uma força de igual intensidade “empurra” o corpo para o lado contrário. Em termos aerodinâmicos, quando o ar é impulsionado na direção oposta ao voo, a aeronave gera empuxo para frente.

O motor turbojato possui duas seções de funcionamento como mostra a Figura 3. A seção fria é composta pela entrada de ar e compressor e a seção quente é composta por câmara de combustão, turbina e escapamento, e todos esses componentes são fixados no eixo móvel dentro do motor. A entrada de ar está localizada na parte frontal do motor, tendo como finalidade ordenar, com maior pressão possível, o fluxo de ar que entra no motor, para passar pelo compressor, e direcionar o ar sob pressão para a câmara de combustão. No início da seção quente, onde se encontra a câmara de combustão, o ar sob pressão é misturado com o combustível injetado pelos bicos injetores e a queima deste fluido ocorre após a centelha das

velas de ignição, quando ocorre a expansão da mistura. Após esse processo, o ar passa sob pressão, em alta temperatura, pela turbina do motor, extraindo a potência dos gases queimados pelo duto de escapamento (HOMA, 2015).

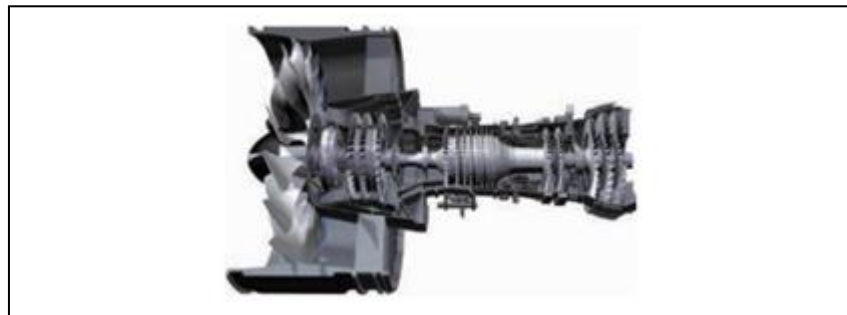
Figura 3 – Componentes de um motor turbojato.



Fonte: Venson (2012)

A evolução do turbojato é chamada de turbofan, que está em uso na maior parte das aeronaves a jato voando no mundo, seu princípio de funcionamento é baseado também na terceira lei de Newton, como seu antecessor, o turbojato. Este motor é composto de um fan, onde este complementa o fluxo de ar gerado pelos compressores, compressores de alta e baixa pressão, câmara de combustão, turbina e bocal de escapamento, conhecido também como exaustor como mostra a Figura 4. O ar admitido pelo motor, passa por todos estes processos até sair sob alta pressão pelo exaustor, gerando assim o empuxo necessário para descolar a aeronave. Por ter o mesmo funcionamento em ambos os motores, o turbofan é mais econômico e viável economicamente falando, além disso, seu índice de poluição é bem menor com relação ao turbojato. Sua operação no Brasil e no mundo, não sofre nenhum tipo de restrição (UBIRATAN, 2014).

Figura 4 – o motor turbofan.



Fonte: Pratt e Whitney (2018).

A primeira aeronave comercial dotada com motores turbojato foi o DH106 Comet, fabricado pela inglesa de Havilland, no ano de 1949. Esta aeronave era equipada com

quatro motores Halford H.2, fabricados pela de Havilland Engine Company; estes motores geravam cerca de 2.200 quilogramas/força de empuxo. No Brasil, o equipamento voou nas cores da Panair do Brasil, nas linhas que ligavam a cidade do Rio de Janeiro a destinos da Europa e do Oriente médio. Porém, devido a diversos problemas, a construção desta aeronave foi descontinuada. No ano de 1954, a fabricante americana Boeing, apresentou um protótipo de um jato comercial denominado de Boeing 707, equipado com quatro motores PW JT3C-6, da fabricante Pratt & Whitney, gerando cerca de 20 mil libras de empuxo. Essa aeronave foi o grande sucesso da Boeing e da aviação civil dando início a “era dos jatos” (OLIVER, 2014).

De acordo com Homa (2015) todos os motores a reação são movidos a querosene, conhecido também como JET-A1 ou QAV. Este combustível é derivado de petróleo e é subtraído através de destilação. O QAV possui características químicas e físicas em sua composição, fazendo com que o líquido permaneça homogêneo resistente a altas temperaturas. Todos estes processos de funcionamento ocorrem de forma simultânea no interior do motor turbojato. No Brasil, diversas empresas operavam aeronaves dotadas com estes motores, como por exemplo, a VARIG e a VASP.

O motor turbojato deixou de ser fabricado devido a diversos fatores, porque além de ser prejudicial ao meio ambiente, o equipamento também causa poluição sonora devido ao alto ruído gerado. Em alguns países e regiões, os aviões equipados com este motor são proibidos de voar e possuem diversas deficiências em seu funcionamento. Este equipamento é adequado apenas para velocidades supersônicas, porque em velocidades subsônicas, o turbojato apresenta um consumo elevado de combustível e pouca eficiência (HOMA, 2015).

Anos depois de começar a ser produzido, o motor turbojato teve uma evolução em seu projeto, devido ao desenvolvimento do protótipo do Boeing 747 que exigia um motor silencioso, econômico, com grande potência e com uma eficiência maior. Esta evolução contava com diversas modificações no motor turbojato. Houve o acréscimo de um “fan”, uma espécie de ventoinha instalada na parte frontal do motor, na entrada de ar, diminuindo drasticamente o seu ruído e aumentando a sua potência (UBIRATAN, 2014).

O turbofan possui algumas vantagens como, por exemplo, aceleração de uma grande quantidade de massa de ar, em baixa velocidade, menor consumo de combustível se comparado ao turbojato, produz maior empuxo em baixas velocidades, proporciona aos pilotos da aeronave uma melhor eficiência e maior potência na decolagem. De acordo com Souza (2015), os motores turbofan são mais eficientes na geração de empuxo, ou seja, a principal vantagem dos turbofans é gerar mais empuxo com menor consumo de combustível. Mas também, possui desvantagens como uma maior complexibilidade em suas características

mecânicas, dificuldades de reinicialização de partida em e menores velocidades quando em nível de cruzeiro.

4 PRINCIPAIS POLUENTES GERADOS PELOS MOTORES AERONÁUTICOS

Os motores turbofan produzem substâncias poluentes durante a queima do combustível. Um deles é o dióxido de carbono (CO₂) que compreende cerca de 70% dos gases emitidos pelo motor e outros 30% compostos por monóxido de carbono, hidrocarbonetos, óxido de nitrogênio e óxido de enxofre. Cerca de 90% das substâncias são expelidas pelo motor, na maior parte das vezes, acima de três mil pés de altitude, outra parte, cerca de 10%, é expelida abaixo de três mil pés, quando em aproximações para pouso ou em decolagens. Outras fontes de emissões de substâncias nocivas ao meio ambiente e que são comuns em aeronaves a jato comerciais, é a fonte de energia auxiliar das aeronaves denominadas de *Auxiliar Power Unit (APU)*, este equipamento é localizado na parte traseira da aeronave e possui o mesmo funcionamento e característica de um motor a reação comum.

A APU é responsável por gerar pressão pneumática para a partida dos motores das aeronaves a jato, ainda, proporcionar eletricidade para aeronave e fornecer ar condicionado quando a aeronave estiver estacionada no pátio do aeroporto. Como a APU é movida a querosene, mesmo combustível utilizado nos motores a jato, este equipamento quando ligado também é uma fonte de emissão de poluentes nocivos ao meio ambiente, além da poluição sonora que o mesma causa nas redondezas aeroportuárias. O motor turbojato além de expelir na queima de combustível poluente como, dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrocarbonetos, óxido de nitrogênio e óxido de enxofre, é extremamente ruidoso⁵ (FAA, 2015).

6 SOLUÇÕES ECOLÓGICAS EMPREGADAS NA AVIAÇÃO CIVIL

6.1 Tecnologias empregadas no motor turbojato

No Brasil, a operação do turbojato é autorizada pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), se forem dotados de um *kit* de redução de ruído externo, conhecido e denominado como *hush kit* que é uma espécie de abafador de ruído que é instalado na parte traseira do motor onde os gases saem da turbina, como mostra na Figura 4. Portanto, instalado

⁵ Este ruído é causado pela turbulência do ar que sai rapidamente da descarga do motor ao ser expelido (FAA, 2015).

este equipamento, o motor se torna mais silencioso atendendo aos padrões de ruído estabelecidos, sem causar danos nas vizinhanças dos aeroportos (ANAC, 2013).

Figura 5 – Aeronave dotada de hush kit.



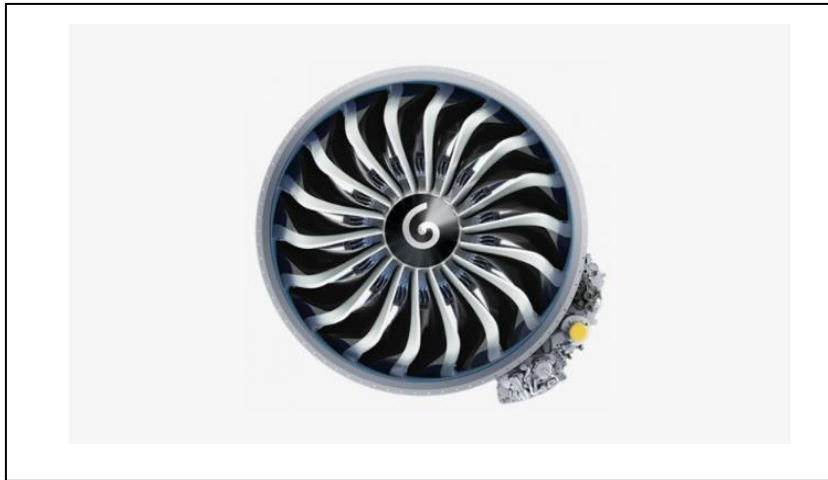
Fonte: Airteamimages.com (2012).

6.2 Tecnologias empregadas nos motores turbofan

De acordo com dados da *International Air Transport Association* (IATA), o consumo mundial de combustível, atualmente, foi de 279 bilhões de litros, no Brasil, 4,9 bilhões de litros. Atualmente, o segmento aeronáutico é responsável por cerca de 3% das emissões de gás carbônico no mundo (FIGUEIREDO, 2013).

A partir de 2008, as fabricantes de motores vêm desenvolvendo formas para diminuir o peso dos motores, aumentar sua eficiência e reduzir o seu consumo de combustível. Sendo que o principal aperfeiçoamento foi a adição de materiais compostos e melhorias aerodinâmicas em alguns componentes do motor, principalmente, no fan, em que suas características aerodinâmicas foram totalmente redesenhadas, como mostra a Figura 5. O principal destaque nesta modificação é o uso de materiais cerâmicos nas peças dos motores, conhecidos como *Ceramic Matrix Composites* (CMC), além da fibra de carbono que proporcionam melhor desempenho, menor ruído e suportam elevadas temperaturas em sua operação, comparado com as ligas de níquel, usados nos motores mais antigos (UBIRATAN, 2014).

Figura 6 – Novo formato do fan.



Fonte: CFM Internacional (2019).

A fabricante de motores Pratt & Whitney desenvolveu uma linha de motores denominados de *PurePower*, com a tecnologia *geared turbofan*. Esta tecnologia consiste em um sistema de engrenagens instaladas na parte interna do motor que permite que o *fan* tenha uma rotação menor que o compressor. Essa característica resulta em redução de consumo de combustível e menor ruído resultando em uma diminuição substancial de resíduos prejudiciais ao meio ambiente (UBIRATAN, 2014).

De acordo com a Pratt e Whitney (2018), o principal motor que equipa as aeronaves atuais da família A320, é o PW1100G, este motor é capaz de gerar até 33 mil libras de empuxo, de acordo com o modelo e especificação de uso da aeronave. Este motor de acordo com a fabricante, reduz a emissão de ruído em até 75%, se comparado com os motores antigos, além de reduzir também as emissões de monóxido de carbono e outras substâncias químicas. Este motor entrou em operação em 2016 e desde então equipa as aeronaves da família A320 com o designativo “NEO” que significa *New Engine Options*.

As novas tecnologias empregadas no turbofan também ajudam na extinção do ruído, isso acontece pelo fato de boa parte do ar sugado pelo motor, passa por fora do núcleo central do propulsor este ar é denominado de *by-pass*, enquanto outra parte, denominada de *core-air* passa por dentro do núcleo do motor onde ocorre a queima. Alguns motores atualmente, 100% do empuxo fornecido, cerca de 80% são provindos do *by-pass* outros 20% do *core air*, ocorrendo à queima do ar sugado dentro do motor. O encontro destes dois fluídos na saída dos gases do motor, resulta em uma diminuição drástica no ruído do propulsor (MASCHIETTO, 2014).

6.3 Biocombustíveis na aviação civil

No Brasil, os estudos pertinentes ao biocombustível tiveram início no ano de 1977. No Ceará, os pesquisadores desenvolveram um combustível renovável de querosene de aviação, utilizando a transesterificação de óleos vegetais mesmo processo utilizado na confecção do biodiesel. A transesterificação consiste na mistura de óleo vegetal ou gordura animal com álcool, os fluídos mais utilizados são derivados de soja, amendoim, girassol e mamona. Após finalizado os estudos no ano de 1982, o combustível renovável iniciou-se os testes em motores no Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), em São José dos Campos, São Paulo. Todos os testes geraram resultados satisfatórios resultando na homologação do biocombustível. O primeiro voo utilizando o combustível ocorreu no ano de 1983, em uma aeronave de modelo Embraer 110 Bandeirante. Constatou-se que em voo, a aeronave teve uma perda de potência, comparada ao querosene convencional, devido ao pouco conteúdo energético do biocombustível. Desde então, o projeto foi descontinuado devido à baixa do preço do petróleo, a partir de 1985 (CGEE, 2010).

De acordo com Westphalen (2010), outras empresas no Brasil também insistiram na sustentabilidade, foi o caso da TAM Linhas Aéreas, atual LATAM Brasil. A empresa realizou um voo de 45 minutos no Rio de Janeiro, abastecido com biocombustível, tornando-se a primeira empresa aérea da América Latina a utilizar combustível sustentável. O voo estava com 18 pessoas à bordo, entre eles executivos da empresa, executivos da fabricante Airbus, engenheiros e os tripulantes. O combustível era derivado de óleo de pinhão manso, um vegetal que é utilizado em diversos países para fabricação de biodiesel.

O combustível utilizado no voo foi produzido através de parcerias com a Airbus e CFM Internacional, fabricante de motores das aeronaves de modelo A320, além da Air BP, empresa que atua no segmento de combustíveis para aviação, que importou o biocombustível, armazenou e realizou todos os testes necessários para a operação segura da aeronave. De acordo com a LATAM, biocombustíveis derivados de pinhão manso permitem uma redução de até 80% na emissão de substâncias prejudiciais ao meio ambiente se comparado ao querosene de aviação convencional destilado do petróleo (WESTPHALEN, 2010).

6.4 Uso de hidrogênio

Pensando no meio ambiente, a fabricante Airbus aposta no uso de Hidrogênio como parte do combustível para os propulsores. O projeto ambicioso da fabricante está previsto para sair do papel até 2035 e consiste no desenvolvimento de uma aeronave comercial com zero emissão de poluentes, sendo o primeiro projeto do mundo a contar com esta tecnologia. A tecnologia denominada de ZEROe, contará com três modelos de aeronaves, sendo elas uma aeronave para voos domésticos de média duração, uma aeronave turboélice para voos regionais e uma aeronave do tipo “*blended wing body*”.

A aeronave de voos domésticos terá capacidade para cerca de 200 passageiros, dotadas de dois motores turbofan, esta aeronave contará com uma autonomia de mais de 3700km. A aeronave dotada de motores turboélice, própria para voos regionais, terá capacidade para até 100 passageiros e uma autonomia de mais de 1700km. O *Blended Wing Body*, traz um *design* em que suas asas se fundem com a fuselagem principal da aeronave. Sua capacidade de passageiros é semelhante ao do projeto turbofan (AIRBUS, 2020).

7 ANEXO 16 – PROTEÇÃO AO MEIO AMBIENTE

A ICAO foi criada na Convenção de Chicago em 1944, juntamente com os Anexos à Convenção, compostos por 19 anexos, sendo os principais padrões e normas internacionais da aviação civil, denominada *Standards and Recommended Practices* (SARPS), que significa práticas recomendadas e elaboradas por meio de fóruns onde os países signatários estão inseridos. Os países que não aceitarem as normas e práticas recomendadas pela ICAO por qualquer motivo, são obrigados a expor as suas razões de acordo com as disposições da Convenção e publicá-las na AIP nacional sob a forma de "diferenças".

O anexo que trata sobre a proteção ao meio ambiente é o anexo de número 16, é dividido em três volumes, sendo o primeiro que trata sobre o ruído causado pelas aeronaves, volume dois, sobre as emissões de poluentes provindos de motores aeronáuticos e o volume três, é o objetivo de implementar o novo padrão para certificação de emissões de dióxido de carbono de aviões, fornecendo materiais de orientação correspondentes a este problema. O padrão de emissão de monóxido de carbono descrito no volume III se aplica as aeronaves a jato subsônicas, com massa máxima de decolagem maior que 5700 kg e aeronaves com motor à hélice, com massa máxima de decolagem maior que 8618 kg. O volume III se aplica a novos

projetos de aeronaves, incluindo modelos derivados, cujo pedido de certificação seja submetido a partir do dia 1º de janeiro de 2020. De acordo com a ICAO, a organização está consciente dos possíveis impactos ambientais adversos relacionados às atividades aéreas e suas responsabilidades, além de seus estados signatários, alcançando a compatibilidade entre o desenvolvimento seguro e ordenado da aviação civil visando a qualidade ambiental (ICAO, 2019).

Para fornecer dados sobre a evolução dos poluentes atmosféricos e das emissões de gases na aviação civil no Brasil, a ANAC elaborou um inventário das emissões da aviação civil nacional. Este inventário expõe, baseado no consumo de combustível das aeronaves, possíveis estimativas de emissões de gases nocivos ao meio ambiente tais como, dióxido de carbono, metano e óxido nitroso, além das emissões de poluentes primários como monóxido de carbono, óxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e material particulado. É feito um cálculo por voo e leva em consideração todos os movimentos com origem e destino nos aeroportos nacionais, exceto aqueles envolvendo aeronaves movidas a etanol, aeronaves militares e agrícolas. Essas estimativas utilizam métodos para o cálculo de emissões com diferentes níveis de detalhamento, definidos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). O método *Tier 1* baseia-se exclusivamente no consumo total de combustível das aeronaves no setor e é utilizado apenas para estimar os gases de efeito estufa diretos. Já o método *Tier 3a*, mais detalhadamente, considera informações pertinentes a movimentação da aeronave, tais como aeroporto de origem e destino, tempo de táxi e modelo da aeronave. Este método pode ser utilizado para estimar o consumo de combustível, bem como os poluentes atmosféricos e as emissões de gases nocivos de efeito estufa, que podem ser divididos por fases de voos domésticos ou internacionais e tipos de esportes. (ANAC, 2020).

8 RESULTADOS

É possível afirmar que, atualmente, a tecnologia empregada nos motores e na operação aeronáutica em geral é bastante favorável ao meio ambiente. O setor de aviação civil tem implantado diversas melhorias, quando falamos em sustentabilidade. Porém, devido ao crescimento do tráfego aéreo, as medidas de melhoria não conseguem acompanhar o aumento das emissões, enquanto, as melhorias crescem cerca de 3% ao ano, o tráfego aéreo cresce 5%.

No entanto, o conjunto de tecnologias fez com que a aviação se tornasse mais sustentável. Atualmente, o motor turbofan é utilizado no mundo inteiro em larga escala, as fabricantes destes motores desenvolveram formas para diminuir o peso dos motores, aumentando sua eficiência reduzindo o consumo de combustível, a adição de materiais específicos e melhorias aerodinâmicas em alguns componentes do motor, aliados com a tecnologia “*by-pass*”, fez com que os ruídos dos motores diminuíssem, o consumo de combustível e as emissões dos gases expelidos pelo escapamento.

Além disso, o uso de biocombustíveis auxilia na redução dos poluentes. Os testes feitos pela LATAM foram bastante favoráveis, visto que o pinhão manso é utilizado em larga escala na confecção do biodiesel. De acordo com a LATAM, biocombustíveis derivados de pinhão manso, permitiram uma redução de até 80% na emissão de substâncias prejudiciais ao meio ambiente se comparado ao querosene de aviação.

Todas essas tecnologias aliadas a navegação PBN, otimizam os trajetos em que a aeronave percorre, tornando a navegação mais curta e direta. Podemos concluir que a operação do motor a jato, atualmente, é menos agressiva ao meio ambiente no geral. Para o futuro, até o ano de 2035, podemos contar com a tecnologia que está sendo desenvolvida pela Airbus, que usa hidrogênio como fonte de alimentação de seus motores, reduzindo drasticamente a emissão de monóxido de carbono na operação aeronáutica.

CONCLUSÃO

Neste trabalho abordamos as novas tecnologias sustentáveis empregadas na área de aviação civil, especificamente nos motores a jato. O setor é um dos responsáveis por boa parte das emissões de poluentes do mundo, portanto, as novas tecnologias buscam minimizar estes efeitos. Identificamos tecnologias adotadas na fabricação de motores, que beneficiam diretamente o meio ambiente, analisando as principais tecnologias desenvolvidas para minimizar os impactos ao meio ambiente.

De acordo com o nosso embasamento teórico, podemos concluir que os motores aeronáuticos atuais, são menos prejudiciais ao meio ambiente, se compararmos às tecnologias de motores fabricados no século passado. Portanto, o motor turbofan, utilizado em grande escala, vem cada vez mais ganhando novas tecnologias que são benéficas ao meio ambiente, devido ao baixo consumo e ruído, trazendo inclusive, vantagens econômicas aos operadores das aeronaves em função do seu baixo consumo e alto rendimento.

O uso de biocombustível juntamente com os novos projetos da fabricante europeia Airbus, para a substituição do QAV, tem investido no uso do hidrogênio como parte do combustível para os propulsores, o que é um avanço bastante considerável, a fim de diminuir a poluição ao meio ambiente, visto que o transporte aéreo é o meio mais utilizado no mundo inteiro.

REFERÊNCIAS

A AIRBUS SE. **Airbus reveals new zero-emission concept aircraft**. Disponível em: <<https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2020/09/airbus-reveals-newzeroemission-concept-aircraft.html>> Acesso em: 29 set. 2020.

AEROIN. **Como o DC-3 mudou a aviação comercial para sempre**. Disponível em: <<https://www.aeroin.net/como-o-dc-3-mudou-a-aviacao-comercial-para-sempre/>> Acesso em: 7 set. 2020.

ANAC. **ANAC aprova kit de modificação de ruído externo hush kit**. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/noticias/2014/anac-aprova-kit-de-modificacao-de-ruído-externo-hush-kit>> Acesso em: 19 set. 2020.

ANAC. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil**. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/meio-ambiente/inventario-nacional-de-emissoes-atmosfericas-da-aviacao-civil>> Acesso em: 07 dez. 2020.

ANAC. **Instrução suplementar nº IS Nº 91-001, de 24 de janeiro de 2017**. Aprovação operacional de navegação baseada em desempenho. [S. l.], 24 jan. 2017. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/iac-e-is/is/is-91-001/@@display-file/arquivo_norma/IS91-001E.pdf> Acesso em: 19 set. 2020.

AVENTURAS NA HISTÓRIA. **Conheça 8 impressionantes aviões das grandes guerras mundiais**. Disponível em: <<https://aventurasnahistoria.uol.com.br/noticias/galeria/8-avioes-revolucionarios-das-grandes-guerras.phtml>>. Acesso em: 20 ago. 2020.

BARROS, H. **Santos Dumont: e a invenção do avião**. 1. ed. Rio De Janeiro-RJ: Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF, 2006. 20 p.

CFM INTERNATIONAL JET ENGINES. **Leap Jet Engines**. Disponível em: <<https://www.cfmaeroengines.com/engines/leap>> Acesso em: 20 ago. 2020.

COUTO, A; SILVA, A; MORCELLI, A; MESQUITA, B; GONÇALVES, J. **Concepção de um motor a reação didático**. Orientador: Giuliano Demarco. 2017. Relatório Técnico Científico (Graduação em Engenharia Aeroespacial) - A Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2017. Disponível em: <https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/428/2018/11/Relatorio_group2_cpio1.pdf> Acesso em: 2 set. 2020.

CGEE. **Biocombustíveis aeronáuticos**: Progressos e desafios. 8. ed. Brasília-DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010. p. 6-29.

DIAMOND AIRCRAFT. **DA62 - The Flying Ultimate Machine**. Disponível em: <https://www.diamondairbrasil.com.br/wpcontent/uploads/2020/03/DA62_Brochure_SCREEN_01.pdf> Acesso em: 20 set. 2020.

DIAMOND AIRCRAFT. **DA62: The ultimate flying machine**. Disponível em: <<https://www.diamondaircraft.com/en/private-pilots/aircraft/da62/overview>>. Acesso em: 20 set. 2020.

ENGINES, Pratt & Whitney. **PW1100G-JM**: Powering The Airbus A320NEO. USA: [s. n.], 2018.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. **Aviation Emissions, Impacts & Mitigation A Primer**. Disponível em: https://www.faa.gov/regulations_policies/policy_guidance/envir_policy/media/Primer_Jan2015.pdf. Acesso em: 31 ago. 2020.

FIGUEIREDO, L. A. G. Motores e combustíveis de aviação: O impacto do abastecimento no transporte aéreo e a busca por alternativas ao Jet Fuel e à Avgas. **Revista Aero Magazine**, São Paulo-SP, v. 1, n. 224, p. 12-13, jan./2013. Disponível em: <https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/motores-e-combustiveis-de-aviacao_808.html> Acesso em: 20 ago. 2020.

HOMA, J. **Aeronaves e Motores**: Conhecimentos Técnicos. 35. ed. São Paulo-SP: ASA, 2015. 188 p.

HÜNECKE, K. **Jet Engines: Fundamentals of Theory, Design, and Operation**. Osceola: Motorbooks International, 2011. 241 p. ISBN 9780760304594.

IZOLA, D. **MOTORES A JATO**: História, Projeto e Construção. 1. ed. São Paulo-SP: Correio Ciência, 2002. p. 1-37.

ICAO. (Chicago). Convenção (ed.). **Environmental Protection - Annex 16**: Aircraft Noise. 1. ed. [S. l.: s. n.], 2008a.

ICAO. (Chicago). Convenção (ed.). **Enviromental Protection - Annex 16: Aircraft Engine Emissions**. 2. ed. [S. l.: s. n.], 2008b.

MASCHIETTO, V. **Modelagem das curvas de rendimento de turbinas aeronáuticas turbofan e turbojato**. 2014. 99 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa-PR, 2014. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/7543/1/PG_DAMEC_2014_2_06.pdf> Acesso em: 28 set. 2020.

MENESES, E. **O uso de turbinas a gás para geração de energia elétrica em plataformas**. Orientador: Bruno Sampaio Andrade. 2011. 37 p. Trabalho de conclusão de curso (Técnico em construção naval) - Centro universitário Estadual Da Zona Oeste, Rio De Janeiro, 2011.

MEDEIROS, D. M. **Sistemas de aproximação RNAV e RNP AR: Estudo para aeroporto da Ilha do Pico**. Orientador: Dr. Jorge Miguel dos Reis Silva. 2010. 122 p. Dissertação mestrado (Mestrado em Engenharia Aeronáutica) - Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2010.

O GLOBO. **TAM faz primeiro voo usando biocombustível de pinhão manso**. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/economia/tam-faz-primeiro-voo-usando-biocombustivel-de-pinhao-manso-2922780>>. Acesso em: 20 ago. 2020.

OLIVER, S. A primeira geração de jatos. **Revista Aero Magazine**, São Paulo-SP, 246, p. 12-14, Nov, 2014.

REVISTA AERO MAGAZINE. **Evolução a jato**. Disponível em: <https://aeromagazine.uol.com.br/artigo/evolucao-jato_1498.html> Acesso em: 20 ago. 2020.

REGULAMENTO BRASILEIRO DA AVIAÇÃO CIVIL. Requisitos para emissões de CO₂ de aviões. nº RBAC38, de 12 de dezembro de 2018. 00. **Requisitos para emissões de CO₂ de aviões: Aeroplane Co₂ Emissions Requirements**, [S. l.], 2018. Disponível em: <<http://www.anac.gov.br:80/assuntos/legislacao/legislacao-1/boletim-depessoal/2018/50s1/an-exo-vi-rbac-no-38-emenda-00>>. Acesso em: 28 ago. 2020.

SATO, A; IMAMURA, M; FUJIMURA, T. **Development of PW1100G-JM Turbofan Engine**. USA: [s. n.], 2014. v. 47. Disponível em: <https://www.ihi.co.jp/var/ezwebin_site/storage/original/application/b2153d6b4a59e36870a3c642bd26d313.pdf> Acesso em: 18 ago. 2020.

SOUZA, T. **Definição da Configuração de um Motor Aeronáutico de Ciclo Variável usando Combustíveis Alternativos**. Orientador: Marcelo Assato. 2015. Relatório Técnico Científico (Iniciação Científica) - Instituto de Aeronáutica e Espaço, [S. l.], 2016.

VARELLA, C. A. **Histórico e desenvolvimento dos motores de combustão interna.** Seropédica-RJ: UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO, 17 jun. 2010. Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154_motores_e_t ratores/Aulas/historico_e_desenvolvimento_dos_motores.pdf.> Acesso em: 2 set. 2020.